

การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

Biosorption of Heavy Metals by Algae

RCU
TD
758.6
C66
S8217
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....120772
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2555

612.370932
i.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบุรณ์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ตำราเรื่อง “การดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโดยสาหร่าย” จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งในการประกอบการสอนวิชา “กลไกของสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสีย” ซึ่งตำราเล่มนี้ได้รวบรวมความรู้ด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับน้ำเสีย โลหะหนัก สาหร่าย และการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย รวมทั้งรวบรวมความรู้พื้นฐานทางด้านเคมีในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย โดยมีวัตถุประสงค์ให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจเรื่องต่าง ๆ ในตำราเล่มนี้ได้ด้วยตนเองแม้ไม่ได้เข้าศึกษาในห้องเรียน นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้รวบรวมตัวอย่างผลการวิจัยที่ได้มีการศึกษาในด้านนี้ทั้งงานวิจัยของไทยและต่างประเทศ รวมทั้งงานวิจัยของผู้เขียน ซึ่งได้ทำการวิจัยและศึกษาในด้านนี้มาประมาณ 6 ปี

โดยเนื้อหาในด้านสาหร่ายขนาดเล็กและสาหร่ายขนาดใหญ่ ผู้เขียนได้นำเนื้อหาความรู้จากหนังสือของ ศ. ลัดดา วงศ์รัตน์ และ ศ. กาญจนภรณ์ ลิ้มโนมนต์ ผู้ซึ่งประสิทธิประสาทวิชาทางด้านแพลงก์ตอนและสาหร่ายให้แก่ผู้เขียนมาใช้เป็นตัวอย่างหลัก ส่วนภาพประกอบต่าง ๆ ผู้เขียนได้ระบุที่มาไว้ด้านล่างเพื่อให้ผู้สนใจสามารถค้นหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ ส่วนภาพที่ไม่ได้ระบุแหล่งที่มาคือภาพที่ผู้เขียนถ่ายเอง แต่ยังไม่ได้มีการตีพิมพ์ที่ใด

สำหรับการแปลคำศัพท์เฉพาะจากภาษาอังกฤษเป็นภาษาไทย ผู้เขียนได้ใช้ตาม “ศัพท์บัญญัติ ราชบัณฑิตยสถาน” เป็นหลัก ส่วนศัพท์ที่ไม่มีการบัญญัติไว้ ผู้เขียนจะใช้คำศัพท์ที่เป็นที่นิยมใช้กันในวงวิชาการ ซึ่งจะเข้าใจความหมายได้ง่าย หรืออาจใช้ทับศัพท์เป็นภาษาอังกฤษ เพราะจะทำให้ความเข้าใจได้ง่ายกว่าการพยายามแปลเป็นภาษาไทย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศ. ลัดดา วงศ์รัตน์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำในการเขียนตำราเล่มนี้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ดวงรัตน์ อินทร ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ในด้านการใช้สาหร่ายกำจัดโลหะหนักให้กับผู้เขียน

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์กับนักศึกษาหรือผู้ซึ่งสนใจศึกษาวิจัยในเรื่องการใช้สาหร่ายดูดซับโลหะหนัก หากมีข้อบกพร่องในตำราเล่มนี้ผู้เขียนต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ และหากมีข้อเสนอแนะประการใดกรุณาแจ้งให้ผู้เขียนทราบที่ krsuneer@kmitl.ac.th จักเป็นพระคุณยิ่ง

สุนิรัตน์ เรืองสมบุญณ์

พฤษภาคม 2549

สารบัญ

คำนำ	หน้า
	I
สารบัญ	II
บทที่ 1 บทนำ	1
ปัญหาและภาวะทางน้ำ	1
การจัดโลหะหนักด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ	3
การจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยใช้พืชน้ำและสาหร่าย	4
บทที่ 2 น้ำเสีย	
บทนำ	6
ความหมายของน้ำเสีย	7
แหล่งที่มาของน้ำเสีย	7
ผลของสิ่งปนเปื้อนในน้ำที่ทำให้ น้ำเสีย	9
ประเภทของน้ำเสีย	12
ลักษณะของน้ำเสีย	12
กฎหมายมลพิษทางน้ำ	14
บทที่ 3 การบำบัดน้ำเสีย	
ความหมาย	24
ความจำเป็นที่ต้องมีการบำบัดน้ำเสีย	24
กรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสีย	25
ประเภทของการบำบัดน้ำเสีย	27
การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	33
วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนด้วยระบบบำบัดแบบชีวภาพ	38
การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก (ตะกั่ว) ปนเปื้อน	40
บทที่ 4 โลหะหนัก	
บทนำ	44

หน้า

โลหะหนัก	45
ที่มาและพิษของโลหะหนัก	46
รูปแบบทางเคมีของโลหะหนัก	59
สมดุลเคมีที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก	60
คุณสมบัติของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับทางชีวภาพ	62
พันธะที่เกี่ยวข้องในการดูดซับโลหะหนักโดยตัวดูดซับชีวภาพ	67

บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

ความหมายของสาหร่าย	69
แหล่งที่อยู่ของสาหร่าย	70
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย	73
สาหร่ายและการจับโลหะหนัก	80
คาร์โบไฮเดรต	80
สมบัติทางกายภาพของคาร์โบไฮเดรต	82
พอลิแซ็กคาไรด์ที่ผนังเซลล์สาหร่าย	84
ผนังเซลล์ของสาหร่ายกับการดูดซับโลหะหนัก	90
การพิสูจน์บทบาทของพอลิแซ็กคาไรด์ในการกำจัดโลหะหนัก	95
หมู่ฟังก์ชัน	99
ค่าคงที่การแตกตัวของกรด	99

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย

การจัดหมวดหมู่สาหร่ายเบื้องต้น	101
ดิวิชันไซยาโนไฟตา (Division Cyanophyta)	112
ดิวิชันโรโดไฟตา (Division Rhodophyta)	124
ดิวิชันคลอโรไฟตา (Division Chlorophyta)	130
ดิวิชันพลาซีโนไฟตา (Division Prasinophyta)	142
ดิวิชันยูกลีโนไฟตา (Division Euglenophyta)	144
ดิวิชันแคโรไฟตา (Division Charophyta)	148
ดิวิชันฟีโอไฟตา (Division Phaeophyta)	150
ดิวิชันบาซิลลารีโอไฟตา (Division Bacillariophyta)	159
ดิวิชันไดโนไฟตา/ไพร์โรไฟตา (Division Dinophyta/Pyrrophyta)	165
ดิวิชันคริปโตไฟตา (Division Cryptophyta)	169

	หน้า
บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก	
การดูดซับทางชีวภาพ	171
การแบ่งกลุ่มการดูดซับทางชีวภาพ	172
กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก	173
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางชีวภาพ	177
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย	
ข้อดีของการใช้สาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก	187
คุณสมบัติของเซลล์สาหร่ายที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก	188
กลไกของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก	190
สาหร่ายที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก	192
การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายที่มีชีวิต	204
กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิต	207
กลไกการปรับตัวของสาหร่ายในน้ำที่พีเอชต่ำ	214
พิษของโลหะหนักต่อสาหร่ายที่มีชีวิต	216
กลไกของสาหร่ายในการทนต่อพิษของโลหะหนัก	219
กลไกของสิ่งมีชีวิตในการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก	224
Phytochelatin ในสาหร่าย	231
การแพร่ผ่านของผนังเซลล์สาหร่าย	241
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย	
พีเอช	248
อุณหภูมิ	255
ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะหนัก	257
ความเข้มข้นของโลหะหนัก	262
ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพหรือความหนาแน่นของตัวดูดซับ	264
ตำแหน่งยึดจับและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย	266
การรบกวนการดูดซับโลหะหนักโดยไอออนอื่น ๆ	268
ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย	272

บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ	
การดูดซับ	282

	หน้า
ไอโซเทอร์มที่นิยมใช้อธิบายการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย	303
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	307
การดูดซับแบบตัวดูดซับยึดติดกับที่	332
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย	
การคัดเลือกตัวดูดซับชีวภาพ	338
การดัดแปลงตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ	359
ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก	360
การพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	367
บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่	
การล้างตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่	373
กลไกการคายตัวถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส	385
บทที่ 13 การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนัก	
ของเสียอันตราย	387
การกำจัดของเสียอันตราย	389
การกำจัดสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนัก	398
บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ	
การเลี้ยงสาหร่าย	400
ปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงสาหร่าย	408
วิธีวัดการเจริญเติบโตและชีวมวล	412
ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ	417
สูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย	426
เอกสารอ้างอิง	439
ภาคผนวก	490

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

INTRODUCTION

ปัญหามลภาวะทางน้ำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต แต่ในปัจจุบันน้ำกลับเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางสภาวะแวดล้อม^[538] เพราะน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี หากน้ำนั้นมีสารพิษละลายปนอยู่ สารเหล่านี้จะทำให้น้ำมีคุณภาพไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการอุปโภคและบริโภค ซึ่งแหล่งที่มาของสารพิษในน้ำส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำทิ้งที่มาจากการใช้ในชีวิตประจำวันจากบ้านเรือน ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับการบำบัดหรือกำจัดสิ่งสกปรกให้มีความสะอาดเพียงพอ ก่อนที่จะทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แม่น้ำลำคลอง หรือก่อนที่จะมีการนำมาใช้ในการอุปโภค บริโภคอีกครั้ง ปริมาณโลหะหนักในน้ำเป็นดัชนีชี้วัดหนึ่งที่ใช้เพื่อควบคุมมาตรฐานคุณภาพน้ำ ซึ่งในปัจจุบันโลหะหนักมีอัตราการถ่ายเทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โลหะหนักเหล่านี้บางชนิดร่างกายไม่ต้องการ ในขณะที่บางชนิดจำเป็นต่อร่างกาย แต่ถ้าหากร่างกายได้รับโลหะหนักเหล่านี้ในปริมาณมากเกินไปก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้

ปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดจากโลหะหนักเป็นปัญหาหลักในสิ่งแวดล้อมมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และปัญหานี้มีแนวโน้มที่รุนแรงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของประชากรและตามจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมที่ขยายตัวเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะมีผลทำให้เกิดผลเสียต่อทั้งมนุษย์และต่อระบบนิเวศวิทยาทางน้ำ^[104]

โดยทั่วไปแล้วมนุษย์ได้รับโลหะหนักจากหลายแหล่งทั้งจากอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องสัมผัสในแต่ละวัน ควันเสียจากรถยนต์ในอากาศ การปล่อยอากาศเสียหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือโลหะหนักที่มาจากแหล่งน้ำ กลุ่มคนซึ่งได้รับอันตรายหรือมีความเสี่ยงสูงที่สุดในการสัมผัสกับโลหะหนักคือทารกและเด็กที่มีอายุต่ำกว่า 7 ปี ซึ่งโลหะหนักมีผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งด้านเป็นพิษเฉียบพลันหรือเป็นพิษจากการสะสมระยะยาว มนุษย์ได้รับโลหะหนักทั้งจากการหายใจ การกินอาหารหรือน้ำดื่มที่มีโลหะหนักปนเปื้อน การได้รับโลหะหนักปริมาณน้อยแต่ได้รับซ้ำบ่อย ๆ เป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณโลหะหนักในร่างกายของมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

เพิ่มมากขึ้น หากได้รับโลหะหนักปริมาณน้อยระดับพิษไม่รุนแรง จะมีอาการคือเหนื่อยง่าย มีความเครียด หงุดหงิด ปวดหัว อ่อนแอ และมีผลกระทบต่อความจำ และพบว่าโลหะหนักหลายชนิดมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการทำงานของไต สมอง และมีผลทำให้ความดันเลือดสูงขึ้น

ที่มาของโลหะหนักที่เข้ามายังแหล่งน้ำดื่มและแหล่งน้ำธรรมชาติ อาจมาจากการกัดเซาะผิวดิน หรือถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำ หรือมีการพัดพามาจากบรรยากาศ เข้ามาในแหล่งน้ำ หรือมาจากการทิ้งขยะหรือของเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วปัญหามลพิษทางน้ำจากโลหะหนักมีที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ตั้งอยู่ติดแหล่งน้ำจึงมีการระบายน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรงซึ่งในน้ำทิ้งมักมีการปนเปื้อนของปรอท ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง ฯลฯ^[410, 556] ซึ่งพบว่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดลงสู่แหล่งน้ำ^[723] ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณโลหะหนักเหล่านี้อยู่ในน้ำธรรมชาติไม่เกิน 0.0005, 0.05, 0.001, 0.1 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ^[599] ซึ่งผลกระทบจากพิษของโลหะหนักนี้มีอันตรายต่อมนุษย์โดยตรง โดยได้มีรายงานจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับพิษของโลหะหนักในปี พ.ศ. 2540 ถึง 211 ราย และมีผู้เสียชีวิต 1 ราย^[711]

โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียที่จะปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีเกณฑ์มาตรฐานในการควบคุมปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย เช่น เกณฑ์ในการควบคุมปริมาณตะกั่วกำหนดไว้ว่าน้ำเสียที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีตะกั่วปนเปื้อนไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของการปล่อยโลหะหนักลงแหล่งน้ำ ในประเทศไทยเป็นหน้าที่ของกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม^[739] แต่ปัญหาในทางปฏิบัติจริงคือมักมีการปล่อยน้ำเสียที่มีโลหะหนักสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด และไม่มีหน่วยงานใดที่ทำหน้าที่ตรวจสอบอย่างถี่ถ้วน จึงเกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำตามมา

โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำสามารถส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและระบบนิเวศวิทยาทางน้ำ โดยโลหะหนักเมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะอยู่ในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ส่วนใหญ่ถ้าค่าพีเอชต่ำ โลหะหนักจะพบอยู่ในรูปของไอออนอิสระ ซึ่งเป็นรูปที่เป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต ถ้าพีเอชสูงจะพบโลหะหนักอยู่ในรูปที่จับตัวกับสารตัวอื่น เช่น CO_3^{2-} , HCO_3^- หรือ OH^- ^[120]

โดยโลหะหนักเมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะสะสมไว้ในดินตะกอนและแพลงก์ตอนพืช หลังจากนั้นถ่ายทอดเข้าสู่แพลงก์ตอนสัตว์และปลาได้^[569] ซึ่งการสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ มีแหล่งที่มาของโลหะหนักมาจากอาหารที่กินเข้าไปมากกว่าที่ละลายอยู่ในน้ำที่ล้อมรอบตัวสัตว์น้ำนั้น^[60] ในปัจจุบันแนวโน้มของการสะสมโลหะหนักในสัตว์น้ำมีเพิ่มมากขึ้น^[724] ซึ่งสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักต่าง ๆ ไว้ในร่างกายได้เป็นปริมาณสูง อีกทั้งยังสามารถถ่ายทอดและเพิ่มปริมาณขึ้นตามห่วงโซ่อาหาร^[477] ตั้งแต่ผู้ผลิต ผู้บริโภคชั้นที่ 1

จนถึงผู้บริโภคชั้นสุดท้ายในน้ำคือปลา ซึ่งมนุษย์ได้รับอันตรายจากโลหะหนักในฐานะผู้บริโภคลำดับสุดท้ายในห่วงโซ่อาหาร

เหตุการณ์ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มีความรุนแรงอย่างเห็นได้เด่นชัดที่เกิดขึ้นในประเทศไทยคือปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมที่ตกค้างในน้ำ ดิน และการสะสมในผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเกิดขึ้นที่อำเภอแม่สอดจังหวัดตาก โดยเฉพาะข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมนั้น ส่งผลให้ประชาชนกว่า 6,000 คน มีความเสี่ยงที่จะเป็นโรคไต อีกตัวอย่างหนึ่งคือสถานการณ์การปนเปื้อนของตะกั่วที่เหมืองแร่ คลิตี้ จ. กาญจนบุรี ซึ่งพบมีการปนเปื้อนของตะกั่วปริมาณสูง ในลำน้ำที่ชาวบ้านใช้อุปโภค บริโภค เป็นประจำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยและใช้น้ำในบริเวณดังกล่าว โดยทำให้ชาวบ้านจำนวนมากล้มป่วย นอกจากนี้ตะกั่วยังส่งผลยับยั้งการพัฒนาของสมองโดยเฉพาะในเด็ก มีผลทำลายไตและความจำในสมองของผู้ใหญ่ และยังทำให้ความดันเลือดสูงอีกด้วย^[269]

การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ

โลหะหนักที่ความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และที่สำคัญคือโลหะหนักไม่สามารถทำให้สูญหายไปจากแหล่งน้ำด้วยกระบวนการธรรมชาติ ทำให้มนุษย์ผู้บริโภคสัตว์น้ำหรือใช้น้ำจากแหล่งน้ำนั้นได้รับพิษของโลหะหนักเข้าสู่ร่างกาย การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีดั้งเดิมเช่นวิธีเคมีกายภาพ (physico-chemical) มีราคาสูง และไม่เหมาะสมถ้าน้ำเสียมีสารอินทรีย์ปนเปื้อน หรือน้ำเสียนั้นมีปริมาณมากแต่มีโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งพบว่ามีวิธีที่เหมาะสมกว่าวิธีดั้งเดิมคือการบำบัดด้วยวิธีดูดซับชีวภาพ (biosorption) ซึ่งคือการใช้สิ่งมีชีวิตซึ่งเรียกว่าตัวดูดซับมาทำการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย^[45]

ขบวนการ biosorption สามารถรวบรวมโลหะหนักมาไว้ที่ตัวดูดซับ ทำให้โลหะหนักที่ตัวดูดซับมีความเข้มข้นสูงมากกว่าน้ำที่ล้อมรอบได้มากกว่า 2-3 พันเท่า ตัวอย่างที่พบเช่นสาหร่ายที่อยู่ในทะเลจะมีปริมาณของโลหะอยู่ในสาหร่าย มากกว่าปริมาณโลหะในน้ำทะเลที่ล้อมรอบ 2-3 พันเท่า ไตอะดอมทะเลสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าในน้ำตั้งแต่ 100 จนถึง 100,000 เท่า^[131] ดังนั้นขบวนการ biosorption สามารถทำหน้าที่รวบรวมโลหะที่มีค่า หรือมีราคาสูงมาจากน้ำทะเลได้ หรือใช้รวบรวมโลหะหนักที่มีราคาสูงกลับมาจากสารละลายที่ผ่านมาจากขบวนการผลิตต่าง ๆ ได้ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ของสาหร่ายเป็นสิ่งที่ตรงตามวัตถุประสงค์หลักที่เป็นที่ต้องการของขบวนการ biosorption แต่อย่างไรก็ตาม การกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษสูง หากใช้ตัวดูดซับที่ยังมีชีวิตจะกำจัดโลหะหนักได้ในปริมาณน้อย เพราะโลหะหนักอาจเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่ดูดซับได้^[404, 427]

biosorption มีความเหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงมาก คือไม่ควรเกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าทำการกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงมากจะทำให้ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพได้เร็ว ซึ่งจะต้องแก้ไขโดยใช้ตัวดูดซับปริมาณมากขึ้น ดังนั้นควรมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อน (pretreatment) โดยใช้เทคนิคอื่นเช่นการตกตะกอนซึ่งเหมาะสมกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักเข้มข้นมาก และวิธีนี้ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวิธีการบำบัดขั้นต้นและใช้วิธี biosorption บำบัดต่อ เป็นวิธีที่ประหยัดและเหมาะสม เพราะจะทำให้ตัวดูดซับทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยข้อดีของ biosorption คือไม่ปล่อยสลัดจ์ซึ่งมีลักษณะเป็นกากตะกอนคม หรือของเหลวข้นที่เป็นพิษออกมา

เมื่อเปรียบเทียบ biosorption กับกระบวนการกำจัดน้ำเสียอื่น ๆ ที่ใช้ในอดีต เช่นการแลกเปลี่ยนไอออน การใช้คาร์บอนในการดูดซับ หรือการกรอง biosorption มีข้อดีเหนือกว่าคือสามารถใช้ได้ในสภาวะแวดล้อมที่อยู่ในช่วงกว้างได้มากกว่า เช่นใช้ได้ในพื้นที่อุณหภูมิความเข้มข้นของโลหะหนักในช่วงกว้าง หรือใช้ได้แม้มีไอออนชนิดอื่นปนในสารละลาย นอกจากนั้นที่พิเศษกว่าวิธีดั้งเดิมคือประหยัดต้นทุน เพราะใช้ตัวดูดซับที่เป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติเหล่านั้น เช่นการใช้สาหร่ายจากทะเลหรือการใช้ของเสียที่เกิดจากขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมก็ได้ เช่นใช้แบคทีเรียฟังกีไจ จากอุตสาหกรรมหมัก การผลิตน้ำแอปเปิ้ล หรืออุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ ซึ่งมีประโยชน์คือของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแหล่งหนึ่งสามารถนำไปใช้กำจัดหรือทำความสะอาดของเสียของขบวนการอื่น ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมอีกแหล่งหนึ่งได้ นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้วิธี biosorption มีต้นทุนต่ำเพราะตัวดูดซับเหล่านี้สามารถล้างและนำโลหะหนักออกจากตัวดูดซับ และทั้งโลหะหนักและตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยใช้พืชน้ำและสาหร่าย

สิ่งมีชีวิตที่นิยมใช้ใน biosorption มีหลายชนิดทั้งแบคทีเรีย สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดใหญ่ พืชน้ำ^[733] พืช ยีสต์ ฯลฯ ซึ่งสาหร่ายเป็นกลุ่มสิ่งมีชีวิตกลุ่มหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก โดยได้รับความนิยมมากทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและขนาดใหญ่ การที่สาหร่ายได้รับความนิยมในการนำมาบำบัดโลหะหนักเพราะสาหร่ายมีข้อดีคือสามารถพบได้ทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม สามารถเก็บมาจากธรรมชาติโดยตรงหรือทำการเพาะเลี้ยงเองโดยใช้พื้นที่ขนาดเล็กในการเพาะเลี้ยง จึงเหมาะแก่การเพาะเลี้ยงเพื่อศึกษากลไกต่าง ๆ และเหมาะสำหรับการเก็บรักษาสายพันธุ์ไว้เป็นหัวเชื้อในการบำบัดน้ำเสีย

สาหร่ายสามารถสะสมโลหะหนักได้อย่างรวดเร็ว โดยดูดซับโลหะหนักไว้ได้ทั้งที่ผิวเซลล์ และนำเข้าภายในเซลล์^[38, 601] นอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งเซลล์ที่มีชีวิต (living cells) และเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (non-living cells/dead cells)^[482] และสาหร่ายสามารถทำงานได้แม้ในสภาวะแวดล้อมที่ผันแปรในช่วงกว้าง เช่นมีการผันแปรของพีเอช อุณหภูมิ หรือการมีไอออนอื่น ๆ ปนอยู่^[9] ดังนั้นจึงใช้ต้นทุนต่ำในการบำบัดน้ำเสีย^[404]

นอกจากนี้วัตถุประสงค์หลักในการใช้สาหร่ายคือการรวบรวมโลหะหนักที่มีความเข้มข้นไม่สูงมาก (แต่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง) ในปริมาณน้ำขนาดใหญ่ให้มาอยู่บนเซลล์สาหร่าย โลหะหนักจึงมีความเข้มข้นมากขึ้นเพราะเมื่ออยู่บนเซลล์สาหร่ายจะอยู่กับอย่างหนาแน่น ปริมาณน้อย ซึ่งในกรณีที่โลหะหนักในน้ำเสียมีความเข้มข้นไม่สูงมาก การใช้สารเคมีตกตะกอนจะมีค่าใช้จ่ายสูง^[38, 732, 734, 735]

การใช้สาหร่ายกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ โดยนิยมใช้สาหร่ายทั้งเซลล์ที่มีชีวิตและที่ตายแล้ว แต่พบว่าเซลล์ตายยังมีจุดบกพร่องบางประการที่ด้อยกว่าเซลล์ที่มีชีวิตคือ เซลล์ตายมีความเฉพาะเจาะจงในการกำจัดโลหะหนักบางชนิดต่ำ เมื่อน้ำเสียมีสารอินทรีย์หรืออินทรีย์ปนเปื้อนสาหร่ายจะดูดซับโลหะหนักได้น้อยลง และต้องทำการเปลี่ยนหรือล้างตัวดูดซับเมื่อดูดซับโลหะหนักจนเต็มเซลล์ ซึ่งพบว่าในกรณีนี้สาหร่ายที่มีชีวิตมีจุดด้อยที่เหนือกว่าเพราะสาหร่ายมีชีวิตใช้สารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำเสียในการเจริญเติบโตได้ เพียงมีแสงเข้ามามีส่วนร่วม นอกจากนี้สาหร่ายยังมีความสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี มีกลไกการลดพิษของโลหะหนักภายในเซลล์ ดังนั้นวิธีบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่น่าจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในอนาคตคือการใช้สาหร่ายที่มีชีวิต (living cell) เพราะเซลล์เหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ทั้งการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ การนำเข้าเซลล์อย่างต่อเนื่อง และการทำให้โลหะหนักตกตะกอนจากการเจริญเติบโตของสาหร่าย นอกจากนี้เซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตยังสามารถกำจัดสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ ออกจากน้ำเสียไปพร้อม ๆ กันด้วย ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการนำสาหร่ายเหล่านี้ไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ในการบำบัดขั้นที่ 3 (tertiary treatment)

บทที่ 2 น้ำเสีย

WASTEWATER

บทนำ

น้ำจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่ามากบนโลก โดยพบว่าโลกประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำประมาณ 70 เพอร์เซ็นต์ มีส่วนที่เป็นแผ่นดินเพียงประมาณ 30 เพอร์เซ็นต์ และน้ำทั้งหมดในโลก เป็นน้ำเค็มประมาณ 97 เพอร์เซ็นต์ น้ำจืด 3 เพอร์เซ็นต์^[336, 687] น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตและมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยในร่างกายมนุษย์มีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 70 เพอร์เซ็นต์^[270] ดังนั้นความสะอาด ปลอดภัยของน้ำที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์มีความสำคัญต่อการอยู่รอดของมนุษย์เป็นอย่างมาก

น้ำธรรมชาติมีอยู่ทั่วไปทั้งบนผิวดิน ใต้ดิน และในบรรยากาศ น้ำบนผิวดินเป็นแหล่งน้ำที่พบได้มากที่สุด ซึ่งได้แก่ แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ห้วย ลำธาร ทะเลสาบ ทะเล และมหาสมุทร ส่วนน้ำใต้ดินมี 2 ประเภท คือ น้ำในดิน และน้ำบาดาล^[284] น้ำธรรมชาติที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความเป็นอยู่ของมนุษย์ พืช และสัตว์ มากที่สุดได้แก่ น้ำบนผิวดิน โดยในแต่ละวันมนุษย์ต้องใช้น้ำจำนวนมาก ทั้งในด้านการอุปโภค บริโภค การประกอบอาชีพทางน้ำ เช่น การประมง เกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เป็นต้น

น้ำถูกนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ในปริมาณที่สูงและถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกครั้งหนึ่ง โดยอาจผ่านหรือไม่ผ่านระบบบำบัด ซึ่งหากน้ำถูกปล่อยออกมาในลักษณะของน้ำเสียที่มีปริมาณมากเกินไปขีดความสามารถที่แหล่งน้ำธรรมชาติจะบำบัดด้วยตัวเองได้ทัน จะทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำขึ้น ทำให้แหล่งน้ำมีสารปนเปื้อนที่ไม่เหมาะสมและในที่สุดก็กลายเป็นน้ำเสีย น้ำเหล่านั้นไม่สามารถนำกลับมาใช้อีกได้ สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำอาจไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ต่อไปได้

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องช่วยกันรักษาแหล่งน้ำธรรมชาติเหล่านี้ให้สะอาดอยู่เสมอ หากปล่อยให้มีสิ่งสกปรก หรือปล่อยให้น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด หรือน้ำทิ้งที่มีสารพิษปนเปื้อน ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะทำให้แหล่งน้ำนั้นกลายเป็นน้ำเสีย ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ที่ต้องนำน้ำจากแหล่งน้ำนั้นมาใช้

ความหมายของน้ำเสีย

ได้มีการให้คำจำกัดความของคำว่า “น้ำเสีย” (wastewater) ไว้หลายคำจำกัดความด้วยกัน เช่น

1) หมายถึง น้ำที่ไม่ต้องการหรือน้ำใช้แล้วและระบายทิ้ง น้ำใช้แล้วจากชุมชน อาจประกอบด้วยสิ่งปะปนที่ติดมาจากกิจกรรมจากที่อยู่อาศัย ธุรกิจ โรงงานอุตสาหกรรม และสถานต่าง ๆ และรวมกับน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน หรือน้ำฝน^[333]

2) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในปริมาณสูงจนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และน่ารังเกียจของคนทั่วไป น้ำเสียก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ แก่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รองรับ เช่นทำให้เน่าเหม็นหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ^[334, 380]

3) หมายถึง น้ำที่มีสารใด ๆ หรือสิ่งปฏิกลที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้^[264]

4) หมายถึงน้ำที่มีสภาพทางกายภาพ ชีวภาพ ส่วนประกอบทางเคมี ที่ไม่เหมาะสม เป็นมลพิษทางทัศนียภาพและก่อให้เกิดผลเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม^[200]

คำจำกัดความของน้ำเสียมีหลายแบบ แต่โดยรวมแล้วมีความหมายไปในทางเดียวกันคือ หมายถึง น้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนจากแหล่งต่าง ๆ จนทำให้คุณภาพน้ำไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ประโยชน์ด้วย หากพิจารณาแหล่งน้ำแหล่งหนึ่งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปบริโภค น้ำแหล่งนั้นอาจไม่สะอาดพอที่จะบริโภค เราจึงอาจจะนับว่าเป็นน้ำเสีย แต่หากพิจารณาแหล่งน้ำนั้นเพื่อนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ แหล่งน้ำนั้นอาจสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ก็ถือว่าไม่ได้เป็นน้ำเสียสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

แหล่งที่มาของน้ำเสีย^[200, 225, 230, 264, 295, 334, 377, 392]

น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปมักเกิดปัญหาน้ำเสียขึ้นได้โดยการรับน้ำทิ้งจากแหล่งใหญ่ ๆ 3 แหล่งคือ น้ำทิ้งจากชุมชน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากการเกษตร

1. น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน หรือน้ำที่มีสิ่งปฏิกลจากบ้านเรือน

เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตของประชาชนที่ทำกิจกรรมอยู่รวมในบริเวณเดียวกันเป็นกลุ่มใหญ่ เช่น อาคารบ้านเรือน หมู่บ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม สถานที่ราชการ สถานบันการศึกษา โรงแรม ห้างสรรพสินค้า ตลาดสด ร้านอาหาร โรงพยาบาล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 น้ำเสีย

เป็นต้น ในบริเวณดังกล่าวนี้ ย่อมมีน้ำทั้งจากการอุปโภคและบริโภค เช่นน้ำชำระล้างร่างกาย น้ำจากการซักล้างและการทำครัว น้ำทั้งจากโรงพยาบาล โรงเรียน น้ำจากห้องน้ำที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดให้มีคุณภาพตามมาตรฐานและอยู่ไม่ไกลจากแม่น้ำลำคลอง สิ่งปนเปื้อนในน้ำทั้งจากชุมชนส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สารที่ย่อยสลายได้โดยกระบวนการธรรมชาติ แต่หากอินทรีย์สารเหล่านี้มีปริมาณสูงมากเกินไปจะทำให้เกิดน้ำเน่าเสียได้

นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำทั้งจากแหล่งชุมชนยังมีการปนเปื้อนของสารพิษประเภทโลหะหนักได้อีกด้วย โดยมาจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทั่วไปเช่น ยาฉีดกันยุง หรือกำจัดแมลง ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ หรือแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น ซึ่งขยะเหล่านี้หากมีการทิ้งไม่เหมาะสม เช่นการทิ้งลงแหล่งน้ำโดยตรง หรือทิ้งตามกองขยะโดยทั่วไป เมื่อภาชนะที่บรรจุผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเกิดรอยรั่วแตกร้าว ย่อมทำให้โลหะหนักหรือสารพิษต่าง ๆ ที่ถูกบรรจุอยู่ภายในไหลลงสู่แหล่งน้ำได้

2. น้ำทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

เป็นน้ำทั้งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำล้างในกระบวนการผลิตต่าง ๆ น้ำที่ใช้ทำความสะอาดเครื่องมือและพื้นที่ในโรงงาน รวมทั้งน้ำหล่อเย็นที่มีความร้อนสูง ซึ่งน้ำทั้งมีลักษณะแตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรม น้ำทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งอาจปนเปื้อนด้วยสารเคมีที่เป็นพิษหรือโลหะหนัก บางแห่งอาจมีวัสดุเหลือจากผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปนไปกับน้ำทั้ง

โรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทอาจมีปัญหาด้านการปนเปื้อนของน้ำมันในน้ำทั้ง โดยอาจเกิดจากการขาดความระมัดระวัง เช่น การเทน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วลงน้ำ เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาน้ำเสีย สังกะสีเหม็น หรือมีสารพิษปนในน้ำกลายเป็นมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่มีผลทำให้น้ำเสียได้คือ อุตสาหกรรมการถลุงแร่ ซึ่งอุตสาหกรรมประเภทนี้จะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักเช่น แคดเมียม อาร์เซนิก (สารหนู) เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้เมื่อไหลปนมากับน้ำทั้งจากการถลุงแร่ จะปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ และไม่มีการสลายตัว แต่สะสมอยู่ในดิน น้ำ และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ทั้งพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำ เมื่อมีการนำน้ำไปใช้บริโภค ก็ได้รับพิษจากโลหะหนักโดยตรง หรือหากมีการนำสัตว์น้ำจากแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนมาบริโภค ผู้บริโภคก็จะได้รับโลหะหนักจากสัตว์น้ำเหล่านั้นเข้าไปสะสมในร่างกาย หรือเมื่อนำดินหรือน้ำไปใช้ปลูกพืช โลหะหนักก็จะเข้าไปสะสมในพืชเหล่านั้น

3. น้ำทิ้งจากการเกษตร

เป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากกิจกรรมทางการเกษตร มักมีสิ่งปนเปื้อนจากการเกษตรกรรมปนเปื้อน เช่น น้ำจากการล้างคอกสัตว์เลี้ยง เช่น คอกหมู คอกวัว เล้าไก่ จากฟาร์มเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น นอกจากนี้บริเวณเพาะปลูกพืชอาจมีมูลสัตว์ที่ใช้เป็นปุ๋ยปนอยู่ เมื่อฝนตกหรือเมื่อใช้น้ำรดพืชผัก น้ำก็จะชะล้างสิ่งปนเปื้อนนี้ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ในมูลสัตว์อาจมีเชื้อโรคและพยาธิปนอยู่ เป็นเหตุให้ผู้ที่ใช้น้ำจากแหล่งน้ำสาธารณะเหล่านั้นได้รับเชื้อโรคได้

ในการเพาะปลูกพืช เกษตรกรยังนิยมใช้สารเคมี เช่น ปุ๋ย สารเคมีกำจัดวัชพืช ศัตรูพืช ซึ่งบางชนิดสลายตัวยากหรือไม่สลายตัวเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ เช่น โลหะหนัก และสารบางส่วนตกค้างอยู่ตามผิวดิน เมื่อน้ำมาชะล้างสารเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ มักเป็นเหตุให้สัตว์น้ำเป็นอันตรายได้ ถ้าสัตว์น้ำได้รับสารเคมีบางชนิดในปริมาณไม่สูงมาก สารเหล่านี้จะไม่ทำให้สัตว์น้ำตายแต่จะสะสมอยู่ในตัวสัตว์ น้ำ และเมื่อมีการนำสัตว์น้ำเหล่านี้มาบริโภค สารเคมีที่สะสมในตัวสัตว์น้ำก็จะถ่ายทอดเข้าสู่ร่างกายของผู้บริโภค

นอกจากนี้ยังมีน้ำทิ้งจากแหล่งอื่น ๆ ได้แก่ เหมืองแร่ ซึ่งน้ำทิ้งมักมีสารพิษ และโลหะหนักปน น้ำทิ้งจากการคมนาคมขนส่ง มีการระบายน้ำมัน ของเสียลงสู่ น้ำ หรือเกิดเรืออัปปาง เรือชนกัน จะเกิดการรั่วไหลของน้ำมัน แต่ในกรณีเหล่านี้จะเกิดได้น้อยมาก

ผลของสิ่งปนเปื้อนในน้ำที่ทำให้น้ำเสีย [200, 225, 230, 264, 295, 334, 377, 392]

สิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ ทั้งน้ำทิ้งจากชุมชน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากการเกษตร มีหลายประเภท ในน้ำทิ้งที่ต่างแหล่งกันอาจมีสิ่งปนเปื้อนที่คล้าย ๆ กันได้ เช่น น้ำทิ้งจากชุมชน หรือจากการเกษตร อาจมีสิ่งปนเปื้อนที่เหมือนกันคืออุจจาระ หรือมูลสัตว์ ซึ่งสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งเหล่านี้มีผล หรือกลไกในการทำให้ น้ำเสียได้แตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้

1. ขยะ

ในน้ำที่คุณภาพดี ไม่ถูกจัดว่าเป็นน้ำเสียจะมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำไม่น้อยกว่า 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สัตว์น้ำเช่น ปลา กุ้ง หอย ใช้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำนี้หายใจทำให้คงมีชีวิตอยู่ได้เมื่อมีคนทิ้งขยะลงในแหล่งน้ำสาธารณะ หรือมีการปนเปื้อนของขยะที่ปล่อยมากับน้ำทิ้ง จะทำให้ขยะซึ่งเป็นสารอินทรีย์เน่าเปื่อยเกิดออกซิเดชันซึ่งหมายความว่าต้องดึงออกซิเจนซึ่งละลายอยู่ในน้ำมาใช้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดน้อยลง ถ้าออกซิเจนลดลงมาก สัตว์น้ำเช่น ปลา ก็จะแสดงอาการขาดออกซิเจน โดยโผล่ขึ้นมาหายใจที่ผิวน้ำบ่อย ๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเดียวกันน้ำก็เกิดสภาวะขาดออกซิเจน เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำให้ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไป ทำให้น้ำกลายเป็นสีดำมีกลิ่นเหม็น กลายเป็นน้ำเสีย

2. สารซักฟอก

จัดเป็นสารอินทรีย์ ผงซักฟอกที่ใช้ซักทำความสะอาดเสื้อผ้านั้นมีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบอยู่มาก เมื่อไหลปนมากับน้ำทิ้งจากบ้านเรือนลงไปตามท่อระบายน้ำแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย โดยส่วนใหญ่จะทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณมากขึ้นของสิ่งมีชีวิตกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการขาดออกซิเจนในเวลากลางคืน เพราะสาหร่ายเหล่านี้ดึงเอาออกซิเจนไปใช้ในการหายใจ ทำให้สัตว์น้ำขาดออกซิเจนด้วย และเมื่อสาหร่ายเหล่านี้ตายลงพร้อม ๆ กัน หรือไล่เลี่ยกัน จะทำให้เกิดการเน่าเสียขึ้นในแหล่งน้ำ เพราะเซลล์สาหร่ายก็เป็นสารอินทรีย์ประเภทหนึ่ง

3. มูลสัตว์

ในการเลี้ยงสัตว์ เช่น การเลี้ยงไก่ หรือ เลี้ยงหมู ต้องทำความสะอาด ล้างคอกเป็นประจำ มูลสัตว์เช่นมูลหมูเป็นสารอินทรีย์ที่ไหลลงแม่น้ำลำคลองทำให้น้ำขาดออกซิเจน และกลายเป็นน้ำเน่า นอกจากนี้น้ำทิ้งที่มาจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการเลี้ยงแบบหนาแน่น ซึ่งมีการถ่ายน้ำระหว่างการเลี้ยงหรือการปล่อยน้ำออกจากบ่อเลี้ยงเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้น ในน้ำเหล่านี้จะมีมูลของสัตว์น้ำตกค้างอยู่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำสาธารณะ

4. ปุ๋ย

ในการเกษตรมีปุ๋ยที่ใช้อยู่สองประเภทคือปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี โดยปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอกได้มาจากมูลสัตว์ต่าง ๆ จัดเป็นพวกสารอินทรีย์ ส่วนปุ๋ยเคมี เช่น ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสเฟต เป็นสารเคมี การใส่ปุ๋ยลงในดินที่ทำการเพาะปลูกเกษตรกรมักใส่ในปริมาณเกินกว่าพืชจะดูดซึมขึ้นไปใช้ได้หมด เมื่อฝนตกน้ำฝนชะเอาปุ๋ยที่เหลืออยู่ในดินลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ปุ๋ยเคมีเช่น ปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยฟอสเฟต เมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะเพิ่มสารอาหารที่พืชต้องการ ทำให้พืชขนาดเล็กหรือสาหร่ายเจริญเติบโตได้ดี เพิ่มปริมาณขึ้นมาก เมื่อสาหร่ายเหล่านี้ตายลง ก็จะทำให้เน่ามีกลิ่นเหม็น เกิดฟิลาขาวลอยอยู่บนผิวน้ำกลายเป็นน้ำเสีย

5. สารฆ่าแมลงและสารฆ่าวัชพืช

สารฆ่าแมลงและสารฆ่าวัชพืช ส่วนมากเป็นสารเคมีที่เป็นพิษ เมื่อถูกชะลงไปในน้ำ ก็จะเป็นพิษแก่พืชและสัตว์ที่อยู่ในน้ำ และถ้านำน้ำนั้นไปใช้ก็จะได้รับอันตรายจากสารพิษนั้นด้วย

6. สารพวกกรด ต่าง สารเคมีต่าง ๆ สารกัมมันตภาพรังสี

สารพวกกรด ต่าง สารเคมีต่าง ๆ สารกัมมันตภาพรังสี และสารพิษที่มาจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารที่ปะปนมีหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกสารอนินทรีย์ สารต่าง ๆ เหล่านี้เมื่อลงสู่แม่น้ำลำคลอง ทำให้เพิ่มการสะสมสารเหล่านั้นในน้ำ หรือเกิดการเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้สัตว์น้ำเช่น ปลาตายเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดความเสียหาย

7. โลหะหนัก

มีที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหลัก และพบได้ในแหล่งเกษตรกรรม จากการใช้สารกำจัดศัตรูพืช และจากแหล่งชุมชนเช่นการทิ้งถ่านหรือแบตเตอรี่ โลหะหนักสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตและตะกอนต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ หากมีปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อชีวิต แต่หากมีปริมาณมาก จะทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้นตาย น้ำขาดระบบบำบัดตัวเองตามธรรมชาติ ทำให้เกิดน้ำเสียขึ้นได้

8. สารกัมมันตรังสี

เกิดจากโรงงานที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และจากสถานที่ที่มีการใช้สารกัมมันตรังสี เช่น ห้องปฏิบัติการไอโซโทปและอื่น ๆ สารกัมมันตรังสีบางชนิดละลายน้ำได้ เมื่อลงไปอยู่ในแหล่งน้ำก็อาจถูกสัตว์น้ำเช่น ปลา ปู กุ้ง หอย กินแล้วเข้าไปสะสมอยู่ภายในตัวสัตว์น้ำเหล่านั้นเมื่อเรานำสัตว์น้ำนั้นมากินเป็นอาหาร ก็อาจเป็นอันตรายได้

9. ความร้อน

ความร้อนมาจากโรงไฟฟ้า และโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด ความร้อนที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้น้ำบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้สัตว์น้ำและพืชน้ำบางชนิดเจริญเติบโตเร็วขึ้น ปลาต้องการอาหารและออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เกิดการขาดแคลนอาหารและออกซิเจน นอกจากนั้นพืชและสัตว์น้ำบางชนิดไม่ชอบดำรงชีวิตในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง และหากไม่สามารถทนภาวะเช่นนี้ได้ก็จะตายไป

10. น้ำมัน

มักพบในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้น้ำมันหล่อลื่น หรืออาจเกิดจากอุบัติเหตุเรือบรรทุกน้ำมันล่ม โดยทำให้มีคราบน้ำมันลอยที่ผิวน้ำ เป็นเหตุให้เกิดออกซิเจนในอากาศไม่สามารถละลายลงสู่แหล่งน้ำได้ มีผลทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำขาดแก๊สออกซิเจนในการหายใจ นอกจากนี้คราบน้ำมันยังกันแสงแดดให้ส่องลงไปได้ น้ำได้้น้อยลงหรือส่องลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 น้ำเสีย

ไม่ได้ ทำให้พืชน้ำ หรือแพลงก์ตอนพืชตาย ทำให้แหล่งน้ำนั้นขาดอาหารของสัตว์น้ำขนาดเล็ก และขาดแหล่งสร้างแก๊สออกซิเจนด้วย

ประเภทของน้ำเสีย^[224, 225, 230]

น้ำเสียที่มาจากแหล่งต่าง ๆ นั้น มีสารที่ปนอยู่ในน้ำเสียไม่เหมือนกัน สารเหล่านั้นจะเป็นสารประเภทใดขึ้นอยู่กับแหล่งของน้ำเสียและหากเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สารที่มีในน้ำเสียจะขึ้นกับกรรมวิธีการผลิตของอุตสาหกรรมนั้น ๆ การแบ่งประเภทน้ำเสียตามสิ่งปนเปื้อนหรือสารหลัก ๆ ที่ก่อให้เกิดลักษณะเด่นของน้ำเสีย แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ ดังนี้

1. น้ำเสียประเภทที่มีสารอินทรีย์
2. น้ำเสียประเภทที่มีสารอนินทรีย์
3. น้ำเสียประเภทที่แพร่กระจายเชื้อโรค
4. น้ำเสียที่มีความเป็นกรด-เบสสูง
5. น้ำเสียที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษ
6. น้ำเสียที่มีสารกัมมันตภาพรังสี
7. น้ำเสียที่มีอิฐ หิน ดิน ทราายน้อย

ลักษณะของน้ำเสีย^[200, 225, 230, 264, 295, 334, 377, 392]

การพิจารณาหรือวิเคราะห์ว่าแหล่งน้ำใดเป็นน้ำเสียโดยทั่วไปแบ่งลักษณะที่พิจารณาออกเป็น 3 ลักษณะ คือ พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และลักษณะทางชีวภาพ

1. ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพได้แก่ สี กลิ่น อุณหภูมิ ของแข็งต่าง ๆ การนำไฟฟ้า ความโปร่งใสของน้ำ ความขุ่น และความหนาแน่น เป็นต้น

2. ลักษณะทางเคมี

ลักษณะทางเคมี ได้แก่ พีเอชของน้ำ ความเป็นด่าง ความกระด้าง ความเค็ม สภาพกรด (acidity) ออกซิเจนละลาย ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีหรือบีโอดี ความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนทางเคมีหรือซีโอดี สารเคมีในน้ำ เช่น ไนไตรท์ ไนเตรท แอมโมเนีย ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ปริมาณโลหะหนัก สารอินทรีย์ ไบโอฟอสฟอรัส สารซักฟอก สารอนินทรีย์ และสารต่าง ๆ ที่อาจมาจากแหล่งตะกอนที่มีอยู่ในน้ำซึ่งอาจเป็น ตะกอนหนัก ตะกอนแขวนลอย ตะกอนคอลลอยด์ และอื่น ๆ

3. ลักษณะทางชีวภาพ

โดยวิเคราะห์ชนิดของสิ่งมีชีวิตหรือจุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสีย ซึ่งมีทั้งจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ และจุลินทรีย์ที่เป็นตัวย่อยสลายสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำเสีย ซึ่งกลุ่มหลังนี้มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียเป็นอย่างมาก โดยพบว่าแบคทีเรีย เป็นตัวที่ช่วยย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสียได้มากที่สุด รองมาก็จะเป็นพวก รา สาหร่าย และโปรโตซัว การทราบชนิดของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำเสียทำให้สามารถเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียได้อย่างเหมาะสม

การที่มีน้ำเสียปริมาณมากจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา ซึ่ง ความหมายของ “มลพิษ” นั้น หมายถึง ของเสีย วัตถุอันตรายและมลสารอื่น ๆ รวมทั้ง กาก ตะกอนหรือสิ่งตกค้างจากสิ่งเหล่านั้น ที่ถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ หรือที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติซึ่งก่อให้เกิดหรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม หรือ ภาวะที่เป็นพิษภัยอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ และให้หมายความรวมถึง รังสี ความร้อน แสง กลิ่น เสียงความสั่นสะเทือน หรือเหตุรำคาญอื่น ๆ ที่เกิดหรือถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษด้วย^[333]

สาเหตุหลักของการเกิดปัญหามลพิษทางน้ำคือมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทาง การเกษตรและอุตสาหกรรม จึงมีการเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง สารเคมี วัตถุอันตราย เพิ่มขึ้น ตัวอย่างของการเกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้แก่ ใน จ. มหาสารคาม มีปัญหาน้ำเค็มที่เกิดจากการทำนาเกลือ (ปี พ.ศ. 2522-2532) ใน จ. ขอนแก่นมีปัญหาการรั่วไหลของ กากน้ำตาล ทำให้ลำน้ำพองเน่าเสีย ปลาและสัตว์น้ำต่าง ๆ ตาย (ปี พ.ศ. 2535) และยังมีปัญหาน้ำเสียของลำน้ำพองจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ในปี พ.ศ. 2543 รวมทั้งปัญหาแม่น้ำท่าจีนเน่า เนื่องจากน้ำท่วมขังนาข้าว จนน้ำเน่า และไหลลงสู่แม่น้ำ และต้องรองรับน้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้สัตว์น้ำตาย สาเหตุส่วนใหญ่ และสำคัญมาจากมนุษย์ ที่ใช้แหล่งน้ำทั้งทางตรงและทางอ้อมอย่างขาดการอนุรักษ์ ซึ่งแนวทางในการป้องกันปัญหาการเกิดมลพิษทางน้ำคือการมีกฎหมายควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

กฎหมายมลพิษทางน้ำ^[739]

ได้มีการกำหนดกฎหมายเกี่ยวกับมลพิษทางน้ำ ซึ่งเกี่ยวกับการจัดการปัญหามลพิษทางน้ำ เช่น จัดให้มีระบบบำบัดน้ำเสียรวม หรืออาจห้ามทำกิจกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ หรือเกี่ยวกับการแก้ไขความเสียหายที่เกิดจากมลพิษ รวมทั้งได้มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ และกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม หรือน้ำทิ้งที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำได้อาศัยตามมาตรา 32 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ให้อำนาจคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำต่าง ๆ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเกณฑ์ของโลหะหนัก มีดังนี้

1. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง

ซึ่งหมายถึงบริเวณทะเลอาณาเขตของไทยซึ่งมีความกว้าง 12 ไมล์ทะเล และหากเป็นเกาะที่อยู่นอกทะเลอาณาเขต จะครอบคลุมถึงทะเลรอบเกาะนั้นด้วยเป็นระยะทางไม่เกิน 12 ไมล์ทะเล จากชายฝั่งของเกาะหรือเส้นฐาน (baseline) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537) วันที่ 20 มกราคม 2537 แบ่งประเภทคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งออกเป็น 7 ประเภท คือ

1.1. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการสงวนรักษาธรรมชาติ ได้แก่ น้ำทะเลซึ่งมีสภาพธรรมชาติและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การศึกษาวิจัยหรือการสาธิตทางด้านวิทยาศาสตร์ที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแก่สภาพแวดล้อม
- การใช้ประโยชน์จากทัศนียภาพและธรรมชาติ หรือ
- การจัดการและการอนุรักษ์ที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแก่สภาพแวดล้อม

1.2. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งปะการัง

1.3. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งธรรมชาติอื่น ๆ นอกจากแหล่งปะการัง

1.4. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

1.5. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการว่ายน้ำ

1.6. คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการกีฬาทางน้ำอย่างอื่นนอกจากการว่ายน้ำ

1.7. คุณภาพน้ำทะเลบริเวณแหล่งอุตสาหกรรม

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแต่ละประเภทข้างต้นไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ 2 หน้าเสีย อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการสงวนรักษามรดกชาติ ต้องเป็นไปตาม
มรดกชาติที่ไม่ได้รับผลจากการกระทำของมนุษย์และสามารถใช้ประโยชน์ได้ตามที่กำหนดไว้

1.2. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งปะการัง ต้องเป็นไปตามดังนี้

- ไม่มีวัตถุที่น้ำรั้งเกยจลอยอยู่ผิวน้ำ
- ไม่มีน้ำมันหรือไขมันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าลอยอยู่บนผิวน้ำ
- อุณหภูมิไม่สูงกว่า 33 องศาเซลเซียส
- ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าระหว่าง 7.5-8.9
- ความเค็ม (salinity) มีค่าระหว่าง 29-35 ส่วนในพันส่วน
- ความโปร่งใส (transparency) มีค่าเปลี่ยนแปลงจากสภาพธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 10
- ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) มีค่าไม่น้อยกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate-nitrogen) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (phosphate-phosphorus) และพีซีบี (poly chlorinated biphenyl) ต้องเป็นไปตามธรรมชาติ
- ปรอททั้งหมด (total Hg) มีค่าไม่เกิน 0.0001 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แคดเมียม (Cd) มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โครเมียม (Cr) มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โครเมียมชนิด hexavalent มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ตะกั่ว (Pb) มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ทองแดง (Cu) มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แมงกานีส (Mn) มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สังกะสี (Zn) มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- เหล็ก (Fe) มีค่าไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟลูออไรด์ (F) มีค่าไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- คลอรีนคงเหลือ (residual chlorine) มีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟีนอล (phenols) มีค่าไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนีย ไนโตรเจน (ammonia-nitrogen) มีค่าไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ซัลไฟด์ (sulfide) มีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไซยาไนด์ (cyanide) มีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด (total organochlorine pesticides) มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

- กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) มีค่ารังสีแอลฟา (alpha) ไม่เกิน 0.1 เบคเคอเรลต่อลิตร และค่ารังสีเบตา (beta) ที่ไม่รวมรังสีจากโปแตสเซียม 40 (potassium 40) ตามธรรมชาติ ไม่เกิน 1.0 เบคเคอเรลต่อลิตร

1.3. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งธรรมชาติอื่น ๆ นอกจากแหล่งปะการัง ต้องเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งปะการัง เว้นแต่

- ความเป็นกรดและด่างมีค่าระหว่าง 7.0-8.5
- ความเค็มให้มีค่าเปลี่ยนแปลงจากสภาพธรรมชาติได้ไม่เกินร้อยละ 10

1.4. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งปะการัง เว้นแต่

- สีและกลิ่นจะต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- ความเป็นกรดและด่าง มีค่าระหว่าง 7.0-8.5
- ความเค็มให้มีค่าเปลี่ยนแปลงจากสภาพธรรมชาติได้ไม่เกินร้อยละ 10
- แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (total coliform bacteria) มีค่าไม่เกิน 1000 เอ็ม. พี. เอ็น. ต่อ 100 มิลลิลิตร
- แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (fecal coliform bacteria) ต้องมีสภาพธรรมชาติ

1.5. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการว่ายน้ำ จะต้องเป็นไปดังนี้

- ไม่มีวัตถุที่น่ารังเกียจลอยอยู่บนผิวน้ำ
- ไม่มีน้ำมันหรือไขมันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าลอยอยู่บนผิวน้ำ
- ความโปร่งใสมีค่าเปลี่ยนแปลงจากสภาพธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 10
- สีและกลิ่นต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มมีค่าไม่เกิน 1000 เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ 100 มิลลิลิตร

1.6. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการกีฬาทางน้ำอย่างอื่นนอกจากการว่ายน้ำ จะต้องเป็นไปดังนี้

- ไม่มีวัตถุที่น่ารังเกียจลอยอยู่บนผิวน้ำ
- ไม่มีน้ำมันหรือไขมันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าลอยอยู่บนผิวน้ำ
- สีและกลิ่นต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ

1.7. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลบริเวณแหล่งอุตสาหกรรม จะต้องเป็นไปดังนี้

- ไม่มีวัตถุที่น่ารังเกียจลอยอยู่บนผิวน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่มีน้ำมันหรือไขมันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าลอยอยู่บนผิวน้ำ
- โปรททั้งหมดมีค่าไม่เกิน 0.0001 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แคดเมียมมีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สีและกลิ่นต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- อุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกินกว่า 3 องศาเซลเซียส
- โครเมียมชนิด hexavalent มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเป็นกรดและด่าง ความเค็ม ความโปร่งใส ออกซิเจนละลาย ในเตรท-ไนโตรเจน ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส โครเมียม ตะกั่ว ทองแดง แมงกานีส สังกะสี เหล็ก ฟลูออไรด์ คลอรีนคงเหลือ ฟีนอล แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ซัลไฟด์ ไฮยาไนต์ ฟิซีปี สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด และค่ากัมมันตภาพรังสี ให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่

2. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้ออกประกาศ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) วันที่ 20 มกราคม 2537 กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งหมายถึง “แม่น้ำลำคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ และแหล่งน้ำสาธารณะอื่น ๆ ที่อยู่ภายในแผ่นดิน ซึ่งหมายความรวมถึง แหล่งน้ำสาธารณะที่อยู่ภายในผืนแผ่นดินบนเกาะด้วย แต่ไม่รวมถึงน้ำบาดาล และในกรณีที่แหล่งน้ำนั้นอยู่ติดกับทะเลให้หมายความถึงแหล่งน้ำที่อยู่ภายในปากมีน้ำหรือปากทะเลสาบ” โดยมีการแบ่งแหล่งน้ำผิวดินออกเป็น 5 ประเภท

2.1. แหล่งน้ำประเภทที่ 1 ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและสามารถใช้เป็นประโยชน์เพื่อ

- 2.1.1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน
- 2.1.2. การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน
- 2.1.3. การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ

2.2. แหล่งน้ำประเภทที่ 2 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- 2.2.1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
- 2.2.2. การอนุรักษ์สัตว์น้ำ
- 2.2.3. การประมง
- 2.2.4. การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

แหล่งน้ำประเภทที่ 2 จะต้องมีมาตรฐานดังต่อไปนี้

- ไม่มีวัตถุหรือสิ่งของที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งจะทำให้สี กลิ่น และรสของน้ำเปลี่ยนไปตามธรรมชาติ
- อุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกินกว่า 3 องศาเซลเซียส
- ความเป็นกรดและด่าง มีค่าระหว่าง 5.0-9.0
- ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าไม่น้อยกว่า 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- บีโอดี (BOD) มีค่าไม่เกินกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด มีค่าไม่เกินกว่า 5000 เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ 100 มิลลิตร
- แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์มมีค่าไม่เกินกว่า 1000 เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ 100 มิลลิตร
- ไนเตรท (NO_3) ในหน่วยไนโตรเจนมีค่าไม่เกินกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนีย (NH_3) ในหน่วยไนโตรเจนมีค่าไม่เกินกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟีนอล มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ทองแดง มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นิกเกิล (Ni) มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แมงกานีส มีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สังกะสี มีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แคลเซียมในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO_3 ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO_3 เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โคเรียมชนิด hexavalent มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ตะกั่ว มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- พรอททั้งหมด มีค่าไม่เกิน 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร
- อาร์เซนิก (As) มีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไชยาไนต์ มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- กัมมันตภาพรังสี มีค่ารังสีแอลฟาไม่เกินกว่า 0.1 เบคเคอเรลต่อลิตร และค่ารังสีเบตา ไม่เกิน 1.0 เบคเคอเรลต่อลิตร
- สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ดีดีที (DDT) มีค่าไม่เกินกว่า 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร
- บีเอชซีชนิดแอลฟา (alpha-BHC) มีค่าไม่เกินกว่า 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร
- ดิลดริน (dieldrin) มีค่าไม่เกินกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร
- อัลดริน (aldrin) มีค่าไม่เกินกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร
- เฮปตาคลอร์ (heptachlor) และเฮปตาคลอร์อีปอกไซด์ (heptachlorepoxyde) มีค่าไม่เกิน 0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เอนดริน (eldrin) ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด

2.3. แหล่งน้ำประเภทที่ 3 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถใช้ประโยชน์เพื่อ

2.3.1. การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน

2.3.2. การเกษตร คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำประเภทที่ 3 ให้มีมาตรฐานตามคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำประเภทที่ 2 เว้นแต่

- ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าไม่น้อยกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- บีโอดี มีค่าไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด มีค่าไม่เกินกว่า 20,000 เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ 100 มิลลิลิตร
- แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์มมีค่าไม่เกินกว่า 4000 เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ 100 มิลลิลิตร

2.4. แหล่งน้ำประเภทที่ 4 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

2.4.1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน

2.4.2. การอุตสาหกรรม คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำประเภทที่ 4 ให้มีมาตรฐานตามคุณภาพของแหล่งน้ำดังนี้

- ไม่มีวัตถุหรือสิ่งของที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งจะทำให้สี กลิ่น และรสของน้ำเปลี่ยนไปตามธรรมชาติ
- อุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกินกว่า 3 องศาเซลเซียส
- ความเป็นกรดและด่าง มีค่าระหว่าง 5.0-9.0
- ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- บีโอดี มีค่าไม่เกินกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไนเตรท ในหน่วยไนโตรเจนมีค่าไม่เกินกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนีย ในหน่วยไนโตรเจนมีค่าไม่เกินกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟีนอล มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ทองแดง มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นิกเกิล มีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แมงกานีส มีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สังกะสี มีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แคลเซียมในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO_3 ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO_3 เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โครเมียมชนิด hexavalent มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ตะกั่ว มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- พรอททั้งหมด มีค่าไม่เกิน 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร
- อาร์เซนิก มีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โซเดียมไนต์ มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- กัมมันตภาพรังสี มีค่ารังสีแอลฟาไม่เกินกว่า ไม่เกิน 0.1 เบคเคอเรลต่อลิตร และค่ารังสีเบตา ไม่เกิน 1.0 เบคเคอเรลต่อลิตร
- สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ดีดีที มีค่าไม่เกินกว่า 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร
- บีเอชซีชนิดแอลฟา มีค่าไม่เกินกว่า 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร
- ดีลดีริน มีค่าไม่เกินกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร
- อัลดีริน มีค่าไม่เกินกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร
- เฮปตาคลอร์ และเฮปตาคลอร์อีพอกไซด์ มีค่าไม่เกิน 0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร
- เอนดริน ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด

2.5. แหล่งน้ำประเภทที่ 5 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทั้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม โดยต้องมีมาตรฐานต่ำกว่าคุณภาพในแหล่งน้ำประเภทที่ 4

ส่วนการจะกำหนดว่าแหล่งน้ำผิวดินแหล่งใดจะเป็นแหล่งน้ำประเภทใดบ้างนั้น ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติให้กรมควบคุมมลพิษเป็นผู้กำหนด

3. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

รัฐมนตรีกว่ากระทรวงอุตสาหกรรมได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (2539) วันที่ 14 มิถุนายน 2539 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งดังต่อไปนี้

- ความเป็นกรดและด่าง มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
- ทีดีเอส ต้องมีค่าไม่มากกว่า 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งซึ่งค่าไม่ต่ำกว่า 2 น้ำเสีย อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็มมากกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าที่ดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร

- สารแขวนลอย ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โลหะหนักมีค่าดังนี้
 - พรอท ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - เซเลเนียม ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แคดเมียม ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ตะกั่ว ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - อาร์เซนิก ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - โครเมียม: hexavalent chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
trivalent chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - บารีอัม ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - นิกเกิล ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ทองแดง ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - สังกะสี ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แมงกานีส ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ซัลไฟด์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โซยาไนต์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนโซยาไนต์ ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟอสฟอรัส ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สารประกอบฟีนอล ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- คลอรีนอิสระ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ยาฆ่าแมลงต้องไม่มี
- อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
- สี ต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- กลิ่น ต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- น้ำมันและไขมัน ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าบีโอดี ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ

ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ค่าทีเคเอ็น ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าซีโอดี ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อมีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานแล้ว จะมีโรงงานมากน้อยเพียงใดที่ปฏิบัติตามมาตรฐานดังกล่าวนั้น ส่วนหนึ่งก็ขึ้นอยู่กับสภาพการบังคับใช้กฎหมาย หากมีการบังคับใช้กฎหมายอย่างจริงจัง ผู้ประกอบกิจการโรงงานก็มักปฏิบัติตามมาตรฐานดังกล่าว เพื่อให้การบังคับใช้กฎหมายมีประสิทธิภาพมากขึ้น กฎกระทรวง ฉบับที่ 2 (2535) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้กำหนดให้ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียต้องปฏิบัติตามดังต่อไปนี้ด้วยคือ

- ต้องติดตั้งมาตรวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าสำหรับบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะไว้ในที่ง่ายต่อการตรวจสอบ และต้องมีการจดบันทึกเลขหน่วยและปริมาณการใช้ไฟฟ้าประจำเดือน
- ในกรณีที่มีการใช้สารเคมีหรือสารชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสีย ต้องมีการบันทึกการใช้สารเคมีหรือสารชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียประจำวัน และมีหลักฐานในการจัดหาสารเคมีหรือสารชีวภาพดังกล่าวด้วย
- ข้อกำหนดข้างต้นนี้ทำให้พนักงานเจ้าหน้าที่สามารถตรวจสอบได้ง่ายว่า ได้มีการเปิดเครื่องระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานจริงหรือไม่

4. มาตรฐานสำหรับน้ำที่จะระบายลงทางน้ำชลประทาน หรือทางน้ำที่เชื่อมกับทางน้ำชลประทาน

กรมชลประทานได้มีคำสั่งกรมชลประทานที่ 883/2532 เรื่องการป้องกันและการแก้ไขการระบายน้ำที่มีคุณภาพต่ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน เมื่อวันที่ 19 ธันวาคม 2532 คำสั่งดังกล่าวได้กำหนดมาตรฐานสำหรับน้ำที่จะระบายลงทางน้ำชลประทาน หรือทางน้ำที่เชื่อมกับทางน้ำชลประทานไว้ดังนี้

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 6.5-8.5
- ค่าความนำไฟฟ้าไม่มากกว่า 2000 ไมโครโมล
- ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดรวมกัน ไม่มากกว่า 1300 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่า บีโอดี ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าของแข็งแขวนลอย ไม่มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าเปอร์มังกาเนท ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าซัลไฟด์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าไซยาไนด์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าน้ำมันและไขมัน ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าฟีนอลและครีโซลส์ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าคลอรีนอิสระ ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่ายาฆ่าแมลงและสารกัมมันตรังสีต้องไม่มีเลย
- สีหรือกลิ่นไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- ค่าน้ำมันหยาบต้องไม่มีเลย
- ค่าธาตุโลหะหนักมีดังนี้
 - สังกะสี ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - โครเมียม ไม่มากกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - อาร์เซนิก ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ทองแดง ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - พรอท ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แคดเมียม ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แบเรียม ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - เซเลเนียม ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ตะกั่ว ไม่มากกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - นิกเกิล ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แมงกานีส ไม่มากกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

บทที่ 3 การบำบัดน้ำเสีย

WASTEWATER TREATMENT

ความหมาย

การบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment) หมายถึง การแยก ทำลายหรือการดำเนินการเปลี่ยนแปลงสภาพของสิ่งปนเปื้อนที่ปนมากับน้ำให้มีปริมาณลดลงหรือให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมเท่าที่เทคโนโลยีจะอำนวย เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเหลืออยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรับน้ำเสียนั้น ^[712]

การแก้ไขปัญหาน้ำเสียมีทั้งมาตรการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คือมีการบำบัด การกำจัดหรือหมุนเวียนของเสียต่าง ๆ จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เกษตรกรรม มาใช้ให้เกิดประโยชน์ การแสวงหาและใช้ทรัพยากรธรรมชาติชนิดใหม่ ๆ ที่มีอยู่ให้คุ้มค่าเพื่อลดการเกิดของเสีย นอกจากนี้การแก้ไขปัญหาน้ำเสียยังมีมาตรการทางกฎหมาย ขอบบังคับมาตรฐานต่าง ๆ ตลอดจนการจัดตั้งองค์กร และการใช้อำนาจทางการบริหารเข้าเสริมในการป้องกันแก้ไข ซึ่งการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมก็เป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันและแก้ไขปัญหาที่ใช้มาตรการทั้งทางด้านกฎหมาย ด้านการบริหาร และด้านเทคโนโลยีร่วมกัน ^[689, 692, 696, 697, 710]

ความจำเป็นที่ต้องมีการบำบัดน้ำเสีย

น้ำทิ้งที่ปล่อยจากแหล่งชุมชน อุตสาหกรรม หรือเกษตรกรรม ในบางครั้งมีการปนเปื้อนของสารที่เป็นอันตราย หรือสารที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำธรรมชาติที่รับน้ำทิ้งเหล่านั้น ดังนั้นหากน้ำที่จะทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณของสารปนเปื้อนสูงเกินไป ควรต้องมีการบำบัดก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำธรรมชาติตามมา นอกจากนี้ในปัจจุบันยังเกิดปัญหาการขาดแคลนแหล่งน้ำธรรมชาติที่สะอาดพอที่จะนำมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค และแหล่งน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบันนี้ก็เกิดปัญหามลภาวะมลพิษต่าง ๆ ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดก่อนนำมาใช้ โดยวัตถุประสงค์ของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

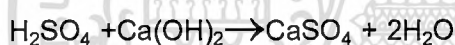
บำบัดน้ำเสียหลัก ๆ คือ เพื่อทำลายตัวการที่ทำให้เกิดโรค เพื่อเปลี่ยนสภาพน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ เพื่อไม่ก่อให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญ ซึ่งความรำคาญที่เกิดขึ้น เช่น กลิ่นของน้ำเสีย หรือสีที่เป็นที่น่ารังเกียจ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะมลพิษ

การบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำที่สะอาดก่อนปล่อยทิ้งเป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ไขปัญหาแม่น้ำลำคลองเน่าเสีย โดยอาศัยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อลดหรือทำลายความสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำได้แก่ ไขมัน น้ำมัน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารพิษ รวมทั้งเชื้อโรคต่าง ๆ ให้หมดไป หรือให้เหลือน้อยที่สุดเมื่อปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำก็จะไม่ทำให้แหล่งน้ำนั้นเน่าเสีย อีกต่อไป

กรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสีย^[112, 691, 721, 722]

1. การทำสะเทิน

การทำสะเทิน (neutralization) วิธีนี้ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นกรดหรือเบสอย่างแรง โดยใช้สารเคมี เช่น ใช้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาสะเทินน้ำเสียที่มีกรดกำมะถัน ดังสมการเคมี



2. การปรับสภาพ

การปรับสภาพ (equalization) วิธีนี้เป็นการเก็บกักน้ำเสียที่มาจากแหล่งที่ต่างกันไว้ในที่หนึ่ง เป็นระยะเวลาหนึ่ง การเก็บกักน้ำเสียรวมกันไว้นี้ จะทำให้น้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างกันมีลักษณะเดียวกัน ทำให้ง่ายต่อการบำบัด

3. การตกตะกอน

การตกตะกอน (sedimentation) วิธีนี้ใช้ในการขจัดพวกตะกอนหนักของสารต่าง ๆ ให้ออกจากน้ำเสีย โดยลดความเร็วของการไหลของน้ำเสียลงจนถึงค่าหนึ่งที่ตะกอนหนักทั้งหลายสามารถแยกตัวออกจากน้ำเสียจมลงสู่ก้นถังแยกตะกอน

4. การรวมตัวและการสมานตะกอน

การรวมตัวและการสมานตะกอน (coagulation and flocculation) coagulation หมายถึง การเข้ามารวมกัน เมื่อเติมสารเคมี (coagulant) ที่เหมาะสมลงในน้ำเสียจะทำให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาเกาะกัน แล้วเกิดสารที่มีลักษณะเหนียว เรียกว่า "ฟล็อก" (floc) ฟล็อกนี้มีคุณสมบัติเอกลักษณะเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ารูปใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิเศษคือ เมื่อถูกพัดพาไปสัมผัสกับตะกอนแขวนลอยทั้งหลาย จะดูดตะกอนเหล่านั้นติดผิวไว้ เมื่อตะกอนเข้ามารวมตัวกับฟล็อกมาก ๆ ก็จะมีน้ำหนักสามารถแยกตัวออกจากน้ำจมลงสู่ก้น ถังแยกตะกอนได้ ทำให้ตะกอนคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกลับมามีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้เร็ว แยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย หรือที่เรียกระบวนการดังกล่าวว่า การสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation)

5. การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี

การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical precipitation) วิธีนี้เป็นการใช้สารเคมีช่วยตกตะกอน ใช้ในการขจัดสารมลพิษบางอย่างที่เป็นสารที่ละลายได้ในน้ำเสีย จึงไม่สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ต้องทำให้เกิดเป็นตะกอนก่อน ตัวอย่างสารที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น สารอนินทรีย์ โลหะหนัก โดย สารเคมีที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการขจัดออกกลายเป็นตะกอน ถ้าตะกอนนั้นหนักพอก็จะแยกออกจากน้ำได้ด้วยน้ำหนักของตะกอนเอง แต่ถ้าตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ก็จะต้องผ่านการรวมและการสมานตะกอนก่อน ตัวอย่างการตกตะกอนทางเคมีเช่น การเติมปูนขาวเพื่อปรับความเข้มข้นจนทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่วไฮดรอกไซด์ หรือแคดเมียมไฮดรอกไซด์ หรือการเติมซัลไฟด์ลงไปเพื่อให้เป็นโลหะซัลไฟด์

ความแตกต่างระหว่าง precipitation และ coagulation ซึ่ง precipitation ต่างกับ coagulation เพราะ precipitation เป็นการเติมสารลงไป น้ำทิ้งเพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งเกิดเป็นตะกอนหนัก ซึ่งจมตัวได้ ส่วน coagulation เป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สิ่งสกปรกที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ ตัวอย่างการกำจัดน้ำทิ้งด้วยการทำให้เกิดตะกอน ได้แก่ การกำจัดสารละลายตะกั่วด้วยปูนขาว ในทางปฏิบัติ precipitation มักถูกเรียกรวม ๆ กันเป็น coagulation เพราะมีหลักการปฏิบัติเหมือนกัน คือ ต้องมีการผสมสารอย่างรวดเร็ว และการกวนช้าเช่นเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการ coagulation^[359]

6. การบำบัดทางชีววิทยา

การบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) วิธีนี้เป็นการขจัดสารอินทรีย์หรือสิ่งปนเปื้อนที่มีในน้ำเสียโดยใช้สิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปเมื่อปล่อยน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงลงในแหล่งน้ำ จะทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายน้ำในแหล่งน้ำนั้นลดต่ำลง และถ้าปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไป อาจทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจนและเกิดการเน่าขึ้นได้ แต่หากไม่มีการทิ้งน้ำเสียลงไปเพิ่มขึ้น จะพบว่าแหล่งน้ำนั้นสามารถปรับสภาพเองได้ โดยมีการทำควมสะอาดมลสาร (pollutant) ต่าง ๆ ให้มีความเข้มข้นน้อยลง และกลับมีออกซิเจนละลาย

- 1.1.3. การตัดย่อย (comminution) การตัดย่อย เป็นการลดขนาดของของแข็งให้มีขนาดเล็กลงและมีขนาดสม่ำเสมอ ถ้าสิ่งสกปรกที่ลอยมากับน้ำเสียเป็นของแข็งที่เน่าเปื่อยได้ เช่น เศษเนื้อ กระดูกหมู กระดูกไก่ เป็นต้น ต้องใช้เครื่องบดตัดให้ละเอียด ก่อนแยกออกด้วยการตกตะกอน
- 1.1.4. การกำจัดกรวดทราย (grit removal) เป็นการกำจัดพวกกรวดทรายโดยใช้รางดักกรวดทรายเพื่อแยกเอาของแข็งที่น้ำหนักมาก เช่นกรวดทราย เศษโลหะ เศษไม้ เศษกระดูก เป็นต้น ออกจากน้ำเสีย โดยทำให้ตกตะกอนอยู่ในรางดักกรวดทราย โดยการลดความเร็วน้ำลง ซึ่งเมื่อตะกอนตกจมแล้วจะไม่มีเพิ่มขนาด ซึ่งถึงดักกรวดทรายมีทั้งแบบไหลแนวราบ และแบบเดิมอากาศ
- 1.1.5. การปรับสภาพการไหล (flow equalization) การปรับสภาพการไหลเป็นการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่ง เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเสียซึ่งไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่องและทำให้ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าคงที่และสม่ำเสมอ
- 1.1.6. การตกตะกอน (sedimentation) การตกตะกอนเป็นการแยกเอาของแข็งที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำ ออกจากน้ำเสียโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก มีวัตถุประสงค์เพื่อตกตะกอนสารอินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เช่นเศษอาหาร ซึ่งช่วยลดค่าแขวนลอยได้ประมาณร้อยละ 60 และหลังจากนั้นจะเข้าสู่ถึงตกตะกอนที่สอง เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านการย่อยสลายภายในถังเดิมอากาศแล้ว
- 1.1.7. การกำจัดไขมันและน้ำมัน เป็นการกำจัดไขมันและน้ำมันซึ่งมักอยู่ในน้ำเสียที่มาจากครัว โรงอาหาร ห้องน้ำ บั๊มน้ำมัน และโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด โดยการกักน้ำเสียไว้ในบ่อตกไขมันในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้ไขมันและไขมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วใช้เครื่องตักหรือกวาดออกจากบ่อ

1.2. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (chemical wastewater treatment) การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยมีวัตถุประสงค์คือ

- เพื่อรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กในน้ำเสียให้มีขนาดโตพอที่จะตกตะกอนได้ง่าย ซึ่งเรียกตะกอนดังกล่าวว่า floc และเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation)
- เพื่อทำให้น้ำของแข็งที่ละลายในน้ำเสียกลายเป็นตะกอน หรือทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การตกตะกอนผลึก (precipitation)

- เพื่อทำการปรับสภาพน้ำเสียให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดด้วยกระบวนการอื่นต่อไปเช่น การทำให้น้ำเสียมีความเป็นกลางก่อนแล้วนำไปบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น
- เพื่อทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ หรือก่อนที่จะบำบัดด้วยวิธีการอื่น ๆ ต่อไป

โดยทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีนี้มักจะทำร่วมกันกับหน่วยบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ตัวอย่างเช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีโดยการใช้สารเคมีเพื่อทำให้อัตกตะกอน หลังจากนั้นจะมีการกรองซึ่งเป็นการบำบัดทางกายภาพเป็นต้น ในปัจจุบันนี้มีการใช้หน่วยบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีหลายอย่างด้วยกัน เช่น

- 1.2.1. การปรับพีเอช เป็นการเติมกรดหรือด่างลงในน้ำเสียเพื่อทำให้น้ำเสียอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนต่อไป (โดยไม่จำเป็นว่าต้องมีค่าเป็นกลางเท่านั้น)
- 1.2.2. การทำให้เป็นกลาง (neutralization) เป็นการปรับสภาพความเป็นกรด - ด่างหรือพีเอชให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียในขั้นอื่นต่อไป โดยเฉพาะกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพซึ่งต้องการน้ำเสียที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 โดยก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องปรับสภาพพีเอชอยู่ในช่วง 5-9 ถ้าพีเอชต่ำจะต้องปรับสภาพด้วยด่าง ด่างที่นิยมนำมาใช้คือ โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (CaO) หรือ แอมโมเนีย (NH₃) เป็นต้น และถ้าน้ำเสียมีค่าพีเอชสูงต้องทำการปรับสภาพพีเอชให้เป็นกลางโดยใช้กรด ซึ่งกรดที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ กรดกำมะถัน (H₂SO₄) กรดเกลือ (HCL) หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)
- 1.2.3. การสมานตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical coagulation หรือ flocculation) เป็นการใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนโดยให้เติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้สารแขวนลอย สี และความขุ่นที่อยู่ในน้ำรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่พร้อมที่จะตกตะกอนได้ง่าย เพื่อเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กให้รวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้น
- 1.2.4. การตกตะกอนเคมี (chemical precipitation) เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อตกตะกอนสารละลายที่เป็นพิษ เช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียม ออกจากน้ำเสีย โดยทั่วไปนิยมใช้การตกผลึกกับน้ำเสียจากโรงงาน
- 1.2.5. การทำลายเชื้อโรค (disinfection) การทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียเป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยใช้สารเคมี โอโซน รังสีอัลตราไวโอเลต คลอรีน โบรมีน ไฮโอไดน ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล แอลกอฮอล์ หรือสาร

อื่น ๆ โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคสู่คน และเพื่อทำลายห่วงโซ่ของเชื้อโรคและการติดเชื้อก่อนที่จะนำเสียจะถูกปล่อยลง แหล่งน้ำธรรมชาติ

1.3. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ (biological wastewater treatment) การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนสภาพของของเสียในน้ำให้อยู่ในสภาพที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นเปลี่ยนให้กลายเป็นแก๊ส เป็นต้น ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทในการช่วยเปลี่ยนสภาพสิ่งสกปรกในน้ำเสียคือ จุลินทรีย์ ได้แก่ พวกแบคทีเรีย โปรโตซัว สาหร่าย รา และโรดิเฟอร์ และจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในการบำบัดน้ำเสีย คือ พวกแบคทีเรีย

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ขบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบถังหมักตะกอน ฯลฯ และขบวนการที่ใช้ ออกซิเจน เช่น ระบบบ่อเติมอากาศ ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย

- การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic wastewater treatment) หมายถึงการบำบัดที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องการแก๊สออกซิเจน ระบบบำบัดชนิดนี้มีข้อดีคือใช้พลังงานน้อย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่น ใช้เป็นแก๊สหุงต้ม ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า มีตะกอนส่วนเกินน้อย สามารถใช้ลดความเข้มข้นจากน้ำเสียของโรงงานย้อมผ้าได้ แต่เป็นระบบที่น้ำที่บำบัดแล้วยังมีค่าความสกปรกที่เกินมาตรฐานไม่สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้ อาจมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากแก๊สที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H₂S)

สมการการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ

สารอินทรีย์ในน้ำเสีย + จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน → แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สมีเทน + จุลินทรีย์ใหม่ + อื่น ๆ

- การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน (aerobic wastewater treatment) หมายถึงการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ออกซิเจนอิสระ เพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นแอมโมเนีย ไนเตรท ซัลเฟต ฟอสเฟต และสร้างเซลล์ใหม่ ระบบนี้มีข้อดีคือสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ไม่มีกลิ่นเหม็น และระบบบำบัดบางชนิดสามารถกำจัดสารอาหารได้ แต่มีข้อเสียคือ สำหรับในหน่วยงานที่มีพื้นที่จำกัด จำเป็นจะต้องทำการเติมอากาศให้กับจุลินทรีย์ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และระบบนี้จะไม่ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

สมการการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน มี 2 แบบคือ

- 1) สารอินทรีย์ในน้ำเสีย + ออกซิเจน + สารอาหาร → แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แอมโมเนีย + จุลินทรีย์ใหม่ + อื่น ๆ
- 2) จุลินทรีย์ + ออกซิเจน → แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + แอมโมเนีย + พลังงาน

ระบบบำบัดแบบใช้อากาศที่นิยมได้แก่ บ่อปรับเสถียร (stabilization pond) ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) ระบบตะกอนเร่งหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (activated sludge, AS) และระบบดัดแปลงต่าง ๆ ของ เอเอส เช่น คลองวนเวียน ระบบเอสบีอาร์ ระบบโปรยกรอง (trickling filter) ระบบบำบัดน้ำเสียฟิล์มตรึง (rotating biological contactor, RBC) บึงประดิษฐ์ (constructed wetland)

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้สำหรับน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย ได้แก่

- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (activated sludge) และระบบดัดแปลงต่าง ๆ ของ เอเอส เช่น คลองวนเวียน ระบบเอสบีอาร์
- ระบบบำบัดน้ำเสียฟิล์มตรึง เช่น ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ
- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อธรรมชาติ เช่น บ่อปรับเสถียร
- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ระบบสระเติมอากาศ
- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ตัวกลางเติมอากาศ

1.3.1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (activated sludge) และระบบดัดแปลงต่าง ๆ

[696, 721]

ระบบเอเอส เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ ที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีองค์ประกอบหลักคือถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหาร และออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศ เพื่อการเจริญเติบโต และเพิ่มปริมาณกลายเป็นสลัดจ์ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น^[696] จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสให้ไหลล้นออกมาไปสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้าย และตะกอนบางส่วนก็จะถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศ เพื่อควบคุมตะกอนจุลินทรีย์ แล้วถูกส่งเข้าถังตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งจะเป็นไปอย่างนี้เรื่อย ๆ จนกว่าน้ำจะสะอาด

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส ยังสามารถแยกย่อยต่าง ๆ ได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับการจัดวาง และรูปแบบของถังเติมอากาศ ที่ใช้ในประเทศไทย เช่น

- ระบบเอสบีอาร์ (sequencing batch reactor, SBR) มีถังเติมอากาศและถังตกตะกอนรวมอยู่ในถังเดียวกัน โดยอาศัยการทำงานเป็นรอบ

- ระบบคลองวนเวียน (oxidation ditch process) น้ำเสียและสลัดจ์จะถูกเก็บกักอยู่ในถังเติมอากาศที่มีลักษณะเป็นคลองวนเวียนวงรี ทำด้วยคอนกรีต มีหลักการทำงานคือ น้ำเสียจะไหลผ่านคลองวนเวียนไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสและตะกอน น้ำใสจะไหลไปยังระบบบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยทิ้ง ส่วนตะกอนกันถึงจะถูกสูบกลับไปยังคลองวนเวียนเพื่อทำการบำบัดใหม่
- 1.3.2. ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (rotating biological contractor, RBC) เป็นระบบให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางทรงกระบอกที่วางอยู่ในถังบำบัด จุลินทรีย์ที่ติดอยู่ที่ตัวกลางจะทำหน้าที่บำบัดโดยใช้ออกซิเจนในอากาศ
- 1.3.3. ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond)
 - บ่อแอนแอโรบิก อินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ผลผลิตที่ได้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สไฮโดรเจน
 - บ่อแอโรบิก อินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจน เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย จึงทำให้ได้แก๊สออกซิเจน
 - บ่อแฟคัลเททีฟ (facultative) หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นแบบใช้ออกซิเจน ที่ผิวด้านบนที่แสงส่องถึง และเป็นแบบไร้ออกซิเจนที่ก้นบ่อ
 - บ่อปม ใช้รองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดต่าง ๆ มาแล้ว
- 1.3.4. ระบบสระเติมอากาศ (aerated lagoon) หลักการทำงานอาศัยจุลินทรีย์เหมือนกับบ่อแฟคัลเททีฟ มีเครื่องเติมอากาศผิวน้ำแบบทุ่นลอยหรือยึดติดกับแท่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับจุลินทรีย์ การเติมอากาศสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การผสมแบบสมบูรณ์ทั่วทั้งบ่อ และการผสมเพียงบางส่วน
- 1.3.5. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (constructed wetlands) เป็นระบบที่จำลองแบบพื้นที่ชุ่มน้ำมาใช้บำบัดน้ำเสียโดยการบดอัดดินให้แน่น เพื่อปลูกพืชจำพวก กก แผลง ธูปฤาษี เป็นต้น สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบน้ำไหลบนผิวดิน และแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน
- 1.3.6. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ตัวกลางเติมอากาศ (contact aeration process) น้ำเสียจะเข้าสู่ถังบรรจุตัวกลางพลาสติกที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่ พร้อมทั้งมีระบบเติมอากาศที่ก้นถังได้ชั้นตัวกลางให้กับแบคทีเรีย เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

2. ประเภทของการบำบัดน้ำเสียแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการบำบัด^[721]

การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการบำบัดได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เอกสารการบำบัดขั้นต้นหรือขั้นปฐมภูมิ (primary treatment/ preliminary treatment) การบำบัดขั้นที่

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 (secondary treatment) และการบำบัดขั้นที่ 3 หรือขั้นสูง (tertiary treatment/advance treatment) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1. การบำบัดขั้นต้นหรือขั้นปฐมภูมิ (primary treatment/ preliminary treatment) วัตถุประสงค์หลักของการบำบัดขั้นต้นคือ กำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียโดยการตกตะกอน หรือการทำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ในขั้นตอนนี้สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำเสีย ได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีได้ประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่สามารถลดปริมาณมลสารที่อยู่ในรูปของสารละลายได้ หน่วยบำบัดที่จัดอยู่ใน การบำบัดขั้นต้นได้แก่ ตะแกรงดักขยะ ถังตกตะกอนทราย ถังตกไขมัน ถังปรับสภาพน้ำเสีย สถานีสูบน้ำระดับน้ำเสีย และถังตกตะกอนแรก เป็นต้น

2.2. การบำบัดขั้นที่ 2 (secondary treatment) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดค่าบีโอดีที่อยู่ในรูปของสารละลาย (soluble BOD₅) และค่าบีโอดีที่อยู่ในรูปสารแขวนลอย (suspended BOD₅) ในการบำบัดขั้นที่ 2 นิยมใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ และมีประสิทธิภาพในการ ลดค่า BOD₅ และของแข็งแขวนลอยประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ และถ้ามีการเติมอากาศที่มากพอจะสามารถทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification process) ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ไม่สามารถลดปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโลหะหนักได้ ยกเว้นระบบบำบัดทางชีวภาพ บางระบบที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ เช่นระบบ SBR ระบบคลองเวียน (oxidation pond) เป็นต้น

2.3. การบำบัดขั้นที่ 3 หรือขั้นสูง (tertiary treatment/advance treatment) เป็น ขั้นตอนที่ต้องการลดปริมาณสารอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส หรือเพื่อกำจัดสิ่ง สกปรกบางอย่างที่ยังเหลืออยู่ เช่น โลหะหนัก หรือเชื้อโรคบางชนิด รวมถึงการปรับปรุง คุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น จนสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ (reuse) หรือผ่านค่ามาตรฐาน ก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะเช่น การลดความเข้มข้นโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) ลดความเข้มข้นของโลหะหนักบางชนิดโดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

ปัญหาด้านมลภาวะทางน้ำที่รุนแรงมากคือปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษหรือโลหะหนัก ในน้ำเสีย ซึ่งพบรายงานความรุนแรงของพิษจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำชุมชน มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เช่นปัญหาการเกิดการปนเปื้อนของปรอท โดย เมื่อปี พ.ศ. 2496 ผู้คนที่อาศัยอยู่ที่เมืองมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น ได้กินปลาที่จับมาจากอ่าวมินามาตะซึ่งปนเปื้อน สารปรอททำให้ผู้ป่วยจำนวนมากมีอาการทางระบบประสาทส่วนกลาง และเด็ก ๆ มีอาการทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การบำบัดน้ำเสีย

สมอง หรือเรียกว่า โรคมินามาตะ และยังพบปัญหาผู้ที่ได้รับพิษจากแคดเมียม ซึ่งทำให้มีอาการปวดกระดูก กระดูกเปราะ บิดเบี้ยว ผิดรูปและเจ็บปวดทรมาน หรือเรียกว่า โรคอิไต-อิไต

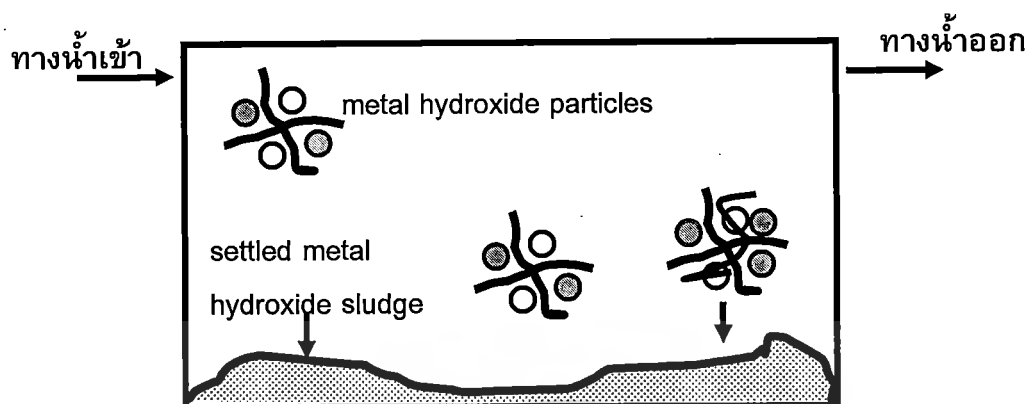
ในประเทศไทยพบว่ามีรายงานถึงการปนเปื้อนของตะกั่วในปริมาณสูงที่ลำนําคีรี จังหวัดกาญจนบุรี โดยได้มีการทำเหมืองตะกั่วในบริเวณดังกล่าวมาประมาณ 20 ปี ซึ่งในปัจจุบัน พ.ศ. 2551 ยังคงพบว่ามีปริมาณตะกั่วที่สะสมในดินตะกอนในแหล่งน้ำดังกล่าวสูงกว่ามาตรฐานมาก ซึ่งมีผลทำให้ประชาชนที่ใช้ น้ำบริเวณดังกล่าวเกิดการเจ็บป่วย ส่วนเด็กเกิดการพัฒนาของสมองช้าลง และการปนเปื้อนของแคดเมียมในข้าวที่จังหวัดตาก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการนำน้ำและดินที่มีแคดเมียมปนเปื้อนมาใช้ในการปลูกข้าว ซึ่งพบรายงานปัญหาความรุนแรงของการปนเปื้อนดังกล่าวในปี พ.ศ. 2545 ^[299, 301]

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาที่อันตรายมากเพราะโลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีการสะสมอยู่ในดินตะกอนหรือสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ดังนั้นการหลีกเลี่ยงปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำที่ดีที่สุดคือการควบคุมปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยการบำบัดน้ำเสีย หรือการลดปริมาณโลหะหนักให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยน้ำทิ้ง ซึ่งวิธีในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมีหลายวิธี ซึ่งอาจมีการใช้แตกต่างกันไปตามประเภทของน้ำเสียและชนิดของโลหะหนัก ^[112, 403, 445, 483, 593]

วิธีการบำบัดหรือ เทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกำเนิดของโลหะหนักมาจากแหล่งใด เทคนิคการบำบัดสำหรับแหล่งกำเนิดที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ปล่อยออกมาด้วย สำหรับวิธีการบำบัดโดยดั้งเดิมมักเกี่ยวข้องกับการตกตะกอนและหลังจากนั้นอาจมีการกรองตะกอนตามมา ซึ่งค่าใช้จ่ายในการบำบัดแบบนี้มีค่าใช้จ่ายประมาณ 1-2 ดอลลาร์ ต่อน้ำเสีย 1000 แกลลอน วิธีที่ใช้การบำบัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียเช่น

1. วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) อาจมีการตกตะกอนของโลหะหนักด้วยคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ปูนขาว เกลือของเหล็ก (iron salts) หรือสารอินทรีย์ประเภทอื่น ๆ ซึ่งการที่จะตกตะกอนโลหะหนักได้มากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีที่เติมลงในน้ำเสียและขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำเสีย ลักษณะการทำงานของระบบคือปล่อยให้น้ำเสียไหลเข้ามา (influent) ในปอดตกตะกอน เติมสารเคมีลงในน้ำเสียเพื่อให้โลหะหนักตกตะกอนและปล่อยน้ำที่ผ่านการตกตะกอนโลหะหนักแล้วออกจากปอด (effluent) แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือมีปริมาณของสลัดจ์ (sludge) ที่มีพิษของโลหะหนักปนอยู่เป็นของเสียเกิดขึ้นในระบบ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 การตกตะกอนของโลหะหนักโดยใช้ hydroxide
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

2. การสมานตะกอนโดยใช้สารเคมี

การสมานตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical coagulation) เป็นการใช้สารเคมีช่วยตกตะกอนโดยให้เติมสารเคมี (coagulant) ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่พร้อมที่จะตกตะกอนได้ง่าย (ภาพที่ 2) ปกติแล้วโลหะหนักที่ปรากฏในแหล่งน้ำสามารถปรากฏได้ทั้งในรูปอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของโลหะหนักเหล่านั้น สำหรับการบำบัดโลหะหนักที่อยู่ในรูปอนินทรีย์ต้องปรับ พีเอชให้อยู่ในช่วง 8-9 และตามด้วยการตกตะกอนด้วยปูน ขบวนการเหล่านี้สามารถทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วยการเติม ferrous sulfate ซึ่งจะไปทำหน้าที่เป็นตัวช่วยตกตะกอน (coagulant) น้ำที่ถูกบำบัดแล้วจะมีตะกอนของโลหะหนักตกอยู่ด้านล่าง ซึ่งต้องมีการรวบรวมตะกอนเหล่านี้โดยใช้แผ่นกรองและนำไปกำจัดทิ้ง ซึ่งบางทีตะกอนเหล่านี้สามารถนำกลับไปล้างและนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับ organic source หรือ แหล่งโลหะหนักที่เป็นสารอินทรีย์ จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนรูปให้ไปอยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ก่อนแล้วทำการกำจัด

การสมานตะกอนโดยใช้สารเคมี ด้วยการ ใช้ ferric sulfate จะใช้ที่พีเอช 6 จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี เหมือนการใช้ปูนในการตกตะกอน สำหรับน้ำเสียที่มีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ปนอยู่ การใช้การแลกเปลี่ยนไอออนจะให้ผลในการบำบัดได้ดี

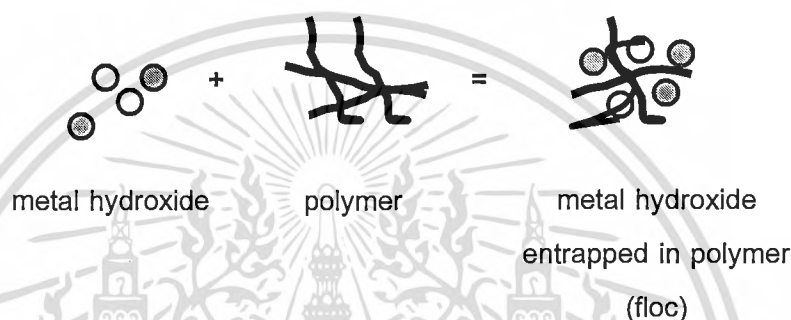
3. การแลกเปลี่ยนไอออน

ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำจะถูกจับไว้บนแผ่นเรซิน ด้วยการแลกเปลี่ยนกับไอออนบนแผ่นเรซิน ด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic forces) ซึ่งวิธีนี้จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นไอออนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การบำบัดน้ำเสีย

ไอออน (ion exchange) ของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำกับไอออนบนแผ่นเรซินอย่างรวดเร็ว โดยจะมีการแลกเปลี่ยนด้วยประจุบวก เช่น Na^+ , Ca^{2+} , H^+ แผ่นเรซินนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกาะบนแผ่นเรซินด้วยสารละลายกรดหรือด่าง ด้วยการล้าง และโลหะหนักที่ล้างออกมาก็ถูกทำให้เข้มข้นอยู่ในปริมาณน้อย ๆ หากเป็นโลหะหนักที่มีค่าก็สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือมีราคาสูง และแลกเปลี่ยนไอออนได้เพียงบางประเภทเท่านั้น ไม่สามารถระบุชนิดที่เฉพาะเจาะจงของไอออนที่ต้องการกำจัดได้



ภาพที่ 2 การเกิดการสมานตะกอนของโลหะโดยการเติมสาร coagulant (polymer)
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

4. การดูดซับโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์

โลหะหนักหลายชนิดสามารถถูกดูดซับด้วยแผ่นคาร์บอนกัมมันต์ (activate carbon adsorption) ส่วนใหญ่จะถูกจับในรูปของการเกิดสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน หรือจับตัวกับสารอินทรีย์ซึ่ง ประสิทธิภาพในการจับหรือการดูดซับของแผ่นคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นด้วยถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

5. ออสโมซิสย้อนกลับ

ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เป็นการแยกโลหะหนักโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) ใช้ในกระบวนการ reverse osmosis โดยทำให้โลหะหนักที่ละลายในน้ำเสียมีค่ามากกว่าแรงดัน ออสโมติก โดยใช้แรงดันที่มากกว่า 40 บรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ด้านหนึ่งของเยื่อเลือกผ่านมีโลหะหนักหนาแน่น แต่อีกด้านไม่มีโลหะหนัก จะทำให้โลหะหนักแพร่ผ่านเข้ามาอีกด้านหนึ่งได้ คือสามารถกำจัดโลหะหนักให้ไปอยู่ด้านที่ต้องการได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือมีค่าใช้จ่ายสูง

6. การระเหยน้ำ

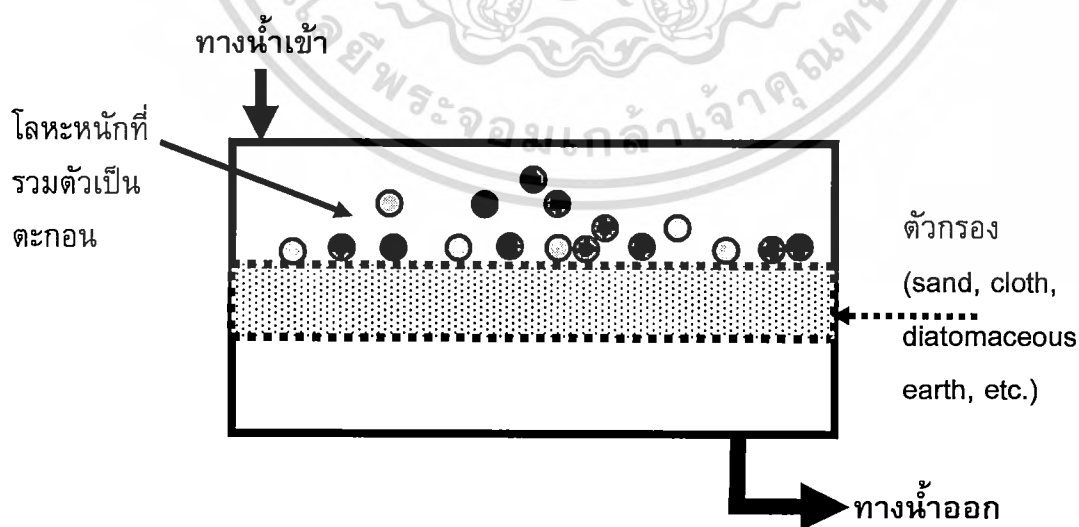
การระเหยน้ำ (evaporation) เป็นการลดปริมาณน้ำเสียโดยการทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอจนได้โลหะหนักที่เข้มข้นอยู่ในน้ำเสียปริมาณน้อย

7. อิเลคโตรไดอะไลซิส

อิเลคโตรไดอะไลซิส (electrodialysis) เป็นการแยกโลหะหนักโดยใช้เยื่อเลือกผ่านที่สามารถเลือกประเภทของไอออนในการผ่านผนังเยื่อเลือกผ่านได้ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดสองอันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ ข้อเสียคือการเกิดการรวมตัวของโลหะหนักกับไฮดรอกไซด์ หรือการตกตะกอนของโลหะหนักกับไฮดรอกไซด์จะทำให้แผ่นเยื่อเลือกผ่านอุดตัน

8. การกรอง

การกรอง (filtration) มีทั้งการกรองแบบหยาบ คือใช้ตัวกรองเช่นทรายหรือ diatomaceous earth (ทำจากเปลือกของไดอะตอมที่ทับถมกันเป็นเวลานาน) ซึ่งการกรองแบบนี้ใช้กรองโลหะหนักที่เกิดเป็นตะกอนมีขนาดค่อนข้างใหญ่เช่นโลหะหนักที่จับกับไฮดรอกไซด์ (ภาพที่ 3) ส่วนการกรองอีกแบบคือการกรองแบบละเอียดหรือเรียกว่า การกรองแบบ ultrafiltration วิธีนี้มีการทำงานโดยใช้ค่าแรงดันผ่านแผ่นกรอง โดยให้โลหะหนักติดอยู่ที่ช่องบนแผ่นกรองนั้น ข้อเสียของการกรองคือจะทำให้เกิดสลัดจ์ที่เป็นพิษ



ภาพที่ 3 การกรองเพื่อกำจัดโลหะหนัก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าารรูปแบบใด ๆ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 3 การบำบัดน้ำเสีย

9. การบำบัดทางชีวภาพ

การบำบัดทางชีวภาพ (bioremediation/ bioremoval/biosorption) เป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ใช้สิ่งมีชีวิต หรือวัสดุจากสิ่งมีชีวิต (biological material) ในการรวบรวมหรือกำจัดน้ำโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยอาจใช้วิธีทางชีวภาพหรือทางเคมี คืออาจใช้การทำงานของเซลล์สิ่งมีชีวิต ใช้สารที่สร้างจากเซลล์สิ่งมีชีวิต หรือใช้ลักษณะทางกายภาพของเซลล์สิ่งมีชีวิต ในการกำจัดโลหะหนักพวกนี้ bioremoval เหมาะกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณเข้มข้นต่ำ โดยเฉพาะความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้พืชชั้นสูง (plant) กำจัดโลหะหนักอาจเรียกว่าเป็นวิธี phytoremediation ซึ่งเน้นการใช้พืชในการกำจัดโลหะหนักโดยตรง ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ระยะเวลานานในการกำจัดโลหะหนักและใช้เวลานานในการปลูกพืชเพื่อนำมาใช้ หรือการนำพืชที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่นั้นทำได้ยาก^[195, 394]

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนด้วยระบบบำบัดแบบชีวภาพ

วิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่นิยมในอดีตมีหลายวิธี เช่น การใช้สารเคมีตกตะกอนและนำตะกอนไปฝังกลบ การแลกเปลี่ยนไอออน การใช้คาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วราคาค่อนข้างสูง^[632] ดังนั้นในปัจจุบันวิธีหนึ่งที่มีความสนใจมากคือการบำบัดโลหะหนักต่าง ๆ โดยวิธีบำบัดทางชีวภาพหรือการใช้สิ่งมีชีวิต (biosorption/bioremediation/bioremoval) ซึ่งดีกว่าวิธีที่ใช้ในอดีต โดยไม่เกิดสัณฐานที่เป็นพิษ สามารถกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำได้

biosorption เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยรวบรวมหรือสะสมโลหะหนักหรือตัวถูกดูดซับ ให้มาเข้มข้นมากอยู่บนเซลล์สิ่งมีชีวิตหรือตัวดูดซับ โดยในระบบบำบัดแบบ biosorption นั้น สิ่งมีชีวิตจะเกิดขบวนการดูดซับโลหะหนักไว้ที่เซลล์ได้ โดยผ่านกลไกการทำงานของเซลล์หรือผ่านทางขบวนการเคมีกายภาพ^[130]

1. ประโยชน์ของวิธีบำบัดทางชีวภาพที่เหนือกว่าวิธีบำบัดในอดีต

เทคโนโลยีในการกำจัดโลหะหนักที่ใช้กันในอดีตเช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน การใช้คาร์บอนกัมมันต์ การระเหยกลายเป็นไอ ส่วนใหญ่มีราคาแพง ค่อนข้างยากในการนำมาปฏิบัติจริงหากความเข้มข้นของโลหะหนักมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนขบวนการบำบัดทางชีวภาพ biosorption นั้นเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ซึ่งมีสิ่งที่เหมาะสมกว่าวิธีในอดีตคือศักยภาพและประสิทธิภาพสูง ราคาที่ต่ำ ใช้สารเคมีหรือเกิดสัณฐานต่ำ ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และสามารถนำโลหะที่มีราคาแพง กลับมาใช้ใหม่ได้^[431]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามผู้จัดทำหนังสือฉบับนี้ไม่มีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพบว่า biosorption มีข้อดีเหนือวิธีการตกตะกอนคือจะไม่มีสารพิษในส่วนสลัดจ์ตกค้าง และตัวดูดซับสามารถปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงของพีเอช การเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักที่เปลี่ยนไปได้ มีข้อดีกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนหรือออสโมซิสย้อนกลับ คือแม้ในน้ำเสียมีไอออนชนิดอื่นปน มีของแข็งต่าง ๆ ปนเปื้อน หรือมีสารประกอบอินทรีย์ หรือโลหะหนักชนิดอื่นปนก็ไม่มีผลกระทบต่อ biosorption โดยสิ่งมีชีวิตยังคงสามารถกำจัดโลหะหนักและไอออนชนิดอื่น ๆ ได้^[69] หรือในบางครั้งการใช้วิธีบำบัดทางเคมีไม่สามารถกำจัดโลหะหนักได้หมด หรือเหลือเกินมาตรฐานของการบำบัดน้ำเสีย ก็สามารถใช้วิธี biosorption ในขั้นตอนสุดท้าย จะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพและผลที่ดีขึ้น

โดยได้มีรายงานว่าเทคโนโลยี biosorption มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าเทคโนโลยีในอดีต โดยพบว่า biosorption ที่ใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนักมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้คาร์บอนกัมมันต์ หรือใช้แผ่นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งจากการศึกษานั้นพบว่า การที่สาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงกว่า เนื่องมาจากสาหร่ายมีน้ำตาลกรด (acidic sugar) อยู่มาก เช่นอยู่ในรูปของน้ำตาล glucuronic และ mannuronic ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและมีประสิทธิภาพในการเลือกจับกับโลหะหนักได้ดีกว่าพวกคาร์บอนกัมมันต์ หรือแผ่นเรซิน

การเกิด biosorption หรือการดูดซับโลหะหนักของสิ่งมีชีวิต จะมีสิ่งที่เกี่ยวข้องคือของแข็ง ซึ่งเป็นตัวดูดซับ (sorbent or biosorbent) และของเหลวหรือตัวทำละลาย (solvent) ซึ่งปกติคือน้ำ โดยมีไอออนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (sorbate) ละลายอยู่ ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับ จนถึงจุดสมดุล (equilibrium) หรือจุดอิ่มตัวของตัวดูดซับ การประเมินความสามารถของตัวดูดซับทำได้โดยการเปรียบเทียบปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ กับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

2. วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ หรือสิ่งมีชีวิตที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (biosorbent material) นั้นสามารถนำมาใช้ได้ในรูปที่ยังมีชีวิตและรูปที่ตายแล้ว ตัวดูดซับบางชนิดสามารถดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด ไม่เฉพาะเจาะจง แต่ตัวดูดซับบางประเภทเลือกดูดซับโลหะหนักได้บางชนิดเท่านั้น การเลือกใช้สิ่งมีชีวิตอาจเลือกใช้สิ่งที่หาได้ง่ายโดยทั่วไป หรือเลือกโดยคัดแยกสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตที่เฉพาะเจาะจงจากแหล่งน้ำเสียที่ต้องการบำบัด หรือบางครั้งอาจทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการผ่านขบวนการบางประเภทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ สิ่งมีชีวิตหลายชนิดที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักเช่น พืชหรือรากของพืชชั้นสูง ยีสต์ แบคทีเรีย สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดใหญ่ มอส หน่วยาทะเล พืชน้ำขนาดใหญ่^[657, 733, 736]

3. เกณฑ์การเลือกใช้วิธีบำบัดแบบชีวภาพในการกำจัดโลหะหนัก

การตัดสินใจเลือกใช้วิธี biosorption ในการกำจัดโลหะหนัก มักมีเกณฑ์หลัก ๆ อยู่ 4 ประการคือ เป็น 1) โลหะหนักนั้นเป็นชนิดที่มีพิษ 2) เป็นโลหะที่มีความสำคัญ 3) เป็นโลหะที่มีค่า ราคาแพง 4) เป็น นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) ซึ่งหากพิจารณาทางด้านปัญหาสิ่งแวดล้อม จะเน้นให้ความสำคัญกับการกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษและนิวไคลด์กัมมันตรังสี

นอกจากเกณฑ์ด้านความเป็นพิษแล้ว บางครั้งการเลือกใช้วิธีดูดซับชีวภาพอาจเป็นเพราะการต้องการกำจัดโลหะหนักบางชนิดที่เฉพาะเจาะจงจากน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกันอยู่ ซึ่งวิธีนี้จะต้องมีการศึกษาหาตัวดูดซับที่เหมาะสมกับโลหะชนิดนั้น ๆ ก่อน

ส่วนใหญ่การเลือกกำจัดโลหะหนักโดยวิธี biosorption จะทำในโลหะหนักบางชนิดเท่านั้น โดยจะเน้นชนิดที่มีความเป็นพิษมากเมื่ออยู่ในแหล่งน้ำ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม อาร์เซนิก เซเลเนียม และเน้นชนิดที่มีราคาแพงโดยนอกจากจะเน้นการกำจัดจากน้ำเสียแล้ว ยังเน้นการนำโลหะหนักที่มีราคาแพงเหล่านี้กลับออกมาจากตัวดูดซับเพื่อนำมาใช้ใหม่อีกด้วย

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก (ตะกั่ว) ปนเปื้อน^[723]

ตัวอย่างของการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักประเภทตะกั่วปนเปื้อน ซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ โดยได้มีวิธีการกำจัดตะกั่วหลัก ๆ ที่นิยมใช้มี 3 วิธีคือ

1. การแลกเปลี่ยนไอออน

เป็นวิธีการกำจัดตะกั่วโดยใช้เรซิน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับไอออนตะกั่ว ซึ่งไอออนของเรซินที่ปล่อยออกมาเป็นไอออนที่ไม่มีพิษ ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือโซเดียมไอออน (Na^+) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



จากการศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าใช้ได้กับน้ำทิ้งที่มีตะกั่วเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ๆ และเรซินที่ใช้ส่วนมากเป็น phosphoric acid resin มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.0-5.2 ตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังจากผ่านการจัดด้วยวิธีนี้แล้วจะมีตะกั่วเหลืออยู่ประมาณ 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าใช้จ่ายในการกำจัดด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสูง เพราะว่าเรซินมีราคาแพง เรซินที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการล้างด้วยกรด แต่ประสิทธิภาพของเรซินจะค่อย ๆ ลดลงจนใช้ไม่ได้ในที่สุด

2. การดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์

วิธีนี้ใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นสารดูดซับตะกั่ว ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถดูดซับไอออนโลหะและสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายชนิดรวมทั้งตะกั่วด้วย โดยพบว่าคาร์บอนกัมมันต์สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 และสามารถใช้น้ำทิ้งที่มีปริมาณตะกั่วเข้มข้นสูงได้ แต่คาร์บอนกัมมันต์มีราคาแพง ถึงแม้จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกาะอยู่ก่อน แต่ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วโดยใช้วิธีนี้ก็ยังคงสูง และประสิทธิภาพของคาร์บอนกัมมันต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่จะลดลงจนใช้ไม่ได้ในที่สุด

3. การตกตะกอนทางเคมี

เป็นวิธีที่นิยมที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบัน การกำจัดตะกั่วด้วยการตกตะกอนทางเคมี ในระบบบำบัดน้ำเสียจะมีสองปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วคือการละลายของตะกั่วและการตกตะกอนของตะกั่ว ในการกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ โดยการตกตะกอนของตะกั่วเป็นเกลือตะกั่วที่ละลายน้ำได้น้อย การละลายของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อย มีค่าคงที่การละลายใช้สัญลักษณ์เป็น K_{sp} เป็นค่าคงที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการละลายน้ำได้มากหรือน้อยเพียงใด ค่า K_{sp} เท่ากับผลคูณของความเข้มข้นของไอออนบวก กับไอออนลบ ที่มีหน่วยเป็นโมลต่อลิตร ขององค์ประกอบของเกลือนั้น ๆ เช่น เกลือ A_xB_y จะมีค่า $K_{sp} = [A^{+x}]^x[B^{-y}]^y$ ซึ่งค่า K_{sp} เป็นค่าคงที่สำหรับเกลือแต่ละชนิด ถ้าเพิ่มปริมาณ A เข้าไปในสารละลาย B จะลดลง แต่ถ้าเพิ่ม B เข้าไปในสารละลาย A ก็ลดลงเช่นกัน

ค่า K_{sp} ของเกลือตะกั่วที่ละลายน้ำได้น้อยมีค่าดังนี้

ตะกั่วคาร์บอเนต lead carbonate ($PbCO_3$)	มีค่า $K_{sp} = 3.3 \times 10^{-14}$
ตะกั่วโครเมต lead chromate ($PbCrO_4$)	มีค่า $K_{sp} = 1.8 \times 10^{-14}$
ตะกั่วไฮดรอกไซด์ lead hydroxide ($Pb(OH)_2$)	มีค่า $K_{sp} = 2.5 \times 10^{-16}$
ตะกั่วออกซาเลต lead oxalate (PbC_2O_4)	มีค่า $K_{sp} = 4.8 \times 10^{-10}$
ตะกั่วไอโอไดต์ lead iodide (PbI_2)	มีค่า $K_{sp} = 7.1 \times 10^{-9}$
ตะกั่วซัลเฟต lead sulfate ($PbSO_4$)	มีค่า $K_{sp} = 1.6 \times 10^{-8}$
ตะกั่วซัลไฟด์ lead sulfide (PbS)	มีค่า $K_{sp} = 7 \times 10^{-28}$

จากข้อมูลการละลายของเกลือตะกั่วที่ละลายน้ำได้น้อย จะทำให้สามารถหาสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อมาตกตะกอนกับตะกั่ว โดยเลือกเกลือที่มีการละลายได้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถแยกตะกอนตะกั่วออกมาจากน้ำทิ้งได้

การตกตะกอนในรูปของตะกั่วคาร์บอเนตโดยใช้ Na_2CO_3 พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนคือช่วงพีเอช 8.0-10.0 และถ้านำเอาสารเคมีที่ช่วยรวมตัวของตะกอนให้เกิดเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะกอนใหญ่ (coagulation) ใส่เข้าไปเพื่อช่วยทำงาน พบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีขึ้น

การใช้คาร์บอนเนตในการกำจัดตะกั่ว ถ้าค่าพีเอชเป็นกลาง ตะกั่วจะตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกั่วคาร์บอนเนต มากกว่าตะกั่วไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนเนตที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ที่ประมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีค่าพีเอชที่ประมาณ 7.5-9.0

สำหรับการตกตะกอนของตะกั่วด้วยโดโลไมท์เพื่อให้ได้ตะกอนของตะกั่วในรูปตะกั่วคาร์บอนเนต ออกมา ซึ่งวิธีการคือทำการกรองน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนให้ผ่าน dolomite bed หรือผ่านชั้นของโดโลไมท์ซึ่งจะเกิดการทำปฏิกิริยาและเกิดการตกตะกอนทำให้ตะกั่วที่ละลายอยู่ตกตะกอน จากนั้นนำแผ่น dolomite มาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดตะกั่วคาร์บอนเนตหรือตะกั่วที่ตกตะกอนออกและนำแผ่น dolomite กลับไปใช้ใหม่

การกำจัดตะกั่วโดยใช้ Na_2S โดยปรับพีเอชของน้ำทิ้งให้เป็นกลางก่อนไปทางต่างเล็กน้อย PbS จะละลายน้ำได้น้อยมากเกิดเป็นตะกอนและแยกออกจากน้ำเสียได้

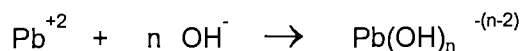
ส่วน PbSO_4 เป็นตะกอนตะกั่วที่ละลายน้ำได้น้อยแต่เทียบกับตะกอนตะกั่วอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้ว PbSO_4 ละลายน้ำได้มากกว่าเพราะค่า K_{sp} สูงสุด จึงไม่นิยมกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนตะกั่วในรูป PbSO_4

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของไอออนตะกั่วซึ่งเป็นไอออนบวกกับไอออนลบทำให้เกิดตะกอนที่ละลายน้ำได้น้อย มีดังนี้

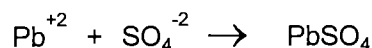
การตกตะกอนตะกั่วในรูป Pb(OH)_2 ต้องใช้ OH^- ซึ่งเป็นไอออนลบที่มาจาก NaOH , KOH หรือ Ca(OH)_2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



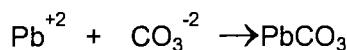
การตกตะกอน Pb(OH)_2 จะต้องมีความเข้มข้น OH^- มากเพียงพอซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมช่วงหนึ่ง แต่ถ้าเป็นความเข้มข้นของ OH^- ต่ำเกินไป Pb(OH)_2 จะไม่เกิด เพราะผลคูณของความเข้มข้นของ Pb^{+2} จะเกิดปฏิกิริยากับ OH^- ยังต่ำกว่าค่า K_{sp} แต่ถ้าความเข้มข้นของ OH^- สูงเกินไป Pb^{+2} จะเกิดปฏิกิริยากับ OH^- เป็น polyhydroxide complex ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี ดังปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



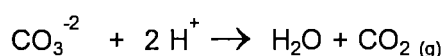
การตกตะกอนตะกั่วในรูป PbSO_4 ต้องใช้ SO_4^{-2} ซึ่งเป็นไอออนลบที่มาจาก Na_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ หรือ K_2SO_4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



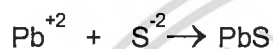
การตกตะกอนตะกั่วในรูป PbCO_3 ต้องใช้ CO_3^{2-} ซึ่งเป็นไอออนมาจาก Na_2CO_3 หรือ K_2CO_3 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



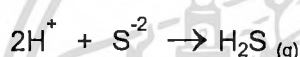
การตกตะกอน PbCO_3 น้ำทิ้งที่ใช้ต้องปรับให้อยู่ในสภาพของด่างทั้งนี้เพราะว่า CO_3^{2-} จะเกิดปฏิกิริยากับกรดได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทำให้สูญเสีย CO_3^{2-} จำนวนมาก ซึ่งเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



การตกตะกอนในรูปของ PbS ต้องใช้ S^{2-} ซึ่งเป็นไอออนลบที่มาจาก N_2S หรือ FeS ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



การตกตะกอน PbS น้ำทิ้งที่ใช้ต้องปรับให้อยู่ในสภาพเป็นด่างทั้งนี้เพราะว่า S^{2-} จะเกิดปฏิกิริยากับกรดได้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ซึ่งวิธีที่นิยมใช้เหล่านี้จะเหมาะสมกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนในความเข้มข้นสูง ซึ่งวิธีเหล่านี้หากโลหะหนักมีความเข้มข้นต่ำจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีปริมาณมาก และหากมีการปนเปื้อนของไอออนชนิดอื่นจะทำให้แผ่นเรซินหรือคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง

ดังนั้นเมื่อผ่านการกำจัดโลหะหนักที่เข้มข้นสูงด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีแล้ว หากทำการกำจัดโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียที่ระดับความเข้มข้นต่ำ แต่ยังสูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน ด้วยวิธี biosorption จะทำให้สามารถลดโลหะหนักลงจนถึงเกณฑ์มาตรฐานหรือต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในการปล่อยน้ำเสียได้

บทที่ 4 โลหะหนัก

HEAVY METALS

บทนำ

การเพิ่มของประชากร การขยายตัวและการพัฒนากิจกรรมทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เป็นปัจจัยทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น สาเหตุของความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำมาจากการปนเปื้อนของของเสีย ซึ่งของเสียนี้มีที่มาจาก การเกิดของเสียขึ้นเองตามกระบวนการตามธรรมชาติ หรือจากวัตถุที่ปล่อยทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากของเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการผลิต รวมทั้งสารเคมีที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ซึ่งของเสียที่ปนเปื้อนนี้จะพบได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ กากตะกอน หรือโลหะหนัก

โลหะหนักเป็นวัตถุที่นำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย ใช้ในการเกษตรโดยเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ใช้ในทางการแพทย์โดยเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง ซึ่งน้ำทิ้งจากกิจกรรมที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีส่วนผสมของโลหะหนัก หรือน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตวัสดุเหล่านี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ โดยน้ำเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพเช่นกัน

การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นอันตรายมากเพราะโลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนหรือสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ สาหร่าย พืชน้ำ สัตว์หน้าดิน หอย และปลา นอกจากนี้ยังสะสมในดินหรือตะกอนที่อยู่ในน้ำ ดังนั้นการปนเปื้อนของโลหะหนักในพืชหรือสัตว์น้ำที่มนุษย์นำมาบริโภคจึงเป็นสิ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากแหล่งน้ำที่สัตว์น้ำนั้นอาศัยอยู่ได้รับการปนเปื้อนจากโลหะหนัก^[60, 97, 563]

โลหะหนักเหล่านี้สามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้หลายทาง เช่นจากสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ อากาศ) โดยปนเปื้อนในดิน ในน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน โลหะหนักที่ตกตะกอนในทะเลหรือในโคลน โลหะหนักที่ระเหยจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่บรรยากาศ จากโลหะหนักที่ปนเปื้อนในอาหาร เครื่องสำอาง หรือจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือน พิษของโลหะหนักเหล่านี้เมื่อสะสมอยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกายจนถึงระดับหนึ่งที่เป็นอันตรายจึงจะแสดงอาการออกมา เมื่อนั้นผู้ป่วยจึงทราบว่าตนเองได้รับพิษของโลหะหนักแล้ว

โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง แร่ธาตุ (element) ที่มีน้ำหนักอะตอมสูง โดยมีการกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravities) และความหนาแน่น (density) ที่แตกต่างกันหลายค่าในการกำหนดค่าจำกัดความของโลหะหนัก เช่น ^[627, 628, 690]

- มีความถ่วงจำเพาะ มากกว่า 4 ^[162, 648]
- มีความถ่วงจำเพาะ มากกว่าหรือเท่ากับ 5 ^[521]
- มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ^[58, 127, 454, 489]
- มีความหนาแน่นมากกว่า 6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ^[95, 628]

ซึ่งส่วนใหญ่โลหะหนักมีตำแหน่งอยู่ทางด้านล่างของตารางธาตุ และส่วนใหญ่เป็นแร่ธาตุที่มีพิษแม้ความเข้มข้นต่ำ ตัวอย่างของกลุ่มแร่ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 เช่น ทองแดง (Cu), นิกเกิล (Ni), สังกะสี (Zn), โครเมียม (Cr), แคดเมียม (Cd), ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb), อาร์เซนิก (As), เซเลเนียม (Se), โคบอลต์ (Co), และเหล็ก (Fe) เป็นต้น โดยปกติมีอยู่ในธรรมชาติ แต่มีปริมาณที่เหมาะสม

ในชีวิตประจำวัน มนุษย์มีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางการบริโภคอาหาร หรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้วัตถุที่เป็นโลหะหนัก และขาดการบำบัดน้ำเสียที่ถูกวิธี หรือหลีกเลี่ยงการบำบัด และปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณที่ได้รับเข้าไป ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียต้องการโคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส โมลิบดีนัม แวนาเดียม และสังกะสี ในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต แต่หากมีปริมาณโลหะที่มากเกินไปจะส่งผลที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย ทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย และถูกจัดให้ขึ้นบัญชีดำ (black list) เนื่องจากมีพิษร้ายแรงมากต่อมนุษย์ ^[584]

โลหะหนักเหล่านี้เมื่อสะสมอยู่ในร่างกายจนถึงระดับหนึ่งจะแสดงอาการออกมาให้เห็น ซึ่งผลของความเป็นพิษของโลหะหนักต่อกลไกระดับเซลล์ คือทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ เป็นตัวการทำให้เกิดมะเร็ง เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม ทำความเสียหายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรมขั้น ดั้งนั้นจึงไม่ควรบริโภคสิ่งอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการควบคุมปริมาณของโลหะหนักที่พบทั้งในอาหาร และน้ำดื่ม เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค^[333] ตัวอย่างการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในน้ำดื่ม ว่าต้องมีไม่เกินปริมาณเท่าใดจึงจะยอมรับให้เป็นน้ำดื่มได้ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่ามาตรฐานโลหะหนักในน้ำดื่ม (U.S. EPA)

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ปรอท	0.002
แคดเมียม	0.005
นิกเกิล	0.01
แมงกานีส	0.05
ตะกั่ว	0.05
โครเมียม	0.1
ทองแดง	1
สังกะสี	5

ที่มา : <http://www.chemtrack.org>^[292]; Friberb et al. (1992)^[134]

ที่มาและพิษของโลหะหนัก^[193, 256, 257, 292, 350, 506, 551, 554, 618, 647, 664]

โลหะหนักที่พบว่ามีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้มาก มักเป็นโลหะหนักที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตร หรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยโลหะหนักชนิดที่เป็นอันตรายได้มากแม้มีเพียงปริมาณน้อย เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก เป็นต้น

1. ปรอท

ปรอท (mercury-Hg) มีหมายเลขอะตอม 80 และสัญลักษณ์คือ Hg เป็นสารที่มีความหนาแน่นสูง ถึงขั้นที่ก้อนตะกั่วหรือเหล็กสามารถลอยอยู่ได้ ถึงแม้ปรอทจะมีลักษณะคล้ายตะกั่ว และเป็นของเหลว แต่ก็มีน้ำหนักมากกว่าตะกั่ว และแม้ปรอทจะเป็นโลหะ แต่ก็ไม่ดึงดูดกับแม่เหล็ก ปรอทสามารถพบได้จากหินที่ขุดพบในเหมืองโดยการนำหินนั้นมาทำให้ร้อนด้วยอุณหภูมิ 357 องศาเซลเซียส ปรอทสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภทได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน การย้อมสี การผลิตเยื่อกระดาษ พลาสติก เกล็ดขี้ผึ้ง อุปกรณ์ในการถ่ายรูป อุปกรณ์ไฟฟ้า สารฆ่าแมลงและยาฆ่าเชื้อ นอกจากนี้

เนื่องจากว่าปรอทมีจุดเดือดไม่สูงนัก จึงได้มีการทดลองนำเมอคิวริกออกไซด์มาผลิตเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์อีกด้วย

การใช้ประโยชน์นั้น ปรอทมักถูกใช้ในการผลิตเคมีทางอุตสาหกรรม หรือในการประยุกต์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ในเทอร์โมมิเตอร์บางชนิด โดยเฉพาะที่ใช้วัดอุณหภูมิสูง (ในสหรัฐอเมริกาบางรัฐและท้องถิ่นห้ามการขายปรอทวัดไข้โดยไม่มีใบสั่งแพทย์) ใช้ในเครื่องวัดความดันเลือด สารปรอทเป็นส่วนประกอบหลักของสาร amalgam ที่ใช้อุดฟัน (amalgum) ปรอทยังพบในสีทาบ้าน และใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตแบตเตอรี่และการสกัดแร่เงินและทอง

การใช้ประโยชน์ของปรอทในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ เป็นสารประกอบที่ใช้เป็นสารกันบูด ในวัคซีน และหมึกสำหรับทำรอยสัก บาโรมิเตอร์ปรอท บั้มสัญญาณภาค เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้า และอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการอื่น ๆ ใช้ในหลอดอิเล็กทรอนิกส์บางชนิด รวมถึงเครื่องปรับกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ไอปรอทใช้ในหลอดไฟไอปรอท และป้ายโฆษณาหลอดนีออนบางชนิด และหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ปรอทเหลวในบางครั้งใช้เป็นตัวทำความเย็นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ใช้ในเคมีไฟฟ้าเป็นส่วนของขั้วไฟฟ้าทุกขั้วที่มีอ้างอิงที่เรียกว่าขั้วไฟฟ้าคาโลเมล (calomel electrode) สวิตช์ปรอท ขั้วไฟฟ้าสำหรับการแยกสารด้วยกระแสไฟฟ้าบางชนิด ถ่านไฟฟ้า (ถ่านไฟปรอทและถ่านอัลคาไลน์) ใช้เป็นแคโทดลิสต์ ยาฆ่าแมลง และกล้องโทรทรรศน์กระจกเหลว (liquid mirror) ส่วนการใช้ในอดีต ใช้ป้องกันไม้ ใช้ล้างรูปเคลือบกระจกเงา สีสำหรับป้องกันเรือสกรุป (ยกเลิกเมื่อ พ.ศ. 2533) ยากำจัดวัชพืช (ยกเลิกเมื่อ พ.ศ. 2538) สารประกอบของปรอทได้เคยใช้ใน ยาฆ่าเชื้อโรค ยาถ่าย ยาแก้ซึม และ ยาแก้โรคซิฟิลิส

สารปรอทมักพบปนเปื้อนอยู่ในอากาศ น้ำ และดิน เป็นส่วนใหญ่ สาเหตุมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การเผาขยะ ผลิตภัณฑ์ของใช้ที่ทิ้งจากบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารปรอทเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตพลาสติก โรงงานผลิตเภสัชภัณฑ์ หรือโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหิน นอกจากนี้ยังพบสารปรอทได้ในเครื่องสำอางและอาหารโดยเฉพาะอาหารทะเลพบมากในสัตว์ทะเลตัวใหญ่ เช่น ฉลาม ทูน่า โลมา วาฬ เนื่องจากมีช่วงชีวิตที่ยืนยาวและกินปลาเล็กเป็นอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากปรอทไหลไปตามน้ำจืดออกสู่ทะเล และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ปลาทะเลจึงกินเข้าไปจึงมีโอกาสที่สารปรอทสะสมอยู่ในตัวค่อนข้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนของสารปรอทจากแหล่งน้ำธรรมชาติมีสาเหตุมาจากโรงงานอุตสาหกรรมมักปล่อยสารปรอทออกมากับน้ำทิ้งของโรงงาน จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเปลี่ยนสารปรอทให้เป็นสารประกอบ methylated mercury (CH_3Hg^+ และ $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง

สารปรอทเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยตรงจากการหายใจ การสัมผัสทางผิวหนัง การกินอาหารและน้ำที่ปนเปื้อนสารปรอท ซึ่งส่วนใหญ่โลหะหนักรวมทั้งปรอทมักปนเปื้อนมากับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ซ้ำอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 โลหะหนัก

ดิบที่นำมาทำน้ำประปา สารปรอทที่อยู่ในรูปของเหลวสามารถระเหยเป็นไอได้ในภาวะปกติ ส่วนใหญ่พบอยู่ในเทอร์โมมิเตอร์ (ปรอทวัดไข้) ถ้าเทอร์โมมิเตอร์แตก สารปรอทจะกลายเป็นไอ ทำให้เกิดอันตรายกับระบบทางเดินหายใจ ไอปรอทเป็นพิษต่อร่างกายมาก ถ้าหายใจเข้าไป จะดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดทันที กระจายไปยังสมองและส่วนอื่นของร่างกายได้รวดเร็ว มาก แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก ปรอทจะจับยึดกับเม็ดเลือดแดงและกระจายไปทั่ว ทุกส่วนของร่างกาย แล้วสามารถทำลายเนื้อเยื่อสมองส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึกนึกคิด สารปรอทสามารถผ่านทางสายสะดือไปยังทารกในครรภ์ได้

เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสารปรอทครั้งรุนแรงมากที่สุดคือ ที่เมืองมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี พ.ศ. 2496 ทำให้เกิด “โรคมินามาตะ” สาเหตุมาจากการกินปลาที่จับมาจากอ่าว มินามาตะซึ่งปนเปื้อนสารปรอททำให้ผู้ป่วยจำนวนมากมีอาการทางระบบประสาทส่วนกลาง และเด็ก ๆ มีอาการทางสมอง

อาการพิษจากสารปรอทมี 2 ลักษณะ คือ

1. พิษเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับสารปรอทคราวเดียวปริมาณมาก ทำให้มีอาการไข้ หายใจลำบาก ปอดอักเสบ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย มีแผลในปากน้ำลายออกมาก มีภาวะไตวาย ถ่ายเป็นเลือด ชักกระตุก เดินเซ การเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อผิดปกติ

2. พิษเรื้อรัง เกิดจากการได้รับสารปรอทสะสมทีละน้อยเป็นระยะเวลานาน จนเกิดพิษทางสมอง ไข้ ตับ ผื่นหนัง ทำให้มีอาการคัน ชัก ปวดปลายมือปลายเท้า ปวดศีรษะ หงุดหงิด ซึมเศร้า ประสาทหลอน พันโยก เหนื่อยล้าบวมมีเส้นที่บสีน้ำเงิน เลือดออกง่าย ภาวะซีด เลือดจาง มีอาการทางตับและไต

พิษทางสมอง ในส่วนที่ทำให้มีอาการความจำเสื่อม ไม่มีสมาธิ ซึมเศร้านี้เป็นเพราะ ปรอทส่วนใหญ่ไปสะสมที่สมอง โดยอยู่ในไขมันซึ่งมีจำนวนมากที่สมอง ทำให้เป็นอันตรายต่อระบบประสาท ผลกระทบนี้มีบทบาทอย่างมากต่อการพัฒนาสมองและระบบประสาทของทารกในครรภ์ และเด็กเล็ก เพราะระบบประสาทของเด็กกำลังอยู่ในช่วงการพัฒนา (จนกระทั่งอายุ 14 ปี) แต่ระยะวิกฤตจะอยู่ในช่วงสัปดาห์แรก ๆ ของการตั้งครรภ์ และผลกระทบที่เกิดขึ้นอาจไม่ปรากฏในช่วงแรกคลอด แต่จะแสดงอาการเด่นชัดในช่วงหลัง ดังนั้นองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา จึงมีคำแนะนำให้สตรีมีครรภ์ สตรีในวัยเจริญพันธุ์ แม่ที่กำลังให้นมบุตร และเด็ก หลีกเลี่ยงการบริโภคปลาบางชนิด เช่น ปลาตาบเงิน ปลาฉลาม ปลา King Mackerel เนื่องจาก มีสารปรอทสะสมอยู่ในปริมาณสูง^[292]

2. ตะกั่ว^[95]

ตะกั่ว (lead-Pb) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 82 และสัญลักษณ์คือ Pb (มาจากภาษาละตินว่า Plumbum) ตะกั่วเป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาว

เงาแวววาว แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ สี และยาฆ่าแมลง แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ สี และยาฆ่าแมลง แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ สี และยาฆ่าแมลง

ก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระสุนปืน โลหะผสม แหล่งของแร่ตะกั่วในประเทศไทยพบที่จังหวัด กาญจนบุรี ตาก เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง ลำพูน แพร่ เพชรบูรณ์ เลย เพชรบุรี นครศรีธรรมราช พัทลุง และยะลา สินแร่ตะกั่วถลุงได้โลหะตะกั่ว ซึ่งใช้ประโยชน์ใน อุตสาหกรรมต่าง ๆ ภายในประเทศดังนี้

โลหะตะกั่ว ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์เครื่องใช้ไฟฟ้า หม้อน้ำรถยนต์ ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรไฟฟ้า อุตสาหกรรมโลหะบัดกรีซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน หมึกพิมพ์ ตัวพิมพ์ ใช้ในการทำกระดาษตะกั่ว ท่อน้ำ แผ่นตะกั่ว กระสุนปืน สะพานไฟฟ้า ทำ ฉนวนกันรังสีในเครื่องหรือห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับปฏิกิริยาปรมาณู ใช้ในโรงงานผลิตสี สารเคมี ล้างภาพและอัดภาพ อยู่ซ่อมรถยนต์ อุตสาหกรรมท่อเรือ สารเคมีผสมเพื่อเพิ่มออกเทนใน น้ำมันเบนซิน โรงงานผลิตสารพิษกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น

จังหวัดที่เคยมีการผลิตแร่ตะกั่ว ได้แก่ จังหวัดพัทลุง ยะลา ลำพูน และแพร่ ในปัจจุบัน จังหวัดกาญจนบุรีเป็นจังหวัดเดียวที่ยังคงมีการผลิตแร่ตะกั่วคาร์บอนเนต และตะกั่วซัลไฟด์ที่มี แร่สังกะสีปนอยู่ด้วย โดยแหล่งผลิตที่สำคัญคือที่แหล่งสองท่อ บ่องาม บ่อใหญ่ และบ่อน้อย อำเภอทองผาภูมิ สินแร่ตะกั่วคาร์บอนเนตจะส่งไปถลุงยังบริษัทโลหะตะกั่วไทย ที่อำเภอ ลาดหญ้า จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นผู้ผลิตโลหะตะกั่วจากสินแร่ตะกั่วคาร์บอนเนตเพียงรายเดียว ของประเทศ

ตะกั่ว เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ ในโลก แต่การกระจายของตะกั่ว นั้นกว้างขวางทั่วโลก เพราะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบในการ ผลิตมากมาย ดังนั้นตะกั่วที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในแต่ละปีจึงมีจำนวนมาก และมีปริมาณ ตะกั่วที่รั่วไหลออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในน้ำและอากาศ จากขบวนการถลุงแร่ตะกั่ว และ ขบวนการผลิตที่ใช้ตะกั่ว อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่เป็นอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้ตะกั่วเป็น วัตถุดิบมากที่สุด รองลงมาคืออุตสาหกรรมผลิตสารเคมีเพื่อเพิ่มออกเทนในน้ำมันเบนซิน สำหรับโรงงานผลิตแบตเตอรี่ในสหรัฐอเมริกา มีค่าเฉลี่ยของตะกั่วที่ถูกปล่อยออกมาในน้ำทิ้งต่อ แบตเตอรี่ 1 ลูก อยู่ในช่วง 4.54 -68.10 มิลลิกรัม และใช้น้ำ 11-17 แกลลอนต่อแบตเตอรี่ 1 ลูก และตะกั่วที่ถูกปล่อยออกมามากที่สุดคือแผนกทำแผ่นธาตุ น้ำทิ้งของแผนกทำแผ่นธาตุมีพีเอช ต่ำ และความเข้มข้นของตะกั่วสูง

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ความรุนแรงของพิษ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปริมาณตะกั่ว และชนิดของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ สาเหตุของการได้รับ พิษจากตะกั่ว อาจมาจากการกินอาหาร น้ำดื่มที่มีสารตะกั่วปนเปื้อน หรือการได้รับสารตะกั่วใน สิ่งแวดล้อม เช่นหายใจเอาสารตะกั่วเจือปนในอากาศเข้าไป หรือจากการปนเปื้อนของสาร ตะกั่วในแหล่งน้ำ ดิน

สารตะกั่วที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมักเกิดจากการกระทำของมนุษย์ โดยมีการนำตะกั่วมาใช้และมีการกำจัดหรือการนำกลับมาใช้ใหม่อย่างไม่ถูกวิธี กลุ่มผู้เสี่ยงต่อการเกิดโรคพิษตะกั่วได้แก่ คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณแหล่งที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว คนงานที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบในการผลิต ทำงานในเมืองตะกั่ว การหลอมตะกั่ว การบัดกรี และคนที่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณโรงงานหลอมตะกั่ว ตำรวจจราจร และคนที่อยู่ในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นเป็นเวลานาน ดังนั้นตะกั่วจึงเป็นอันตราย มีผลกระทบต่อประชาชนอย่างมาก โดยเฉพาะในเด็กซึ่งตะกั่วมีผลต่อการพัฒนาการทางสมองและเชาวน์ปัญญาของเด็ก

เด็กเป็นกลุ่มเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสสารตะกั่วมากที่สุด เด็กอาจได้รับสารตะกั่วจากการหยิบสิ่งที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนเข้าปาก หรือรับจากน้ำนมแม่ที่มีสารตะกั่ว แม้แต่ทารกในครรภ์ก็สามารถรับสารตะกั่วจากมารดาได้ทางสายสะดือ สารตะกั่วมีพิษมากโดยเฉพาะเด็ก ซึ่งอาจมีผลทำให้สมองพิการ ส่วนผู้ใหญ่อาจมีผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหารและระบบประสาท โดยเมื่อซึมเข้ากระเพาะอาหารตะกั่วจะทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกในน้ำย่อย กลายเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ แล้วซึมเข้ากระแสโลหิต บางส่วนถูกเก็บสะสมไว้ สำหรับอันตรายโดยทั่วไปนั้นทำให้เม็ดเลือดแดงอายุสั้นลง ทำให้เป็นโรคเลือดจาง และเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ไต ทางเดินอาหาร ตับ และหัวใจ มีรายงานว่า ถ้ารับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายวันละ 2 มิลลิกรัม ภายในเวลา 2-3 ปี จะแสดงอาการแพ้พิษของตะกั่ว แต่ถ้ารับในปริมาณที่มากกว่านี้ก็จะแสดงอาการแพ้พิษของตะกั่วได้เร็วยิ่งขึ้น

อาการโรคพิษตะกั่วเกิดได้กับหลายระบบของร่างกายคือ

1. ระบบประสาทส่วนกลางและสมอง อาการสำคัญที่พบคือ สมองเสื่อมจากพิษตะกั่ว พบในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ โดยมีอาการหงุดหงิดง่าย กระวนกระวาย ซึม เวียนศีรษะ รายที่เป็นรุนแรงอาจมีอาการสั้นเวลาเคลื่อนไหว ชัก หมดสติ และเสียชีวิตได้
2. ระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อ โดยมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่าง ๆ กล้ามเนื้อที่ใช้บ่อยมีอาการอ่อนแรง หรืออัมพาต
3. ระบบทางเดินอาหาร เป็นอาการที่พบได้บ่อยที่สุด ผู้ป่วยมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน โดยเริ่มแรกมักมีอาการท้องผูก แต่บางรายอาจมีอาการท้องเดิน น้ำหนักลด กล้ามเนื้อหน้าท้องบีบเกร็งและกดเจ็บ ทำให้มีอาการปวดท้องมาก
4. ระบบเลือด มักพบมีอาการซีด ทำให้เป็นโรคเลือดจาง
5. ระบบทางเดินปัสสาวะ ผู้ป่วยที่ได้รับตะกั่วเป็นเวลานาน ๆ อาจเกิดภาวะไตวายเรื้อรัง
6. ระบบโครงสร้าง ตะกั่วจะไปสะสมที่กระดูกโดยเฉพาะที่ส่วนปลายกระดูก
7. ระบบสืบพันธุ์ ผู้ได้รับตะกั่วติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจเป็นหมันได้ทั้งผู้ชายและ

ผู้หญิง

8. ระบบอื่น ตะกั่วทำให้เกิดความผิดปกติในการทำงานของต่อมไทรอยด์ และการผิดปกติของดีเอ็นเอ

อาการแพ้พิษของตะกั่วเริ่มจาก คลื่นไส้ อาเจียน เหน็บชา แขนขาไม่มีแรง ท้องผูก อ่อนเพลีย น้ำหนักลด โลหิตจาง ชัก ที่เหงือกบริเวณรากฟันมีเส้นสีน้ำเงินดำเรียกว่าเส้นตะกั่ว (lead line) เป็นเส้นที่เกิดจากตะกั่วในน้ำลายเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมา เกิดเป็นสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์เป็นสารประกอบสีดำมาจับที่เหงือก อาการต่าง ๆ ที่แสดงออกในขั้นเริ่มต้นถ้าไม่ทำการรักษาอย่างรีบด่วนอาจกลายเป็นอาการเรื้อรังหรืออาจเป็นโรคต่าง ๆ ได้เช่น โรคโลหิตจาง โรคไตพิการ โรคเยื่อบุสมองอักเสบ และตะกั่วยังสามารถสะสมในกระดูกอีกด้วย

3. แคดเมียม

แคดเมียม (cadmium-Cd) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 48 และสัญลักษณ์คือ Cd แคดเมียมเป็นโลหะทรานซิชันสีขาว-ฟ้า เป็นธาตุมีพิษ ตามธรรมชาติจะพบแคดเมียมในแหล่งสังกะสีและตะกั่ว แคดเมียมใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่นิกเกิลและแคดเมียม ใช้ผลิตถ่านไฟฟ้า (โดยเฉพาะ ถ่าน Ni-Cd) อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม อะไหล่รถยนต์ โลหะผสมในอุตสาหกรรมเพชรพลอย อุตสาหกรรมการถลุงแร่ การผลิตสังกะสี การชุบโลหะ ป้าย สารกำจัดศัตรูพืช ใช้สำหรับทำสีผง สารเคลือบ และโลหะชุบ และเป็นสารทำให้พลาสติกมีความเสถียร นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์อื่น ๆ เช่นใช้ในโลหะผสมบางชนิดที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ใช้ในโลหะผสมสำหรับการรองรับ (bearing alloys) เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้เป็นตัวกักกันเพื่อควบคุมการแตกตัวของนิวเคลียร์ ใช้สารประกอบที่มีแคดเมียมในตัวฟอสเฟอร์ (phosphor) ของโทรทัศน์ขาวดำ รวมถึงฟอสเฟอร์สีน้ำเงินและสีเขียว สำหรับหลอดภาพของโทรทัศน์สี แคดเมียมซัลไฟด์เป็นเกลือที่ปรากฏมากที่สุด ใช้เป็นสีเหลืองผง ส่วนแคดเมียมซัลไซด์ ใช้เป็นสีแดงผง ใช้ในสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมซัลไซด์ และแคดเมียมเทลลูไรด์ซึ่งสามารถใช้สำหรับการตรวจจับแสงหรือโซลาร์เซลล์ สารประกอบแคดเมียมบางชนิดใช้ในพีวีซีเป็นตัวทำเสถียร

ปัญหาของพิษแคดเมียมในประเทศไทย ได้มีรายงานการตรวจพบการปนเปื้อนของแคดเมียมในน้ำดื่ม และแหล่งน้ำธรรมชาติที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยสถาบันจัดการคุณภาพน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute –IWMI) ได้ศึกษาแหล่งกำเนิดแคดเมียมและตรวจวัดระดับแคดเมียมในดินและข้าวระหว่างปี พ.ศ. 2541-2546 พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน ที่อาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนในผลิตผลทางการเกษตร และเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรกว่า 6000 คน^[218]

จากการตรวจหาแคดเมียมในแปลงนาข้าวบริเวณซึ่งอยู่ใกล้แหล่งแร่สังกะสี (zinc mineralized area) ของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่ามีปริมาณแคดเมียมในดินสูงกว่าค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 โลหะหนัก

มาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) ถึง 1800 เท่า และผลการตรวจเมล็ดข้าวพบว่า ร้อยละ 95 ของเมล็ดข้าวที่สุ่มตัวอย่าง มีแคดเมียมปนเปื้อนในปริมาณที่มากกว่าค่าที่พบในข้าวที่ปลูกในประเทศไทยในบริเวณอื่น ๆ สูงที่สุดถึง 100 เท่า ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่พบนี้มีค่าในระดับเดียวกับข้าวที่ก่อให้เกิดโรค อีได-อีได ในประเทศญี่ปุ่นหากบริโภคติดต่อกันเป็นเวลานาน^[218]

โดยทั่วไปพบว่าแคดเมียมปนอยู่ในน้ำธรรมชาติในปริมาณที่น้อยมากจนอาจไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต แต่น้ำบริเวณใกล้เหมืองแร่ แหล่งชุมชน แหล่งเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีแคดเมียมมากกว่าปกติซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ เช่นน้ำทิ้งจากเขตสุขภาพบาลในแคลิฟอร์เนียได้ มีแคดเมียมอยู่ในช่วง 1-140 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณแคดเมียมมากน้อยแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของน้ำทิ้ง เช่นปริมาณของแคดเมียมที่ทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์มี 0.011 มิลลิกรัมต่อลิตร จากโรงงานปลา 0.014 มิลลิกรัมต่อลิตร โรงงานขนมปัง 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร โรงงานเครื่องดื่ม 0.003 ไมโครกรัมต่อลิตร โรงงานทำไอศกรีม 0.031 ไมโครกรัมต่อลิตร โรงงานย้อมผ้า 0.030 ไมโครกรัมต่อลิตร และโรงงานล้างรถ 0.018 ไมโครกรัมต่อลิตร^[160]

สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ มักถูกผลิตออกมาในรูปสารป้องกันกำจัดเชื้อรา (fungicides) อาจมีผลกระทบต่อพืชผักเพราะสารพิษประเภทนี้มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ ซึ่งได้มีการประมาณปริมาณแคดเมียมที่ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นสารป้องกันกำจัดเชื้อรา พบว่ามีประมาณ 0.23 ตันต่อปี แม้ว่าการเกษตรจะมีการใช้สารเคมีที่มีแคดเมียมเจือปนอยู่ด้วยน้อยมากก็ตาม แคดเมียมก็สามารถสะสมอยู่ในบริเวณนั้นหรือบริเวณใกล้เคียงจนถึงขั้นมีผลกระทบต่อพืชได้^[719]

ปุ๋ยที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบของแคดเมียมต่อพืช คือปุ๋ยฟอสเฟต โดยเฉพาะปุ๋ยฟอสฟอไรท์ ซึ่งได้มาจากการสะสมของสัตว์ทะเลที่ตายลง พบว่ามีแคดเมียมประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร องค์ประกอบของปุ๋ยซุเปอร์ฟอสเฟตซึ่งได้มาจากเกาะในมหาสมุทรแปซิฟิกมีแคดเมียมอยู่ในช่วง 50 -170 มิลลิกรัมต่อลิตร ปุ๋ยฟอสเฟตที่ขายกันอยู่ทั่วไปมีแคดเมียมอยู่ในช่วง 9-36 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปุ๋ยซุเปอร์ฟอสเฟตที่ได้จากดินป่าในรัฐเวอร์มอนต์ สหรัฐอเมริกาจะเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเป็น 0.34-1.30 มิลลิกรัมต่อลิตร^[160]

มนุษย์ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ กินอาหารหรือดื่มน้ำที่มีแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย หรืออาจมีการสะสมในปัสสาวะที่มาจากแหล่งที่มีแคดเมียมปนเปื้อน เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้ามและลำไส้ แม้ได้รับปริมาณน้อยแต่ต่อเนื่องแคดเมียมจะถูกสะสมไว้ที่ไต ทำให้การทำงานของไตผิดปกติ^[730]

การบริโภคอาหารหรือการสูดดมหรือหายใจเอาควันไอของแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้หายใจติดขัด เยื่อปอดถูกทำลาย ถุงลมโป่งพอง คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย เจ็บหน้าอก โลหิตจางเรื้อรัง ไตพิการ ระบบกล้ามเนื้อและกระดูกถูก

ทำลาย ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา เดินลำบาก เนื่องจากกระดูกพรุนและหัก และเม็ดเลือดแดง ถูกทำลาย อาจเสียชีวิตได้

การเกิดพิษจากแคดเมียมแบบเฉียบพลันจากการสูดดมสารแคดเมียมจะมีอาการคล้าย เป็นไข้หวัด หรือเรียกว่า ไข้ไอโลหะ (metal fume fever) ทำให้จมูกและคอแห้ง ปวดศีรษะ วิงเวียน อ่อนเพลีย มีไข้หนาวสั่น เจ็บหน้าอก อาจคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเดิน โดยอาจ เสียชีวิตจากอาการขาดน้ำและเกลือแร่ เกิดนิ่วทางเดินปัสสาวะ หรือ ไตวายได้ โรคที่เกิดจาก พิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิตา-อิตา (Itai Itai disease)

4. อาร์เซนิก

อาร์เซนิก (arsenic-As) หรือสารหนู เป็นธาตุเคมีในกลุ่มกึ่งโลหะ ที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 และมีสัญลักษณ์ธาตุเป็น As อาร์เซนิกบริสุทธิ์มีสถานะเป็นของแข็ง ไม่เป็นพิษ แต่ สารประกอบของอาร์เซนิกเป็นพิษต่อระบบเนื้อเยื่อ

สารอาร์เซนิกอนินทรีย์ เป็นสารโลหะหนักที่ถูกนำมาใช้ทั้งด้านอุตสาหกรรมและใช้เป็น ส่วนประกอบของยาสมุนไพรรักษาโรคมานานแล้ว และมักพบปนเปื้อนอยู่ในผัก ผลไม้ น้ำดื่ม อาหารทะเล เครื่องสำอาง ยาแผนโบราณ ส่วนอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As_2O_3) และสารประกอบ ที่เกี่ยวข้องใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตยากำจัดศัตรูพืช อุตสาหกรรม ฟอกหนัง อุตสาหกรรมถลุงแร่ การพิมพ์ลายผ้า การทำเครื่องปั้นดินเผา การหลอมและชุบโลหะ การผลิตน้ำยาถนอมเนื้อไม้ และสารประกอบอาร์เซนิกใช้ในการแยกทอง เป็นต้น

ปัญหาของพิษอาร์เซนิกในประเทศไทยได้มีมานานกว่า 10 ปี แล้ว โดยเฉพาะปัญหาพิษ อาร์เซนิกที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา ที่เป็นปัญหาต่อเนื่องมาจนถึงขณะนี้ (พ.ศ. 2551) และยังมีผู้ที่อาศัยในชุมชนนี้หลายรายที่ป่วยเป็นโรคพิษสารหนู^[218] ผู้ที่เสี่ยงต่อ การได้รับอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ผู้ที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ที่มี การใช้สารอาร์เซนิก ผู้ที่ใช้หรือดื่มน้ำที่มีอาร์เซนิกปนเปื้อน เกษตรกรที่ใช้สารกำจัดแมลง ศัตรูพืช และผู้ที่ใช้ยาสมุนไพรที่มีส่วนประกอบของสารอาร์เซนิก เป็นต้น

เมื่อร่างกายได้รับอาร์เซนิกเข้าไปทางการหายใจหรือจากการกินอาหารที่ปนเปื้อน อาร์เซนิกจะเข้าไปอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น เลือด ปัสสาวะ เส้นผมและเนื้อเยื่ออื่น ๆ ในปริมาณแตกต่างกันไป ลักษณะการเกิดพิษเนื่องจากสารอาร์เซนิกพบได้ทั้งแบบเฉียบพลัน และแบบเรื้อรัง ส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษเรื้อรังจากการสัมผัสสารอาร์เซนิกเข้าสู่ร่างกายนาน ติดต่อกัน อาการที่แสดงออกทางระบบต่าง ๆ อาจแยกได้เป็น

- ที่ผิวหนัง โดยผิวหนังส่วนใหญ่ที่สัมผัสกับอาร์เซนิกจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็น โรคผิวหนัง โดยเฉพาะผิวที่อยู่ตามซอกมุมต่าง ๆ เช่น รักแร้ ซอกคอ หู หนึ่งตา มุมปาก ซึ่ง บางทีจะเป็นตุ่มแข็งใสพองหรือผิวหนังแข็งด้าน โดยเฉพาะผิวหนังที่ฝ่าเท้า ฝ่ามือ อาจหลุด ออกมา หรือบริเวณที่สัมผัสจะเป็นจุดสี ๆ คล้ายกับเม็ดที่เกิดขึ้นหูด และต่อไปอาจเป็นสาเหตุ ของมะเร็งที่ผิวหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 4 โลหะหนัก

- ที่เยื่อเมือก สำหรับเยื่อเมือกเมื่อสัมผัสกับฝุ่นผงหรือก๊าซจะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนที่สัมผัส และฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปปอด มีอาการคล้ายกับเป็นหวัดคัดจมูก หากสัมผัสตาจะเกิดตาแดง ตาอักเสบ ในระบบหายใจอาร์เซนิกจะไปสะสมที่ปอด ทำให้หลอดลมเกิดอาการอักเสบอาจมีผลทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด

- ระบบประสาท อาร์เซนิกเมื่อเข้าไปสู่ระบบการไหลเวียนของเลือดจะมีผลต่อน้ำย่อยที่ช่วยเผาผลาญอาหารทำให้น้ำที่การทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ แขนและขาอาจเป็นอัมพาต ในส่วนระบบสมองทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม และอื่น ๆ เช่น เกิดเลือดจาง อาการทางตับ ไต

การได้รับพิษแบบเฉียบพลันจะมีผลต่อระบบทางเดินอาหาร เกิดคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องรุนแรง ท้องเดิน อาจจะเป็นเลือด อาจหมดสติได้ทันที อาจมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง มีอาการปวดศีรษะ เพ้อคลั่ง สับสน การเคลื่อนไหวช้าลง

5. โครเมียม

โครเมียม (chromium-Cr) เป็นโลหะมันวาวสีเทา มีจุดหลอมเหลวสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถขึ้นรูปได้ สถานะออกซิเดชันที่ปรากฏมากที่สุดคือ +2, +3 และ +6 โดยที่ +3 เสถียรที่สุด +1, +4 และ +5 ปรากฏน้อย สารประกอบโครเมียมที่มีสถานะ +6 เป็นตัวออกซิไดซ์อันตรายสูง โครเมียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดชั้นออกไซด์บาง ๆ ที่ป้องกันการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับโลหะที่อยู่ด้านล่าง

โครเมียมนิยมใช้ในงานโลหะกรรม ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน และทำให้เกิดความมันวาว ผสมเป็นโลหะผสม เช่น มีดสแตนเลส ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดส์ทำให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมกลายเป็นหัตถ์ โครเมียมออกไซด์ใช้เป็นผงขัดโลหะ เกลือโครเมียมทำให้แก้วมีสีเขียวมรกต โครเมียมทำให้หัตถ์มีสีแดงจึงใช้ผลิตหัตถ์เทียม หรือใช้ทำให้เกิดสีเหลืองสำหรับทาสี ส่วนโครไมต์ใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับการเผาอิฐ เกลือโครเมียมใช้ในการฟอกหนัง โปแตสเซียมไดโครเมตใช้เป็นสารทำปฏิกิริยา ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังใช้ในการทำให้สีย้อมติดผ้า

โครเมียมออกไซด์ (CrO_2) ใช้ผลิตเทปแม่เหล็ก มีประสิทธิภาพสูงกว่าเทปที่ผลิตจากเหล็กออกไซด์ ใช้ป้องกันการกัดกร่อนในการเจาะบ่อ ใช้เป็นอาหารเสริมหรือยาลดน้ำหนักซึ่งส่วนใหญ่เป็นโครเมียม (III) คลอไรด์และโครเมียม(III) "พอลิเนต" โครเมียมเฮกซะคาร์บอนิล ($\text{Cr}(\text{CO})_6$) ใช้ผสมลงในเบนซิน โครเมียมโบไรด์ (CrB) ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าอุณหภูมิสูง โครเมียม (III) ซัลเฟต ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) ใช้เป็นผงสีเขียวในสีเซรามิกวาร์นิชและหมึก รวมทั้งการเคลือบโลหะ

โครเมียมมีอันตรายเฉียบพลันต่อผิวหนังคือทำให้เกิดการระคายเคือง เช่นการสัมผัสกับน้ำยาล้างฝุ่นโครเมียม และฝุ่นโครเมียมทำให้เกิดการระคายเคือง โดยอาจทำให้เยื่อตาอักเสบหรือปวดได้เนื่องจากมีฝุ่นหรือผงโครเมียมอยู่ในดวงตา สำหรับการหายใจพบว่าฝุ่นโครเมียมอาจทำให้เกิดมะเร็งปอดได้เนื่องจากมีฝุ่นหรือผงโครเมียมอยู่ในดวงตา สำหรับการหายใจพบว่าฝุ่นโครเมียมอาจทำให้เกิดมะเร็งปอดได้เนื่องจากมีฝุ่นหรือผงโครเมียมอยู่ในดวงตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรใช้เพื่อการตัดสินใจทางการแพทย์หรือการตัดสินใจอื่น ๆ

โครเมียมมีพิษน้อยต่อระบบทางเดินหายใจ อันตรายที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากฝุ่นหรือไอของโครเมียม ทำให้ระคายเคืองทางเดินหายใจ มีอาการคล้ายเป็นไข้ทั่วไป แต่จะมีความรู้สึกคล้ายรสมโลหะในปาก หनावสัน ปวดกล้ามเนื้อได้นานถึง 24 ชั่วโมง หลังจากได้รับสารโครเมียม สำหรับอันตรายเรื้อรังทางผิวหนังนั้นเมื่อโครเมียมสัมผัสผิวหนังเป็นระยะเวลานานอาจมีผลทำให้เป็นโรคมะเร็งผิวหนังจากพิษของโครเมียม ส่วนพิษเรื้อรังทางการหายใจพบว่าอาจมีอันตรายต่อปอดโดยฝุ่นของโครเมียมจะไปสะสมในปอด และทำให้เกิดภูมิแพ้ได้^{275]}

6. นิกเกิล

นิกเกิล (nickel-Ni) คือธาตุเคมี ที่มีหมายเลขอะตอม 28 และสัญลักษณ์คือ Ni นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาว สีขาวเงิน อยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็ง ดีเป็นแผ่นได้ ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับอาร์เซนิก (arsenic) จะเกิดเป็นแร่นิกกอลไลต์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งอาร์เซนิกและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ์ (nickel glance)

ประโยชน์ของนิกเกิลเช่นใช้ในการทำสแตนเลสสตีล ใช้ในการทำซูเปอร์อัลลอยด์ ใช้ทำโลหะอัลลอยด์ และนอกจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์อื่น เช่น ทำเกราะ เป็นส่วนผสมของโลหะ alnico เพื่อใช้ในการทำแม่เหล็ก ใช้ทำ monel metal ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิลซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการผุกร่อนได้ดีเยี่ยม นำไปใช้ในการผลิตใบพัดเรือ เครื่องควร์ และท่อในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผลิต shape memory alloys ซึ่งใช้ในการหุ่นยนต์บางชนิด ใช้ในถ่านชาร์จ เช่น ถ่านนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (nickel metal hydride) และถ่านแบบนิกเกิลแคดเมียม (nickel cadmium) ใช้ทำเหรียญกษาปณ์ ใช้เคลือบโลหะ (electroplating) เพื่อป้องกันสนิม

ความเป็นพิษของนิกเกิล พบว่าฝุ่นของนิกเกิลถูกจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง และอาจเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็งปอดในสัตว์ทดลอง รวมทั้งอาจมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ การหายใจนิกเกิลเข้าไป จะก่อให้เกิดอันตรายและเกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อเมื่อกการสัมผัสถูกผิวหนังก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อเมือก การกลืนหรือกินเข้าไปก่อให้เกิดการระคายเคือง การสัมผัสถูกตาก่อให้เกิดการระคายเคือง

นอกจากนี้ผลเรื้อรังจากการสัมผัสนิกเกิลและสารประกอบของนิกเกิล ทำให้เกิดการอักเสบของผิวหนัง ซึ่งประกอบด้วยการมีแผลไหม้ คัน เป็นผื่นแดง และอาจเป็นสาเหตุของความผิดปกติของระบบย่อยอาหาร ชัก และเกิดภาวะขาดออกซิเจน การหายใจเอาอากาศที่มีนิกเกิลเจือปนอยู่เข้าไปอาจเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็งต่อทางเดินหายใจ มีอาการแพ้ของปอดคล้ายการเป็นหอบหืดและแน่นหน้าอก และนิกเกิลถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

7. ทองแดง

ทองแดง (copper-Cu) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงเป็นโลหะที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น Cu_2O , Cu_2S , CuF , CuSO_4 , CuFeS_2 เป็นต้น ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีรองจากเงิน ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น ใช้ผลิตสายลวดทองแดง ท่อน้ำทองแดง ลูกบิด และของอื่น ๆ ที่ติดตั้งในบ้าน แม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์ แม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ไฟฟ้า และสวิตช์ไฟฟ้า รางน้ำบนหลังคาและท่อระบายน้ำ หลอดสุญญากาศ หลอดรังสีคาโทด (cathode ray tube) และแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ หลอดนำคลื่นไฟฟ้าสำหรับรังสีไมโครเวฟ มีการใช้ทองแดงเพิ่มขึ้นในวงจรไอซี แทนอะลูมิเนียมเนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ใช้ผสมกับนิกเกิลเพื่อใช้เป็นวัสดุที่ไม่กร่อนสำหรับสร้างเรือ ในอุปกรณ์ทำครัวเช่นกระทะ และอุปกรณ์ที่ใช้น้ำดื่ม (มีด ส้อม ช้อน) ใช้เป็นส่วนประกอบของสารเคลือบเงาสำหรับเครื่องเซรามิก และเป็นสีสำหรับกระจก เครื่องดนตรี โดยเฉพาะเครื่องดนตรีประเภทแดร์ และใช้ขึ้นชิ้นส่วนเรือเพื่อป้องกันเพรียงและหอยมาเกาะ เดิมใช้ทองแดงบริสุทธิ์ในปัจจุบันใช้โลหะมันดส์ แทน (muntz metal คือทองแดง 60 เปอร์เซ็นต์ ผสมสังกะสี 40 เปอร์เซ็นต์) แบคทีเรียจะไม่เจริญเติบโตบนพื้นผิวทองแดง ดังนั้นจึงมีการใช้ลูกบิดทองแดงในโรงพยาบาลเพื่อลดการแพร่กระจายของโรค คอปเปอร์ซัลเฟตใช้เป็นสารพิษและสารทำให้น้ำบริสุทธิ์ และใช้สเปรย์ฆ่าโรคราน้ำค้างในพืช เป็นวัสดุในการผลิตฮีตซิงก์สำหรับคอมพิวเตอร์เนื่องจากระบายความร้อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่าง ๆ การทำสีย้อมเป็นต้น เนื่องจากการใช้ทองแดงอย่างมากจึงส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งมนุษย์อาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การดื่มน้ำ การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อ

การเกิดพิษของทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณทองแดงที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมมีมากที่ตับและสมอง โดยเมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับทองแดงติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากทางผู้จัดทำ

Wilson' diseases คือ ร่างกายสั่นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก^[265]

8. สังกะสี

สังกะสี (zinc-Zn) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกมา สังกะสีเป็นโลหะโครงสร้างที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 4 รองจากเหล็กกล้า อะลูมิเนียมและทองแดง

สังกะสีมีการใช้ประโยชน์ เช่นในรูปของโลหะเจือ เช่นกับทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) ใช้เคลือบผิว (galvanizing) เหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า ใช้เติมในยางและสี และใช้ประโยชน์อื่น ๆ เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ ฟิล์มไฟฟ้า อะโนดของเซลล์ไฟฟ้า และถ่านไฟฉาย

ในด้านความเป็นพิษ สังกะสีในรูปธาตุไม่ปรากฏเป็นพิษ และโดยปกติแล้วสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของคนและสัตว์ แต่สารประกอบหลายชนิดอาจเป็นพิษ แต่จัดอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถถูกขจัดออกจากร่างกายอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ปวดท้องมีเมือก คลื่นไส้ อาเจียน และการได้รับสังกะสีในปริมาณสูงเป็นเวลานาน ๆ ก่อให้เกิดความผิดปกติในระบบภูมิคุ้มกันและความผิดปกติของไขมันในร่างกาย ส่วนสังกะสีในรูปผงอาจติดไฟได้ด้วยตัวเองและเกิดการระเบิดได้

9. โคบอลต์

โคบอลต์ (cobalt-Co) คือธาตุเคมี ที่มีหมายเลขอะตอม 27 และสัญลักษณ์คือ Co โคบอลต์-60 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของโคบอลต์-59 โดยมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 60 ไม่มีปรากฏอยู่ในธรรมชาติ แต่ผลิตขึ้นได้โดยการนำเอานิวไคลด์ที่เสถียร คือโคบอลต์-59 ไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (ปรมาณู)

เกลือของโคบอลต์มีความจำเป็นต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ไอโซโทปของโคบอลต์-60 ใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์คือใช้สำหรับการรักษามะเร็ง ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งปลอดจากเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อให้ศัลยแพทย์ที่ทำการผ่าตัดคนไข้แน่ใจได้ว่าคนไข้จะไม่มีติดเชื้อจากถุงมือ รอยเย็บแผล ชุดใส่ผ่าตัด หรืออุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ผลิตภัณฑ์ยาและเครื่องสำอางบางชนิดถูกทำให้มีความสะอาดถูกหลักอนามัยและปลอดเชื้อโดยใช้โคบอลต์-60 โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผลิตภัณฑ์ที่อาจสูญเสียคุณภาพได้ถ้าใช้ความร้อนหรือขบวนการอื่น การใช้ประโยชน์ในด้านอาหาร โคบอลต์-60 ใช้ในการฉายรังสีอาหาร ช่วยให้ไม่ต้องใช้สารเคมีในการยืดอายุอาหาร และยังช่วยกำจัดเชื้อโรคที่ติดมากับอาหาร การใช้

ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่นใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพลาสติกบางชนิด ใช้ในการบำบัดตะกอนน้ำทิ้ง และใช้ในการกำจัดแมลงที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เป็นต้น^[212]

การได้รับโคบอลต์มากเกินไปจะเป็นอันตรายได้ โดยพบมีผู้รายงานว่า การเติมโคบอลต์ลงในเบียร์จะทำให้คนที่ดื่มเบียร์มาก ๆ เกิดโรคตับและหัวใจได้ การได้รับโคบอลต์ทำให้เกิดผลข้างเคียงโดยจะทำให้ต่อมธัยรอยด์โต และพบว่าการลดปริมาณการบริโภคโคบอลต์จะทำให้ต่อมธัยรอยด์ที่โตกลับคืนสู่ขนาดปกติได้

10. แมงกานีส

แมงกานีส (manganese-Mn) มีเลขอะตอม 25 ใช้ประโยชน์โดยแมงกานีสที่มีความบริสุทธิ์สูงใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรม อาหาร แมงกานีสส่วนใหญ่ใช้ในการควบคุมปริมาณกำมะถันในกระบวนการผลิตเหล็กกล้า และทำโลหะเจือทั้งที่มีเหล็กและไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โลหะเจือของแมงกานีสมีสมบัติแข็งแรงและสามารถป้องกันการขึ้นสนิมได้เป็นอย่างดี

ความเป็นพิษของแมงกานีสคือ เมื่อแมงกานีสจำนวนมากเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ จะไปทำลายระบบประสาททำให้เกิดอาการเป็นไข้ ปวดศีรษะ กล้ามเนื้อไม่มีแรง เบื่ออาหาร ไม่สนใจในสิ่งแวดล้อม ถึงแม้จะมีอะไรเปลี่ยนแปลงไปก็ไม่สนใจ นอนไม่หลับเป็นครั้งคราว พูดน้อยลง ความรู้สึกทางเพศเสื่อมถอย ต่อมาอาการจะมากขึ้น เป็นตะคริวบ่อย ปวดตามกล้ามเนื้อบ่อยไม่ค่อยพูดจาหรือเวลาพูดจะพูดเป็นเสียงเดียว ไม่มีเสียงสูงเสียงต่ำพูดซ้ำและไม่ชัด เวลาหัวเราะกล้ามเนื้อเกร็งไปทั่วใบหน้า เฉื่อยชา เวลาเดินมีอาการกระตุก ระยะสุดท้ายอาการต่าง ๆ จะรุนแรงยิ่งขึ้น ทำเดินแกว่งไปแกว่งมา ก้าวขาสั้น ๆ เดินหัวชุนไปข้างหน้า เดินลักษณะคล้ายเป็ด หกล้มบ่อยมีการสั่นกระตุกของปลายแขนปลายขา บางรายมีอาการไม่แน่นอน บางครั้งหัวเราะ บางครั้งร้องไห้ กลืนน้ำลายลำบาก ทำให้น้ำลายยืดตลอดเวลา พูดไม่มีเสียง บางคนมีอาการอัมพาตที่ร่างกายเป็นบางส่วน^[308]

11. ทองคำ

ทองคำ (gold-Au) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 79 และสัญลักษณ์คือ Au (มาจากภาษาละตินว่า aurum) ทองคำเป็นธาตุโลหะทรานซิชันสีเหลืองทองมันวาว เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดและตีเป็นแผ่นได้ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีส่วนใหญ่

ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนั้นเมื่อสัมผัสถูกอากาศสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม มีความแวววาวอยู่เสมอ มีความอ่อนตัว เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทองคำเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สะท้อนความร้อนได้ดี ทองคำบริสุทธิ์จะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่ายจึงทนต่อการผุกร่อนและไม่เกิดสนิมกับอากาศ แต่มีปฏิกิริยากับคลอรีน ฟลูออรีน น้ำประสานทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ควรแก้ไขที่ 4 โลหะหนัก

การใช้ประโยชน์ ในทางอวกาศได้มีการนำทองคำมาฉาบไว้ที่หน้ากากหมวกของนักบินอวกาศ เพื่อป้องกันรังสีอินฟราเรด ใช้เป็นชุดนักบินอวกาศและแคปซูลเพื่อป้องกันไม่ให้นักบินอวกาศกระทบกับรังสีในอวกาศที่มีพลังงานสูง นอกจากนี้ยังมีการใช้ทองคำบริสุทธิ์เคลือบกับเครื่องยนต์ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ หมวกเหล็ก เกราะบังหน้า และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในอวกาศ เนื่องจากทองคำที่มีความหนา 0.000006 นิ้ว จะมีคุณสมบัติช่วยสะท้อนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่ให้ทำลายหรือลดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้

ด้านทันตกรรม มีการใช้ทองคำเพื่อการครอบฟัน เชื่อมฟัน หรือการเลี่ยมทอง และยังมีการใช้ในการผลิตฟันปลอมด้วย เนื่องจากทองคำมีความคงทนต่อการกัดกร่อน การหมองคล้ำ และยังมีความแข็งแรงอีกด้วย โดยจะใช้ทองคำผสมกับธาตุอื่น เช่น แพลตินัม

ด้านอิเล็กทรอนิกส์ มีการนำทองคำมาใช้เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่สัมผัสในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น เครื่องคิดเลข โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากทองคำมีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีความคงทนต่อการกัดกร่อน จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของเครื่องไฟฟ้าเหล่านั้น

นอกจากนี้ทองคำยังใช้เป็นทุนสำรองทางการเงินของหลายประเทศ ใช้ประโยชน์เป็นเครื่องประดับ ด้านความเป็นพิษพบว่าทองคำไม่ปรากฏเป็นพิษ^[211]

รูปแบบทางเคมีของโลหะหนัก ^[3, 53, 54, 55, 416, 484, 506, 540, 614, 618, 668, 670, 675, 682, 688]

speciation หมายถึงการแพร่กระจาย หรือรูปแบบทางเคมีของโลหะหนัก (heavy metal speciation) ที่อยู่ในรูปต่าง ๆ โลหะหนักสามารถปรากฏได้ในหลายรูปแบบหรือหลายฟอร์ม ซึ่งปรากฏได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือบนแผ่นดิน โลหะหนักที่ปรากฏในน้ำ มีการปรากฏในสองรูปแบบหลัก ๆ คือในรูปที่ละลายน้ำ (dissolved/soluble) และในรูปของแข็ง (suspended/solid/insoluble) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหรือการเคลื่อนที่ได้น้อยกว่ารูปที่ละลาย

สำหรับส่วน soluble และ insoluble ของโลหะหนักในแหล่งน้ำ อาจแยกออกจากกันได้โดยใช้การกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกสองส่วนนี้ออกจากกัน ปกติแล้วกำหนดไว้ว่าเมื่อใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน กรองน้ำ ส่วนที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองนี้ได้เรียก insoluble หรือไม่สามารถละลายได้ ส่วนที่ผ่านกระดาษกรองได้จะเป็นส่วน soluble

โดยทั่วไปโลหะหนักที่พบในแหล่งน้ำพบได้ทั้งรูปที่ละลายและไม่ละลาย ตัวอย่างของโลหะหนักที่พบ เช่นตะกั่วในแหล่งน้ำสามารถปรากฏอยู่ในรูปไอออนอิสระ Pb^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำ หรือปรากฏในรูปการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ $Pb(OH)_2$ หรือรวมตัวกับเกลือต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ $Pb(NO_3)_2$, $Pb(CO_3)_2$ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 4 โลหะหนัก

การจำแนกโลหะหนักว่าอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำมีความสำคัญมาก นอกจากจะเกี่ยวข้องกับการทำความเข้าใจลักษณะของโลหะหนัก หรือการทำนายอันตรายจากพิษของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติแล้ว ยังสามารถให้ข้อมูลเพื่อบริหารจัดการให้เกิดความปลอดภัยในแหล่งน้ำด้วย สำหรับมลภาวะที่เกิดจากโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับว่าโลหะหนักนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้มากหรือน้อย

การละลายของโลหะหนักในน้ำ มีแนวโน้มที่ทำให้เกิดความเป็นพิษของโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นได้ ในขณะที่การตกตะกอน (precipitation) และการดูดซับ (adsorption) โลหะหนักโดยตัวดูดซับที่มีในแหล่งน้ำ จะทำให้โลหะหนักมีพิษน้อยลง การตกตะกอนของโลหะหนัก เช่น เกิดการรวมของโลหะหนักกับ carbonate, oxide, phosphate, silicate, sulfide จะเป็นตัวจำกัดความสามารถในการละลายของโลหะหนัก ทำให้โลหะหนักไม่สามารถละลายได้และมีพิษลดลง

ในแหล่งน้ำทั่ว ๆ ไปการละลายของโลหะหนักสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อน้ำมีค่าพีเอชลดต่ำลง ซึ่งจะทำให้โลหะหนักที่อยู่ในรูปของแข็งสามารถละลายออกมาได้ หรือทำให้โลหะหนักที่จับกับสิ่งมีชีวิตหรือจับกับตัวดูดซับอื่น ๆ ละลายออกมาได้ หรือเมื่อภาวะ redox potential ของแหล่งน้ำสูงขึ้น จะเพิ่มการละลายของโลหะหนักได้เช่นกัน

สมดุลเคมีที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก [240, 506, 551, 618, 647, 738]

รูปแบบทางเคมีของโลหะหนักในน้ำธรรมชาติมีความซับซ้อน และมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของโลหะหนักเช่นค่าพีเอช ค่ารีดอกซ์ (pE, หรือค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน) ค่าพีเอชมักมีผลต่อการแตกตัว และหมายถึงการที่สารละลายมีการขนส่งโปรตอนหรือประจุบวก ค่ารีดอกซ์หมายถึงกิจกรรมของค่าอิเล็กตรอนที่สมดุลและหมายถึงแนวโน้มของสารละลายที่จะยอมรับหรือขนส่งอิเล็กตรอน ค่ารีดอกซ์ใช้ในการอธิบายขบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนประจุทางไฟฟ้าของแร่ธาตุทางเคมีหรือของสารประกอบโดยแบ่งปฏิกิริยาของรีดอกซ์ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งประกอบด้วยตัวซึ่งให้อิเล็กตรอนเรียก reductant อีกส่วนเป็นชนิดที่รับอิเล็กตรอนเรียก oxidant มีรายละเอียดดังนี้

ปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction reaction) ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน โดยเกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังสารหนึ่ง จะเกิดสองปฏิกิริยาย่อยควบคู่กันไปเสมอ ซึ่งคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ปฏิกิริยารีดอกซ์ส่วนมากเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น การนำโลหะสังกะสี (Zn) จุ่มลงในสารละลายของทองแดง

(Cu^{2+}) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ โลหะหนักทั้งหมดห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนจาก Zn ไปยัง Cu^{2+} ในสารละลายได้โดยตรง สิ่งที่จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนคือแผ่นสังกะสีจะกร่อน มีตะกอนของทองแดงเกิดขึ้นบนแผ่นสังกะสี และเมื่อตั้งทิ้งไว้ สารละลายสีฟ้าของ Cu^{2+} จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นไม่มีสี โดยเกิดปฏิกิริยาย่อยหรือที่เรียกว่าครึ่งปฏิกิริยา (half-reaction) คือ

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน โดย Zn ให้อิเล็กตรอนแล้วกลายเป็น Zn^{2+}



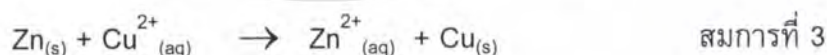
ถ้าพิจารณาเลขออกซิเดชันของ Zn เมื่อให้อิเล็กตรอนแล้วมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น +2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเป็นปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มขึ้นของเลขออกซิเดชัน และอาจกล่าวได้ว่า สารที่สูญเสียอิเล็กตรอนและเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Zn) นี้ถูกออกซิไดซ์

ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน โดย Cu^{2+} รับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นอะตอมของ Cu



Cu^{2+} เมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วมีเลขออกซิเดชันลดลงจาก +2 เป็น 0 ปฏิกิริยารีดักชันจึงเป็นปฏิกิริยาที่มีการลดลงของเลขออกซิเดชัน และอาจกล่าวได้ว่า สารที่รับอิเล็กตรอนและมีเลขออกซิเดชันลดลง (Cu^{2+}) นี้ถูกรีดิวซ์

เมื่อรวมปฏิกิริยาจากสมการ (1) และ (2) จะได้ปฏิกิริยาดังสมการ



ปฏิกิริยา (3) เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ โดย Zn รีดิวซ์ Cu^{2+} ให้เป็น Cu และ Cu^{2+} ออกซิไดซ์ Zn ให้กลายเป็น Zn^{2+} หรืออาจกล่าวว่า Cu^{2+} ถูกรีดิวซ์โดย Zn และ Zn ถูกออกซิไดซ์โดย Cu^{2+} Zn จึงเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และ Cu^{2+} เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent)^[240]

คุณสมบัติของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับทางชีวภาพ

สิ่งมีชีวิตหรือตัวดูดซับชีวภาพในแหล่งน้ำจะดูดซับโลหะหนักหรือจับกับโลหะหนักได้มากน้อยเพียงใด จะขึ้นกับคุณสมบัติของโลหะหนัก เช่น ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี รัศมีของไอออน ความแรงของไอออน ความหนาแน่น และค่าคงที่ความคงตัว เป็นต้น โดยมีรายละเอียดของแต่ละค่าดังนี้^[210, 236, 254, 256, 260, 266]

1. อิเล็กโตรเนกาติวิตี

อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity-EN) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนของธาตุต่าง ๆ ที่มาสร้างพันธะกันในส่วนของการเชื่อมต่อทางเคมี (chemical bond) ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ประเภทของการเชื่อมต่อส่วนใหญ่วัดที่ความแตกต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตีระหว่างอะตอมที่เกี่ยวข้อง ถ้าอิเล็กโตรเนกาติวิตีแตกต่างกันมากอิเล็กตรอนจะย้ายไปอยู่กับอะตอมใดอะตอมหนึ่งอย่างถาวร เป็นการเชื่อมต่อแบบพันธะไอออนิก (ionic bond) และถ้าอะตอมหนึ่งอะตอมใดมีแรงดึงดูดมากกว่าอีกอะตอมหนึ่งก็จะเกิดการเชื่อมต่อแบบโพลาร์ พันธะโคเวเลนต์ (polar covalent bond)

เครื่องชี้วัดสำหรับอิเล็กโตรเนกาติวิตีตามพอลิ่งสเกล (Pauling scale) อิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุเคมี (ฟลูออรีน) จะถูกกำหนดค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีให้เท่ากับ 3.98 (ในหนังสือบางเล่มเป็น 4) ธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยที่สุดคือแฟรนเซียมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.70 ส่วนธาตุที่เหลือจะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี ระหว่าง 0.70 ถึง 3.98 และไฮโดรเจนถูกกำหนดให้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากับ 2.10 หรือ 2.20 อะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกันจะมีผลต่อชนิดพันธะในการเชื่อมต่อกัน (bonds) โดย

- การเชื่อมต่อระหว่างอะตอมที่มี อิเล็กโตรเนกาติวิตี แตกต่างกันอย่างมากกว่าหรือเท่ากับ 1.70 จะถูกพิจารณาเป็นพันธะไอออนิก (ionic bond)
- การเชื่อมต่อระหว่างอะตอมที่มี อิเล็กโตรเนกาติวิตี แตกต่างกัน ระหว่าง 1.70 และ 0.40 จะถูกพิจารณาเป็น โพลาร์พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond)
- การเชื่อมต่อระหว่างอะตอมที่มี อิเล็กโตรเนกาติวิตี แตกต่างกัน ต่ำกว่า 0.40 จะถูกพิจารณาเป็น นอน-โพลาร์พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ถ้าเท่ากับ 0.00 จะถูกพิจารณาเป็น นอน-โพลาร์พันธะโคเวเลนต์อย่างสมบูรณ์

แนวโน้มของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีจะเป็นดังนี้ ในหมู่เดียวกันค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีจะมีค่าลดลงจากบนลงล่าง เพราะการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนถูกดึงไปได้ง่าย ในคาบเดียวกันค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีจะเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา เพราะ ขนาดของอะตอมเล็กลง มีแรงดึงดูดระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนมากขึ้น ดังนั้นธาตุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตามทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีมากที่สุดจะปรากฏอยู่ส่วนบนและขวามือของตารางธาตุ ในทางตรงกันข้าม ธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยจะอยู่ในบริเวณด้านล่างทางซ้ายมือของตารางธาตุ ธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจะมีความสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำ ดังนั้นฟลูออรีน (F) สามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเข้าสู่ตัวเองได้ดีที่สุด (ตารางที่ 2)

2. รัศมีของไอออน

ธาตุจำนวนมากเมื่อทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบ มีการให้หรือการรับอิเล็กตรอนเป็นผลให้เกิดเป็นไอออน สำหรับธาตุชนิดเดียวกันพบว่าไอออนบวกมีขนาดเล็กกว่าอะตอมที่เป็นกลาง ($\text{Na}^+ < \text{Na}$) ส่วนไอออนลบมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมที่เป็นกลาง^[717, 718] ตัวอย่างเช่น อะตอมของ Pb มีขนาด 0.175 อังสตรอม ($\text{\AA}$) ไอออนบวกของ Pb (+4) มีขนาด 0.084 อังสตรอม (ภาพที่ 1, ตารางผนวกที่ 2)

สำหรับค่ารัศมีไอออน (ionic radius) ในภาพที่ 1 และ ตารางผนวกที่ 2 มีบางค่าที่แสดงค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะแสดงในรูปที่เป็นประจุไม่เท่ากัน เช่น จากภาพที่ 1 รัศมีของไอออนบวกของ Pb (+4) มีขนาด 0.084 อังสตรอม แต่จากตารางผนวกที่ 2 รัศมีของ ไอออนบวกของ Pb มีขนาด 1.19 อังสตรอม ทั้งนี้เพราะ ตารางผนวกที่ 2 แสดงรัศมีของ Pb ที่เป็นประจุ +2 นั่นเอง

3. ความแรงไอออน

ความแรงไอออน (ionic strength) เป็นค่าที่ใช้ประเมินระดับกิจกรรมหรือปฏิกิริยาทางเคมีของไอออนต่าง ๆ ในสารละลาย คำนวณได้จากสมการ^[720]

$$S = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย S คือ ความแรงไอออน

m_i คือ ความเข้มข้นของไอออน

z_i คือ ประจุของไอออนในสารละลาย

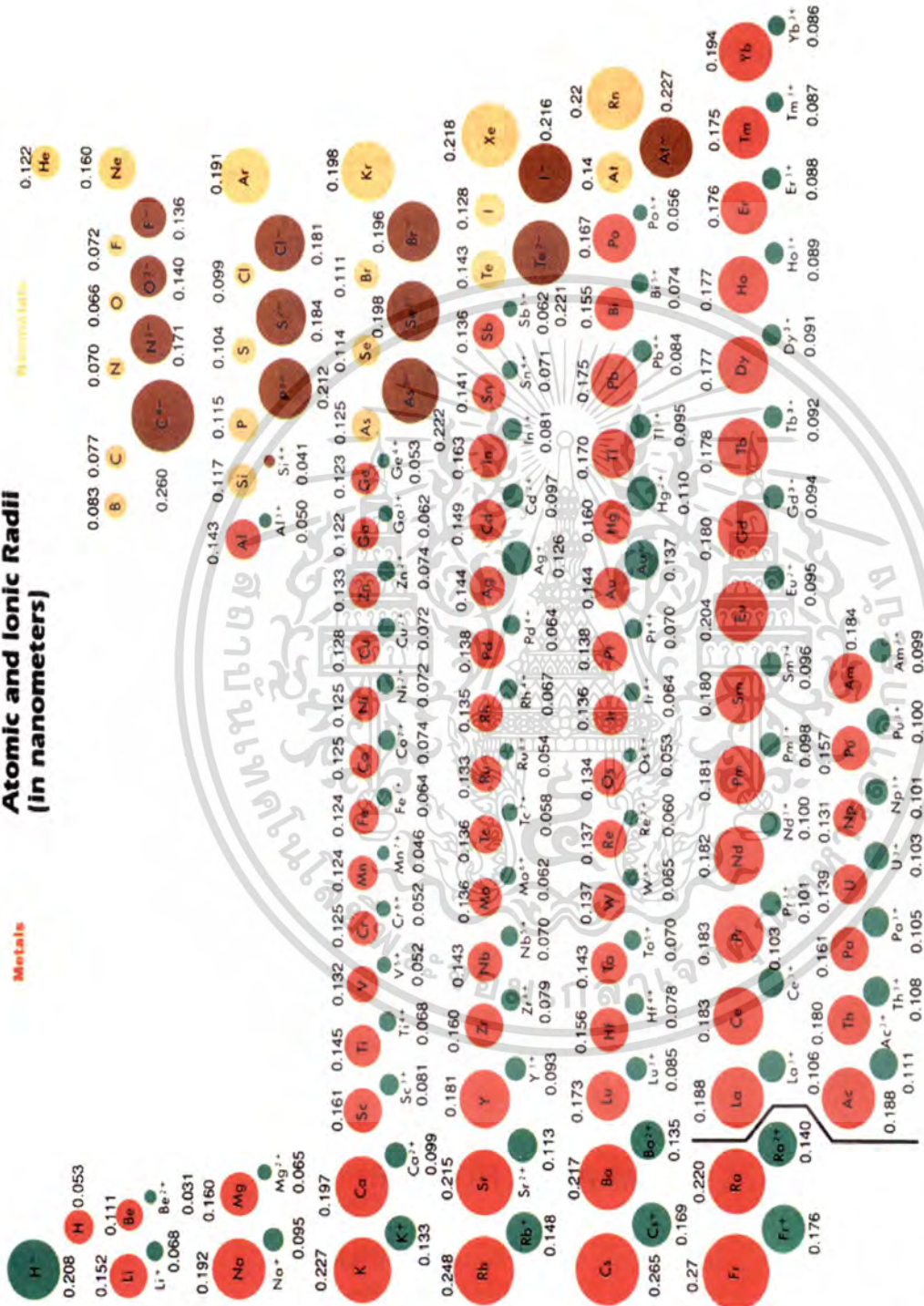
ตารางที่ 2 ตารางธาตุแสดงค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี

→ รัศมีอะตอม ลดลง → พลังงานไอออไนเซชัน เพิ่มขึ้น → อิเล็กโตรเนกาติวิตี เพิ่มขึ้น →																							
คาบ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
หมู่																							
1	H																		He				
	2.20																						
2	Li	Be																B	C	N	O	F	Ne
	0.98	1.57																2.04	2.55	3.04	3.44	3.98	
3	Na	Mg																Al	Si	P	S	Cl	Ar
	0.93	1.31																1.61	1.90	2.19	2.58	3.16	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
	0.82	1.00	1.36	1.54	1.63	1.66	1.55	1.83	1.88	1.91	1.90	1.65	1.81	2.01	2.18	2.55	2.96	3.00					
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
	0.82	0.95	1.22	1.33	1.60	2.16	1.90	2.20	2.28	2.20	1.93	1.69	1.78	1.96	2.05	2.10	2.66	2.60					
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
	0.79	0.89	1.27	1.30	1.50	2.36	1.90	2.20	2.20	2.28	2.54	2.00	1.62	2.33	2.02	2.00	2.20						
7	Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo					
	0.70	0.90																					

1216_242_255_347

ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://th.wikipedia.org> [216, 242, 255, 347]

Atomic and Ionic Radii (in nanometers)



ภาพที่ 1 รัศมีของอะตอมและไอออน (Å)

ที่มา : <http://www.boomeria.org> [281]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (density) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของวัตถุและปริมาตร การคำนวณค่าความหนาแน่นคำนวณได้จากสมการ

$$D=m/v$$

สมการที่ 5

โดย D คือ ความหนาแน่น

m คือ มวล

v คือ ปริมาตร

ส่วนความถ่วงจำเพาะของสารใด ๆ (specific gravity) คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น ของสารนั้นต่อความหนาแน่นของน้ำ (น้ำ = 1) ณ อุณหภูมิหนึ่ง (ตามปกติเป็นอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ความถ่วงจำเพาะมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ความหนาแน่นของธาตุต่าง ๆ แสดงในตารางผนวกที่ 3)

5. ค่าคงที่ความคงตัว

ค่าคงที่ความคงตัว (stability constant) หรือค่าคงที่การเกิด (formation constant, K_f) คือค่าคงที่สมดุล สำหรับสมดุลเกี่ยวกับการเกิดไอออนเชิงซ้อน ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของโลหะในการจับกับลิแกนด์ โดยโลหะเหล่านั้นจะถูกไฮเดรตด้วยโมเลกุลของน้ำ ค่าคงที่ของการเกิดพิจารณาจากการแทนที่ของลิแกนด์ที่แรงกว่าน้ำ

ค่าคงที่ความคงตัวของไอออนเชิงซ้อนคำนวณจาก

$$K = \frac{[ML]}{[M][L]}$$

สมการที่ 6

โดย K คือ ค่าคงที่ความคงตัว (แสดงผลในค่าลอการิทึม)

M คือ ปริมาณไอออนของโลหะ เช่น Zn^{2+}

L คือ ปริมาณลิแกนด์ เช่น อะซิเตท

ความเข้มข้นรวมทั้งหมดของโลหะ CM สามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$CM = [M] + [ML] \text{ ซึ่ง } [ML] = K[M][L]$$

สมการที่ 7

กลายเป็น $CM = [M](1 + K[L])$

สมการที่ 8

ดังนั้น
$$[M] = \frac{CM}{1 + K[L]}$$

สมการที่ 9

แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนของโลหะหรือ M ขึ้นกับค่าคงที่ความคงตัวของสารเชิงซ้อน และปริมาณลิแกนด์อิสระ ซึ่งปริมาณลิแกนด์อิสระก็ขึ้นอยู่กับค่า pK และ pH ของสารละลาย

หากมีค่าคงที่ความคงตัวต่ำ (ต่ำกว่า 1 จนถึงค่าติดลบ) หมายความว่าโลหะที่จับกับลิแกนด์นั้นจะละลายได้ดีในน้ำและจะแตกตัวเป็นไอออนได้ดีที่พีเอชต่ำ ซึ่งหากเป็นโลหะที่เป็นพิษเช่นแคดเมียม จะทำให้ถูกดูดซึมเข้าเนื้อเยื่อและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้^[223, 290, 309] (ค่าคงที่ความคงตัวแสดงในตารางผนวกที่ 4) โดยพบมีรายงานว่าโลหะหนักที่มีค่าคงที่ความคงตัวสูงจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับเช่นสาหร่ายได้สูง^[497]

6. การมีขั้ว

ค่าประจุไฟฟ้าของวัตถุขนาดใหญ่ มีค่าเท่ากับผลรวมของประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบ โดยปกติแล้วค่าประจุของวัตถุมีค่ารวมเท่ากับศูนย์ เนื่องจากตามธรรมชาติแล้วอะตอมหนึ่ง ๆ มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับโปรตอน ค่าประจุจึงหักล้างกันไป ส่วนกรณีที่ค่าประจุรวมไม่เท่ากับศูนย์นั้นมักจะเรียกว่า ไฟฟ้าสถิตแต่ในกรณีที่ผลรวมของค่าประจุเท่ากับศูนย์ แต่การกระจายตัวของประจุนั้นไม่สม่ำเสมอจะเรียกวัดถุนั้นว่ามีขั้ว (polarized) หากประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง นั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

พันธะที่เกี่ยวข้องในการดูดซับโลหะหนักโดยตัวดูดซับชีวภาพ

การดูดซับโลหะหนักโดยสิ่งมีชีวิตหรือตัวดูดซับชีวภาพนั้น มีพันธะที่เกี่ยวข้องเช่น พันธะโคเวเลนต์ พันธะไอออนิก และแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดคือ

1. พันธะโคเวเลนต์

พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) คือพันธะเคมี (chemical bond) ภายในโมเลกุลชนิดหนึ่ง พันธะโคเวเลนต์ เกิดจากอะตอมสองอะตอมใช้เวเลนซ์อิเล็กตรอนหนึ่งคู่หรือมากกว่าร่วมกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่รวมอะตอมเป็นโมเลกุลขึ้น อะตอมมักสร้างพันธะโคเวเลนต์เพื่อเติมวงโคจรอิเล็กตรอนรอบนอกสุดของตัวเองให้เต็ม ดังนั้นอะตอมที่สร้างพันธะโคเวเลนต์จึงมักมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่มาก เช่นธาตุหมู่ 6 และหมู่ 7 เป็นต้น พันธะโคเวเลนต์แข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนและมีความแข็งแรงพอ ๆ กับพันธะไอออนิก

พันธะโคเวเลนต์มักเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีใกล้เคียงกัน ธาตุอโลหะมีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะโคเวเลนต์มากกว่าธาตุโลหะซึ่งมักสร้างพันธะโลหะ เนื่องจากอิเล็กตรอนของธาตุโลหะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ ในทางกลับกันอิเล็กตรอนของธาตุอโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 โลหะหนัก

ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระนัก การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันจึงเป็นทางเลือกเดียวในการสร้างพันธะกับธาตุที่มีสมบัติคล้าย ๆ กัน อย่างไรก็ตามพันธะโคเวเลนต์ที่มีโลหะนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น พันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารอินทรีย์กับโลหะเป็นเครื่องมือสำคัญของกระบวนการสร้างพอลิเมอร์หลาย ๆ กระบวนการ เป็นต้น^[194]

2. พันธะไอออนิก

พันธะไอออนิก (ionic bond) เป็นแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวก (+) และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ (-) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ดังนั้นสารเคมีที่มีแรงยึดเหนี่ยวกันแบบนี้จะมีความแข็งแรงมาก โดยพันธะไอออนิกมักเป็นพันธะในสารประกอบซึ่งธาตุที่เป็นองค์ประกอบนั้นมีอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกันมากและจะอยู่ในสภาพที่เป็นไอออนบวกและไอออนลบ

3. แรงแวนเดอร์วาลส์

แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) หรือแรงลอนดอน (London forces) จะให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวต่ำมาก เป็นแรงอย่างอ่อน ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากแรงผลักดันระหว่างอิเล็กตรอนทำให้อะตอมเกิดความมีขั้วขึ้นชั่วขณะ จะทำให้อะตอมข้างเคียงเกิดความมีขั้วขึ้น ความแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์ ขึ้นกับมวลโมเลกุล ธาตุหรือสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลมากจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์มาก ส่วนธาตุหรือสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลน้อยจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์น้อย^[207]

บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

ALGAE AND ALGAL POLYSACCHARIDE

ความหมายของสาหร่าย [13, 424, 436, 714, 729]

สาหร่าย (algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรฟิลล์-เอ (chlorophyll a) เป็นรงควัตถุหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และได้คาร์โบไฮเดรตกับออกซิเจนเป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งมีกลไกทางชีวเคมีและขบวนการเมแทบอลิซึมคล้ายกับพืชชั้นสูง สาหร่ายมีลักษณะโครงสร้างแบบง่าย ๆ ไม่มีเนื้อเยื่อลำเลียง โดยสาหร่ายมีขนาดตั้งแต่เล็กมากประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว จนถึงขนาดใหญ่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก อาจเป็นเส้นสายหรือมีลักษณะคล้ายต้นของพืชชั้นสูง แม้สาหร่ายมีรูปร่างแบบง่าย ๆ แต่พบว่าสาหร่ายหลายชนิดมีการจัดระเบียบภายในเซลล์ที่ซับซ้อนกว่าพืชชั้นสูง เพราะภายในเซลล์แต่ละเซลล์ของสาหร่ายมีออร์แกเนลล์ (organelle) ต่าง ๆ มากกว่าในแต่ละเซลล์ของพืชชั้นสูง

สาหร่ายที่มีขนาดเล็ก (microalgae) มักมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จะสังเกตเห็นได้ต่อเมื่อมีการเพิ่มปริมาณมากในแหล่งน้ำ (บloom) ยกเว้นบางชนิดโดยเฉพาะพวกที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย เมื่อมีการเจริญเติบโตและเส้นสายรวมกันเป็นกลุ่มก้อน หรือสานกันเป็นแผ่นใหญ่ จะทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มย่อยคือ กลุ่มที่ล่องลอยในน้ำจะจัดเป็นสมาชิกของแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton/ free floating microalgae) ซึ่งจะล่องลอยอยู่ในน้ำตามคลื่นลมพัดพาไป และกลุ่มที่ยึดเกาะกับพื้นหรือวัสดุยึดเกาะอื่น ๆ (benthic microalgae)

สาหร่ายขนาดใหญ่ (macroalgae) เป็นสาหร่ายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีส่วนคล้ายราก ลำต้น ใบ รวมเรียกว่าทาลัส (thallus) โดยส่วนที่คล้ายราก ลำต้น ใบ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ชัดเจน สำหรับสาหร่ายขนาดใหญ่พวกที่มีส่วนคล้ายลำต้น และใบของพืชชั้นสูง จะพิจารณาแยกจากพืชชั้นสูงได้โดยพิจารณาจากเซลล์สร้างแกมีต หรือที่เรียกว่า gametangium ซึ่งเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่สร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) ซึ่งปกติมีเพียง 1 เซลล์ ถ้ามีเซลล์สืบพันธุ์หลายเซลล์ เช่นสาหร่ายไฟ (*Chara* หรือ stone-worts) จะพบว่าทุกเซลล์สามารถสืบพันธุ์ได้เอง (fertile) ซึ่งต่างจากพืชชั้นสูงที่เซลล์สืบพันธุ์จะมีหลายเซลล์เช่นกัน แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย ปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ชั้นนอกที่ห่อหุ้มจะเป็นหมัน (sterile) ส่วนสาหร่ายที่เป็นกลุ่มหรือโคโลนี (colony) มีหลายเซลล์อยู่รวมกัน จะสร้าง gamete ขึ้นใน 1 เซลล์เท่านั้น ไม่มีการทำงานร่วมกันระหว่างเซลล์ นอกจากนี้แม้มีลักษณะภายนอกคล้ายพืชชั้นสูง แต่พบว่าในสาหร่ายจะไม่มี vascular tissue (vascular tissue คือเนื้อเยื่อท่อลำเลียง ซึ่งเนื้อเยื่อท่อลำเลียงหลักที่สำคัญของพืชคือ ไซเล็ม (xylem) และโฟลเอ็ม (phloem) ทำหน้าที่ขนส่งน้ำ สารละลาย และสารอาหารภายในต้นพืช) ยกเว้น kelp (สาหร่ายสีน้ำตาลขนาดใหญ่) มี sieve cell ทำหน้าที่นำอาหาร เช่นเดียวกับที่พบในพืชพวกพัฒนาการต่ำกว่าไม้ดอก

ดังนั้นกล่าวได้คือ สาหร่ายประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสาหร่ายขนาดใหญ่ กับสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งในสาหร่ายขนาดเล็กยังประกอบไปด้วยสองกลุ่มย่อย ๆ คือ กลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กที่ลอยลอยอยู่ในน้ำเป็นอิสระที่เรียกว่าเป็นแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) กับกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กที่ยึดเกาะกับวัสดุยึดเกาะต่าง ๆ นั่นคือ

algae = macroalgae + microalgae (free-floating algae/ phytoplankton+benthic algae)

แหล่งที่อยู่ของสาหร่าย^[452, 716]

แหล่งที่อยู่ของสาหร่าย (habitat) สาหร่ายสามารถพบได้ทั่วไปทุกหนแห่ง และพบมีปริมาณมากขึ้นในสภาวะที่เหมาะสมกับสาหร่ายชนิดนั้น ๆ โดยแหล่งที่อยู่ของสาหร่ายแบ่งเป็นหลัก ๆ ได้คือ น้ำจืด ทะเล และในดิน

1. น้ำจืด

แบ่งเป็นสภาพแวดล้อมหลัก ๆ ได้ดังนี้

1.1. สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ จะพบพวกสาหร่ายที่เกาะบนพืช พบตามเปลือกไม้ ต้นไม้ ปากใบของใบไม้ (stomata) ดอกเห็ด โดยสาหร่ายพวกนี้อาศัยน้ำจากน้ำฝนหรือความชื้นในบรรยากาศ สาหร่ายพวกนี้ต้องมีการปรับตัวต่อความแห้งแล้งอันอาจเกิดขึ้นได้ สาหร่ายที่เกาะตามก้อนหิน หน้าผา มักเป็นสาหร่ายที่มีเมือกหุ้ม (gelatinous sheath) โดยสาหร่ายพวกนี้ได้รับความชื้นจากน้ำฝนและจากบรรยากาศ

1.2. สภาพแวดล้อมที่เป็นก้อนหินมีน้ำหยด บริเวณน้ำตก มักเป็นพวกที่มีส่วนล่างสุดของทลัสส์ที่ทำหน้าที่คล้ายรากทำหน้าที่ช่วยในการยึดเกาะกันการหลุดลอยของทลัสส์ไปตามกระแสน้ำ

1.3. สภาพแวดล้อมที่อยู่ในน้ำ

- แม่น้ำลำธาร บริเวณที่มีน้ำไหลแรง พวกนี้ปรับตัวให้แบน มีส่วนที่ยึดเกาะ มีลักษณะเป็นทลัสส์ที่เอนสู่ตามกระแสได้ โดยชนิดของสาหร่ายที่พบมากมักขึ้นกับค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มแสง ปริมาณอาหาร ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ และความเร็วของกระแส และแยกบริเวณที่พบหรือสิ่งยึดเกาะได้เป็น พวกยึดเกาะในแนวตั้ง (vertical substrate) เช่นบริเวณหน้าผา ก้อนหิน ชายฝั่งโคลน รากไม้ พืชในน้ำ บริเวณที่มีน้ำกระเซ็นถึง พวกยึดเกาะในแนวนอน (horizontal substrate) ตามก้อนหิน ทราบ ในโคลน และพวกที่ไม่ยึดเกาะ (free living) ส่วนใหญ่เป็นพวกแพลงก์ตอนพืช
- น้ำพุ (springs) แบ่งเป็นบริเวณแหล่งน้ำพุเย็นสาหร่ายที่พบในแหล่งนี้จะเรียกว่าเป็นพวก alkaliphilic algae ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบในแหล่งน้ำพุเย็นจะเป็นสาหร่ายในกลุ่ม alkaliphilic diatom ซึ่งเนื่องมาจากในบริเวณน้ำพุเย็นจะพบว่ามีค่า calcium ion, bicarbonate ion มาก ซึ่งทำให้น้ำเป็นด่างมาก ส่วนบริเวณน้ำพุร้อนสาหร่ายที่พบในแหล่งนี้จะเรียกว่าเป็นพวก thermophilic algae ซึ่งสาหร่ายที่พบมากในแหล่งน้ำพุร้อนจะเป็นกลุ่ม blue green thermophilic algae เนื่องจากในบริเวณที่เป็นน้ำพุร้อนนั้นมักอยู่ใกล้ภูเขาไฟจึงมีเกลือแร่ละลายอยู่ด้วยความเข้มข้นสูง และมีความเป็นด่างสูง
- น้ำเสีย มักพบพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) และสาหร่ายในกลุ่มยูกลีโนอิด (euglenoid) มาก ถ้าน้ำเสียน้อยจะพบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมาก สระน้ำและแอ่งน้ำในที่ลุ่ม มีน้ำขัง มีสภาพเป็นกรด มักพบสาหร่ายในกลุ่มไดอะตอม (diatom) และเดสมิด (desmid) มาก เช่นบริเวณป่าพรุ
- ทะเลสาบ มักพบสาหร่ายพวกที่ลอยลอยเป็นอิสระในน้ำเป็นส่วนใหญ่ และยังพบสาหร่ายอีกหลายกลุ่ม ได้แก่ สาหร่ายที่เกาะอยู่บริเวณผิวของก้อนหิน เกาะอยู่บริเวณผิวดินพืช เช่นบนผิวของต้นผักตบชวา แหนแดง เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวทราย อาศัยอยู่ในดินพืช เกาะอยู่ตามตัวสัตว์ เช่นบริเวณเปลือกหอย กระดองเต่า เกล็ดปลา สาหร่ายที่อาศัยอยู่ในตัวสัตว์ เช่น *Chlorella* อาศัยอยู่ใน *Hydra*, *Paramecium* สาหร่ายที่เกาะอยู่หรือขึ้นอยู่ตามผิวดตะกอน
- ในหิมะและน้ำแข็ง (snow and ice) โดยเรียกสาหร่ายที่พบในบริเวณนี้ว่าเป็นพวก snow algae พบแถบ arctic, antarctic บนยอดเขาสูง มีหิมะคลุมตลอด พวกนี้เป็นสาเหตุให้หิมะมีสีแดง เหลือง และเขียว หิมะมีสีแดงมักเกิดจาก *Chlamydomonas* ซึ่งมีแคโรทีนอยด์ที่เป็นรงควัตถุสีแดงและใช้เป็นเกราะป้องกันแสงได้ จึงพบว่าสาหร่ายมีปริมาณแคโรทีนอยด์มากเพราะหิมะมีสีขาว แสงจึงมากเกินความต้องการ สาหร่ายจึงต้องสร้างเกราะป้องกันแสงให้กับเซลล์ สาหร่ายพวกนี้จัดเป็นพวก kryoaalgae (kryoflora) คือหมายถึงเป็นสิ่งมีชีวิตที่ชอบความเย็น (kryophilic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยสำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทะเล

2.1. สาหร่ายที่อยู่บริเวณกลางมหาสมุทร (oceanic algae) บริเวณนี้จะพบสาหร่ายได้มากทั้งชนิดและปริมาณ ส่วนใหญ่สาหร่ายที่พบเป็นพวกไดอะตอมและไดโนแฟลเจลเลต (dinoflagellate) ในช่วงฤดูหนาวจะพบว่ามีความน้อย ส่วนในช่วงฤดูร้อนมีอุณหภูมิสูงจะพบว่ามีความสาหร่ายพวกไดโนแฟลเจลเลต ในช่วงฤดูหนาวมีอุณหภูมิต่ำมักจะพบสาหร่ายในกลุ่มไดอะตอมได้มาก

2.2. สาหร่ายที่อยู่บริเวณชายฝั่งซึ่งเป็นช่วงรอยต่อของมหาสมุทรและแผ่นดิน (coastal/neritic algae หรือ littoral region) บริเวณนี้สาหร่ายสามารถยึดเกาะกับพื้นได้เพราะน้ำตื้น โดยยังแบ่งได้เป็น

2.2.1. บริเวณที่อยู่ใต้น้ำตลอด (subtidal zone) บริเวณนี้ถ้ามีระดับความลึกที่ไม่มากเกินไป อยู่ในช่วงที่แสงส่องลงไปถึงพื้นได้ สาหร่ายก็สามารถขึ้นในบริเวณนี้ได้

2.2.2. บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (intertidal zone) เวลาที่น้ำขึ้นน้ำจะท่วมสาหร่าย เวลาที่น้ำลงสาหร่ายจะโผล่พ้นน้ำได้รับแสงแดดโดยตรง สาหร่ายที่อยู่บริเวณนี้ต้องทนต่อแรงกระแทกของน้ำ ดังนั้นสาหร่ายจะต้องมีส่วนที่ใช้ในการยึดเกาะที่แข็งแรง บริเวณหาดทรายมักพบสาหร่ายเป็นพวกไดอะตอม บริเวณที่เป็นหาดหินจะมีสาหร่ายขนาดใหญ่มีโครงสร้างยึดเกาะ สาหร่ายบางพวกมีเมือกหุ้มทลลัสช่วยให้ต้นไม้แห้งเวลาน้ำลงเช่นพวก *Fucus* ส่วนสาหร่ายที่อยู่บริเวณลึกลงไปจะมีส่วนคล้ายต้นและส่วนคล้ายใบยาวเพื่อช่วยให้สามารถรับแสงได้ในขณะที่น้ำขึ้น

2.2.3. บริเวณน้ำกระเซ็น (splash zone) มักพบสาหร่ายพวก *Enteromorpha* ซึ่งสาหร่ายพวกนี้มีความต้องการน้ำน้อย จึงสามารถขึ้นในบริเวณนี้ได้ดี

2.2.4. บริเวณเหนือน้ำขึ้นสูงสุด (supratidal zone) สาหร่ายที่ขึ้นในบริเวณนี้จะได้รับน้ำจากความชื้นในอากาศและจากละอองน้ำ

3. ดิน

พบว่า 1/3 ของสาหร่ายที่พบในดินเป็นพวก heterotrophs คือสามารถเจริญได้ในที่มีด เมื่อมีแหล่งคาร์บอน สาหร่ายบริเวณนี้สามารถพบได้ทั้งที่ผิวดินและพบในดินได้ลึกถึง 2 เมตร โดยจะพบสาหร่ายได้มากที่สุดที่บริเวณลึกจากผิวดิน 1 นิ้ว ซึ่งเป็นบริเวณที่สาหร่ายเจริญได้ดี เพราะแสงไม่มากหรือไม่เพียงพอ และอุณหภูมิไม่สูงเกินไป (autotroph หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่ใช้แหล่งสารอินทรีย์จากแหล่ง $C-CO_2$, $N-NO_3^-$, NH_4 salt ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วน heterotroph หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่ใช้แหล่งสารอินทรีย์จาก C, N ในการสังเคราะห์อาหาร)

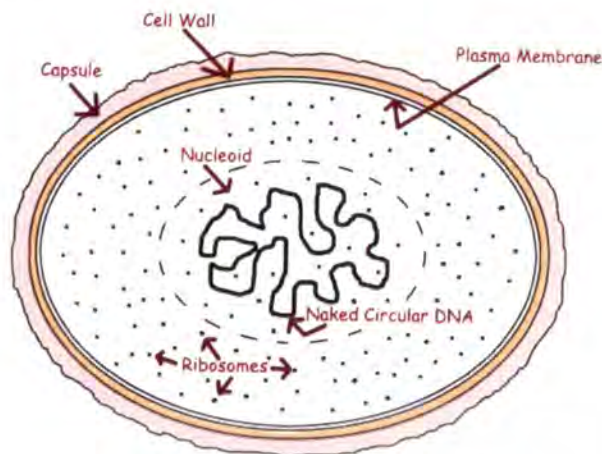
สาหร่ายที่อาศัยอยู่ในดินสามารถเพิ่มสารบางอย่างให้กับดิน เช่นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสีเขียว หรือเพิ่มสารประกอบไนโตรเจนให้ดินจากสาหร่ายพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สาหร่ายบางชนิดสามารถเพิ่มสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชหรือสารปฏิชีวนะให้กับดิน

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย^[424, 436, 621, 622, 624, 626, 636, 714, 729]

1. ส่วนประกอบของเซลล์

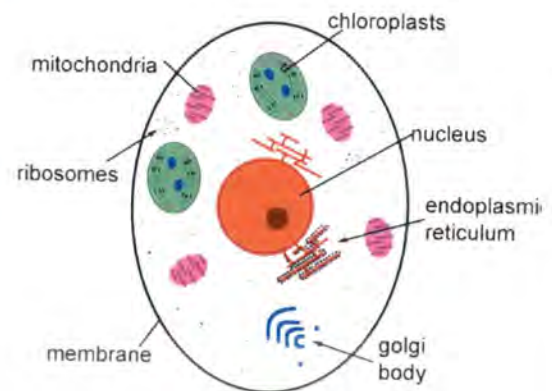
ส่วนประกอบเซลล์ของสาหร่ายมีส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ๆ คือ ผนังเซลล์ (cell wall) เมือกหุ้มเซลล์ (mucilage) ไซโทพลาซึม (cytoplasm) และนิวเคลียส (nucleus) โดยในแต่ละส่วนมีลักษณะดังนี้คือ

1.1. ผนังเซลล์ (cell wall) ผนังเซลล์ของสาหร่ายเป็นสารพวกคาร์โบไฮเดรตหรือซิลิเกต (silicate) สาหร่ายบางสกุลผนังเซลล์จะมีส่วนโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่พบในปริมาณน้อย และที่ภายนอกของผนังเซลล์อาจมีส่วนของหินปูน เหล็ก หรือไคติน (chitin) หุ้มอยู่ โดยทั่วไปแล้วผนังเซลล์ของสาหร่ายมี 2 ชั้น แต่ยกเว้นในสาหร่ายบางชนิดซึ่งอาจมีส่วนของผนังเซลล์ถึง 3 ชั้น พวกสาหร่ายที่มีผนังเซลล์ 2 ชั้นนั้น ผนังเซลล์ชั้นนอกจะเป็นเมือกหุ้มเซลล์ (gelatinous sheath/ mucilage) หรือมีลักษณะอ่อนนุ่ม ละลายในน้ำเดือด หรืออาจเป็นสารพวกเพกทิน (pectin) ส่วนผนังเซลล์ชั้นในของสาหร่ายนั้นจะเป็นสารพวกเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเซลล์ ทำให้เซลล์สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ในสาหร่ายบางพวกพบว่าไม่มีผนังเซลล์ที่แท้จริงมีเพียงเยื่อหุ้มเซลล์ (plasma membrane หรือ plasmalemma) ทำหน้าที่เหมือนผนังเซลล์ซึ่งเรียกผนังเซลล์แบบนี้ว่า periplast หรือ pellicle ผนังเซลล์แบบนี้บางชนิดอาจแข็งบางชนิดอาจอ่อน และในบางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเรียงตัวของแผ่นผนังเซลล์



A

โปรคาริโอต (prokaryotic cell)



B

ยูคาริโอต (eukaryotic cell)

ภาพที่ 1 ลักษณะเซลล์แบบโปรคาริโอตและยูคาริโอต

ที่มา : A: <http://coursev4files.cod.edu> [206]

B: www.scienceaid.co.uk [893]

1.2. นิวเคลียส (nucleus) องค์ประกอบที่สำคัญที่ประกอบเป็นนิวเคลียสคือส่วน nuclear membrane, nucleolus และ chromosome โดยสาหร่ายจะมีนิวเคลียสเป็นลักษณะในการแยกกลุ่มได้เช่นกัน โดยนิวเคลียสที่พบในสาหร่ายประกอบด้วย prokaryote nucleus เป็นพวกที่ยังไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริง (ภาพที่ 1A) และพวก eukaryote nucleus พวกที่มีนิวเคลียสแยกจาก cytoplasm อย่างแท้จริง (ภาพที่ 1B) ซึ่งสาหร่ายส่วนมากในแต่ละเซลล์มี 1 นิวเคลียส (uninucleate cell) แต่มียกเว้นในสาหร่ายบางชนิดมีมากกว่า 1 นิวเคลียส ใน 1 เซลล์ (multinucleate cell/ coenocytic cell) เช่นสาหร่ายสีเขียวสกุล *Cladophora* สำหรับตำแหน่งของนิวเคลียสนั้นอาจอยู่ตรงกลางเซลล์ ด้านข้างหรือด้านบนของเซลล์ก็ได้ สำหรับนิวเคลียสในสาหร่ายสีเขียวสกุล *Spirogyra* นั้นนิวเคลียสจะมีสายไซโทพลาซึม (cytoplasm) เชื่อมยึดจากนิวเคลียสไปยังผนังเซลล์ จึงทำให้นิวเคลียสแขวนลอยอยู่ในแวคิวโอล

1.3. ไซโทพลาซึม (cytoplasm) ส่วนประกอบสำคัญที่อยู่ในไซโทพลาซึมได้แก่ น้ำ สารเคมี และออร์แกเนลล์ต่าง ๆ เช่นพลาสทิด (plastid), ไพรีนอยด์ (pyrenoid), สติกมา (stigma), แวกิวโอล (vacuole)

1.3.1. พลาสทิด (plastid) ในส่วนของพลาสทิดนั้นอาจเรียกอีกชื่อคือ chromatophore ซึ่งเป็นที่รวมของรงควัตถุต่าง ๆ ภายในเซลล์ของสาหร่าย (ยกเว้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) โดยพลาสทิดจะแบ่งย่อยออกได้เป็นสองกลุ่มคือ leucoplast เป็นส่วนของพลาสทิดที่ไม่มีสี อีกกลุ่มหนึ่งคือ chromoplast เป็นส่วนของพลาสทิดที่มีสีทั้งหมด หรือเรียกเฉพาะพลาสทิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีสีเหลือง สีส้ม หรือสีแดง ส่วนที่เป็นพลาสติกสีเขียวจะมีชื่อเรียกเฉพาะว่าเป็น chloroplast ซึ่งมีส่วนประกอบของ chlorophyll อยู่ และลักษณะของ chloroplast จะมีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ มากมาย และอาจมีเพียง 1 ถึง 2 อันในแต่ละเซลล์ หรืออาจมีมากมาย

1.3.2. ไพรินอยด์ (pyrenoid) มีลักษณะกลมใส หรือไม่มีสี มีตำแหน่งอยู่ในหรืออยู่บนคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ยกเว้นสาหร่ายสีแดงกับไดโนแฟลเจลเลตซึ่งเม็ดแป้งหรือส่วนของอาหารสะสมจะกระจายอยู่ในไซโทพลาซึม โดยลักษณะโครงสร้างของไพรินอยด์คือมีแกนกลางเป็นโปรตีน มีชั้นแป้งหุ้มเป็น starch sheath มีแผ่นแป้งซึ่งเรียกว่า starch plate อยู่ชั้นนอกสุดของไพรินอยด์ หน้าที่ของไพรินอยด์ในสาหร่ายสีเขียวคือสร้างแป้ง ส่วนในสาหร่ายกลุ่มอื่น ๆ ไพรินอยด์มีหน้าที่สะสมอาหาร ดังนั้นไพรินอยด์ในสาหร่ายกลุ่มนี้จึงอาจหายไปในช่วงระยะโดยเฉพาะในช่วงที่ขาดแคลนอาหาร ไพรินอยด์สามารถแบ่งตัวได้ เซลล์สาหร่ายที่ยังอายุน้อยมักจะพบไพรินอยด์เพียง 1 อัน ส่วนเซลล์สาหร่ายที่มีอายุมากมีคลอโรพลาสต์ใหญ่ มักพบจำนวนไพรินอยด์มากขึ้น

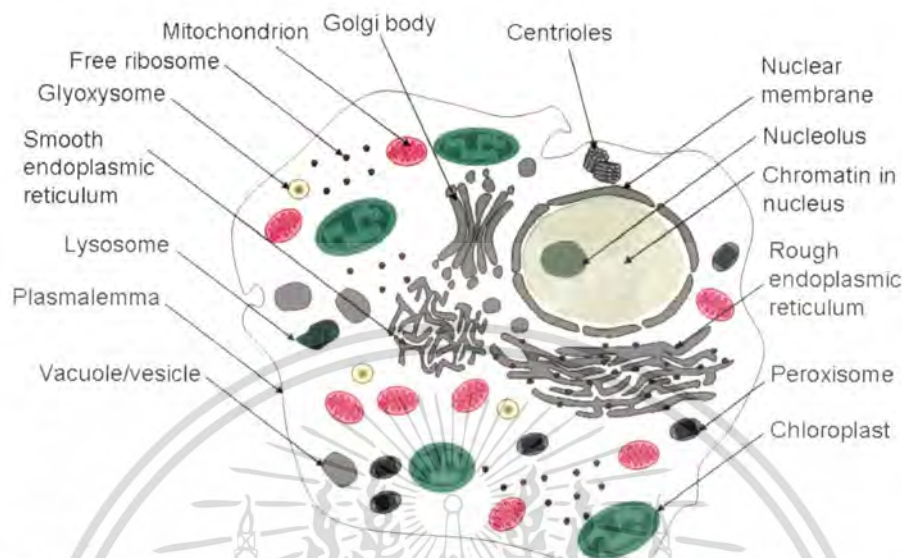
1.3.3. สติกมา (stigma/ eye spot) พบในเซลล์สาหร่ายที่เคลื่อนไหวได้ พบได้ทั้งเซลล์ปกติและเซลล์สืบพันธุ์ ลักษณะของสติกมาคือเป็นเซลล์สีแดง ภายในมีสารไวต่อแสงบรรจุอยู่ โดยสติกมามีหน้าที่รับแสง ส่งความรู้สึกไปยังหนวดซึ่งทำหน้าที่เคลื่อนไหว

1.3.4. แวกิวโอล (vacuole) มีลักษณะทั้งแบบที่เป็นจุดเล็ก ๆ จนถึงแบบที่มีขนาดใหญ่ สำหรับ แวกิวโอลในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบว่าไม่มีสีดำเพราะในแวกิวโอลมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่จำนวนมาก จึงเรียกแวกิวโอลในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินว่าเป็น pseudovacule หรือ gas vacuole ส่วน contractile vacuule พบในเซลล์สาหร่ายที่เคลื่อนไหวได้ ยึดหดตัวได้ และพบในไดอะตอมบางชนิด โดย contractile vacuule มีหน้าที่ขับน้ำและของเสียออกจากเซลล์

1.4. โครงสร้างอื่น ๆ เช่นไมโทคอนเดรีย (mitochondria) พวกนี้มีหน้าที่สร้างสารที่ให้พลังงาน (ATP) ให้กับเซลล์สาหร่าย ส่วนไรโบโซม (ribosome) ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน ในส่วนของ Golgi-apparatus ทำหน้าที่ขับสารที่ผลิตจากส่วนอื่น ๆ ของเซลล์ เช่นพวกฮอร์โมน เอนไซม์ ลิพิด ออกนอกเซลล์ และในส่วนของ endoplasmic reticulum มีหน้าที่ให้ ribosome มาเกาะ (ภาพที่ 2)

1.5. แฟลเจลลัม/ หนวด (flagellum) ใช้ในการเคลื่อนไหว พบได้ทั้งเซลล์ปกติ และเซลล์สืบพันธุ์ (ไม่พบในสาหร่ายสีแดงและสีเขียวแกมน้ำเงิน) อาจมีตั้งแต่ 1, 2, 4, 8 เส้น

จนถึงจำนวนมาก หนวดจะมีตำแหน่งที่อยู่หลายตำแหน่งแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของสาหร่าย



ภาพที่ 2 ลักษณะเซลล์แบบยูคาริโอตและองค์ประกอบในเซลล์
ที่มา : <http://www.flu.wikie.com> [305]

2. รงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง

การที่สาหร่ายมีสีต่าง ๆ มากมายทั้งสีเขียวแกมน้ำเงิน สีเขียว สีน้ำตาล สีแดง สีส้ม น้ำตาล แกมเหลือง ฯลฯ เนื่องจากมีรงควัตถุประกอบอยู่ในสาหร่ายนั่นเอง โดยรงควัตถุต่าง ๆ ของสาหร่ายโดยทั่วไปจะพบกระจายอยู่ในพลาสติด (chloroplast, chromoplast) แต่มียกเว้นในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินซึ่งรงควัตถุจะกระจายอยู่ในไซโทพลาซึม โดยรงควัตถุหลัก ๆ มี 3 กลุ่มคือ

2.1. คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นรงควัตถุที่มีสีเขียว ซึ่งประกอบด้วย chlorophyll a, b, c, d และ e ละลายในสารอินทรีย์ โดยคลอโรฟิลล์-เอ สามารถพบได้ในสาหร่ายทุกชนิด และคลอโรฟิลล์ทุกตัวจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสง แต่มีเพียงคลอโรฟิลล์-เอ เท่านั้นที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่วน คลอโรฟิลล์ตัวอื่น ๆ จะทำหน้าที่ดูดแสงและส่งต่อให้คลอโรฟิลล์-เอ เพื่อให้นำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

2.2. แคโรทีนอยด์ (carotenoid) มีหน้าที่รับแสงและส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ แบ่งเป็นสองกลุ่มหลัก ๆ คือ carotene ซึ่งเป็นรงควัตถุสีส้ม และ xanthophyll ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเหลือง ซึ่ง carotene แบ่งออกได้เป็น α , β , δ , ϵ - carotene โดยในสาหร่ายทุกชนิดจะพบว่ามี β -carotene เป็นรงควัตถุช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงอยู่ ส่วน xanthophyll แบ่งเป็นประเภท

ย่อย ๆ ได้อีก เช่น lutein, fucoxanthin, myxoxanthophyll ฯลฯ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่ากรณินที่รับสารหรือเพื่อหลีกเลี่ยงการฟ้องร้องหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. ไฟโคบิลิน (phycobilin) เป็นรงควัตถุที่รวมอยู่กับโปรตีนในรูปไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliprotein) พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง ไฟโคบิลินสามารถละลายได้ดีในน้ำ หน้าที่ของไฟโคบิลินคือมีหน้าที่รับแสงและส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ โดยไฟโคบิลิน แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้คือ phycocyanin และ allophycocyanin เป็นรงควัตถุสีน้ำเงิน โดยจะพบได้ในสาหร่ายสีแดง และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเกือบทุกชนิด มีหน้าที่รับแสงจากธรรมชาติและจาก phycoerythrin และส่งให้คลอโรฟิลล์-เอ ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อไป อีกกลุ่มคือ phycoerythrin เป็นรงควัตถุสีแดง โดยจะพบได้ในสาหร่ายสีแดงและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดเท่านั้น โดยมีหน้าที่รับแสงส่งให้ phycocyanin

3. รูปร่างลักษณะของสาหร่าย (ภาพที่ 3)

3.1. สาหร่ายที่เป็นเซลล์เดี่ยว (unicellular form/unicell) อาจเคลื่อนที่ได้หรือไม่ได้ และเรียกสาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่เคลื่อนไหวได้ว่า motile unicell หรือ flagellate unicell โดยพบว่าพวกที่มีหนวดจะเป็นพวกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนพวกที่ไม่มีหนวดอาจเป็นพวกที่เคลื่อนที่แบบอมีบา (amoeba) หรืออาจเคลื่อนที่ไม่ได้เลย

3.2. สาหร่ายที่เป็นกลุ่มเซลล์ (colonial form/colony) คือเซลล์ของสาหร่ายที่มีรูปร่างเหมือนกัน ทำหน้าที่อย่างเดียวกัน มาอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม โดยแบ่งการรวมกลุ่มเป็นรูปแบบย่อยได้อีกคือ

3.2.1. เป็นกลุ่มเซลล์ที่มีจำนวนเซลล์แน่นอน (coenobium colony) มีการเรียงตัวของเซลล์เป็นระเบียบ เมื่อมีการขาดหรือหักของเซลล์จะไม่มีการสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทน มีทั้งกลุ่มเซลล์ที่เคลื่อนที่ได้ และกลุ่มเซลล์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้

3.2.2. ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์ของสาหร่ายที่มีจำนวนเซลล์ไม่แน่นอน (aggregate colony) สร้างเซลล์ขึ้นใหม่ได้เมื่อมีการขาด หักของเซลล์ออกไป

3.2.3. ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีก้านมาเชื่อมต่อระหว่างเซลล์รวมเข้าเป็นกลุ่มไว้ด้วยกัน (dendroid colony) หรือมีส่วนโคนของแต่ละเซลล์มาแตะกันเชื่อมเป็นกลุ่มเซลล์

3.3. สาหร่ายที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย (filament) เกิดจากการที่เซลล์เดี่ยว ๆ มาเรียงต่อกันเพียงแถวเดียว ถ้าเป็นสายของสาหร่ายที่มีส่วนของเมือก (gelatinous sheath) มาหุ้มจะเรียกสาหร่ายลักษณะนี้เป็น filament และถ้าเป็นสายของสาหร่ายที่ไม่มีเมือกหุ้ม จะเรียกว่าเป็น trichome สำหรับลักษณะของ filament ยังแบ่งออกเป็น ลักษณะเป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง (unbranched filament) และลักษณะเป็นเส้นสายที่แตกแขนง (branch filament)

3.4. สาหร่ายที่มีลักษณะเป็นหลอดหรือท่อ (siphonous form) ไม่มีผนังกันเซลล์แต่ละเซลล์หรือแต่ละแขนง เซลล์จึงมีหลายนิวเคลียสอยู่ด้วยกัน ในระยะสืบพันธุ์จึงมีผนังมาปิดกันเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์

3.5. สาหร่ายที่มีทลัสเป็นหลอดหรือเป็นแผ่น (parenchymatous form) โดยสามารถแบ่งเซลล์ได้หลายทิศทางทั้งแนวระนาบและแนวตั้งฉาก

4. การสืบพันธุ์

4.1. การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual reproduction) แบ่งเป็น

4.1.1. การแบ่งเซลล์ (cell division) โดยทำการแบ่งเซลล์จากหนึ่งเป็นสอง จากสองเป็นสี่ไปเรื่อย ๆ ถ้าเป็นพวกเซลล์เดี่ยวเมื่อแบ่งเซลล์แล้วเซลล์ที่แบ่งใหม่จะหลุดเป็นอิสระจากเซลล์เดิมจะทำให้มีจำนวนเซลล์มากขึ้น ถ้าเป็นสาหร่ายที่เป็นกลุ่มเซลล์เมื่อทำการแบ่งเซลล์แล้วเซลล์ที่แบ่งได้ใหม่ยังอยู่กับกลุ่มเซลล์เดิม อาจอยู่ภายในเส้นสายเดิม หรือภายในเมือกหุ้มเดิมทำให้กลุ่มเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น

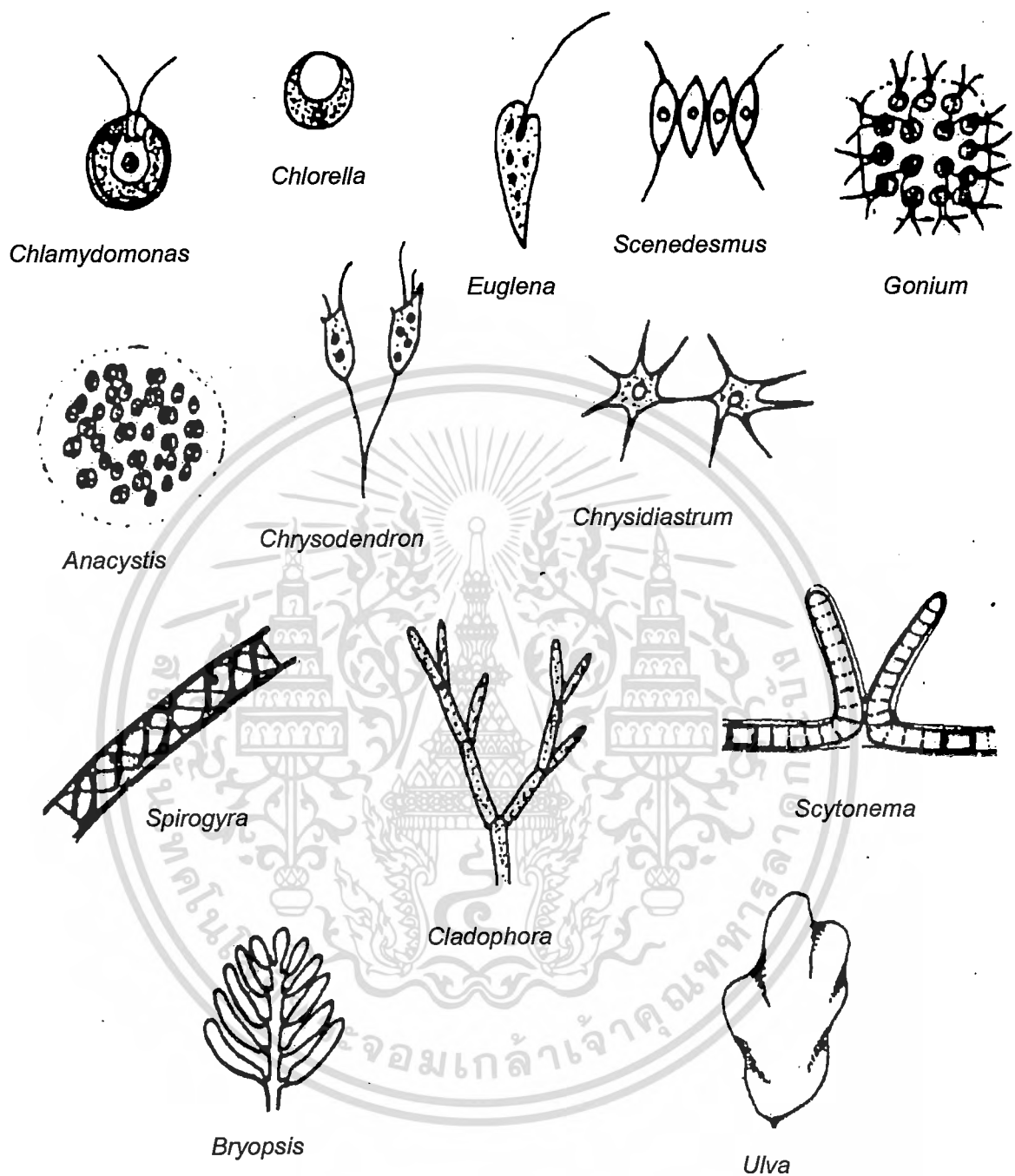
4.1.2. การแตกตัวของกลุ่มเซลล์ เป็นการสืบพันธุ์ของสาหร่ายที่เป็นกลุ่มเซลล์ โดยทำการแตกกลุ่มเซลล์หลักออกทำให้ได้กลุ่มเซลล์ย่อย ๆ จำนวนมาก และกลุ่มเซลล์ย่อยจะทำการแบ่งเซลล์จนได้เป็นกลุ่มเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ต่อไป

4.1.3. การขาดท่อน (fragmentation) เกิดในสาหร่ายพวกที่เป็นเส้นสาย โดยเมื่อสายหลักหรือสายแม่เจริญเต็มที่ จะทำการขาดท่อนของเซลล์ เมื่อเส้นสายขาดออกได้เป็นเส้นสายสั้น ๆ เส้นสายสั้นนั้นก็จะทำการแบ่งเซลล์จนเป็นเส้นสายที่มีความยาวต่อไป

4.1.4. การสร้างอะคิเน็ต (akinete) อะคิเน็ตมีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์หนาขึ้น มีการสะสมอาหารจำนวนมากอยู่ภายในเซลล์ เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนแตกต่างจากเซลล์ปกติอย่างเห็นได้ชัด การสืบพันธุ์แบบนี้พบในสาหร่ายพวกที่เป็นเส้นสาย การงอกของอะคิเน็ตอาจงอกเป็นต้นใหม่ได้เลย หรืออาจทำการสร้างสปอร์ก่อน แล้วสปอร์จึงหลุดออกไปงอกเป็นต้นใหม่ต่อไป

4.1.5. การสร้างสปอร์ (sporulation) มักเกิดจากสภาพแวดล้อมของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน สปอร์อาจเกิดในเซลล์ปกติหรือในอะคิเน็ตก็ได้

4.2. การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction) โดยการสร้างแกมีตเพศผู้ และเพศเมีย ขึ้นมาผสมกัน จะได้เป็นไซโกต (zygote) ที่มีผนังหนา ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้นาน และจะงอกเมื่อมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม



ภาพที่ 3 รูปร่างลักษณะสาหร่ายแบบต่าง ๆ

unicellular form : *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Euglena*

colonial form : *Scenedesmus*, *Gonium*, *Anacystis*

dendroid colony : *Chrysodendron*, *Chrysidiastrium*

filament : *Spirogyra*, *Cladophora*, *Scytonema*

siphonous form : *Bryopsis*

parenchymatous form : *Ulva*

ที่มา : กาญจนภาชนะ (2527)^[714] ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าโดยวิธีใดก็ตาม การนำข้อมูลไปใช้อื่นๆ นอกเหนือจากนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

สาหร่ายและการจับโลหะหนัก

ตัวดูดซับโลหะหนักที่นิยมนำมาศึกษามากที่สุดคือสาหร่าย เพราะมีวัตถุดิบอยู่มาก โดยมีหลักฐานพบว่าการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนโลกนั้น เกิดจากสาหร่ายถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเก็บสาหร่ายจากธรรมชาติมาเป็นอาหารหรือนำมาสกัดผลผลิตต่าง ๆ มีมากถึง 3 ล้านตันต่อปี โดยพบว่าผลผลิตที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีปริมาณให้เก็บเกี่ยวได้ สำหรับสาหร่ายสีแดงมีประมาณ 2.6 ล้านตัน และ สาหร่ายสีน้ำตาลมีสูงถึงประมาณ 16 ล้านตัน^[587] ดังนั้นจึงสามารถหาสาหร่ายจากธรรมชาติมาใช้ได้ง่าย และมีข้อดีอีกคือขนาดของสาหร่ายหลายชนิดมีขนาดใหญ่ สามารถกำจัดหลังจากการดูดซับโลหะหนักได้ง่าย การดูดซับโลหะหนักในสาหร่ายส่วนใหญ่เกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ซึ่งสาหร่ายมีผนังเซลล์ และองค์ประกอบที่ผนังเซลล์แตกต่างกันไปในแต่ละชนิด^[25, 26] การที่ผนังเซลล์มีลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของเซลล์ที่แตกต่างกัน ทำให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการจับโลหะหนักได้แตกต่างกัน ดังนั้นในบางครั้งจึงสามารถนำสาหร่ายมาเลือกจับเฉพาะโลหะหนักชนิดที่เฉพาะเจาะจงได้ หรือเลือกเฉพาะชนิดที่เราต้องการกำจัดได้

องค์ประกอบของผนังเซลล์ของสาหร่ายหลัก ๆ คือคาร์โบไฮเดรต ผนังเซลล์ชั้นนอกจะเป็นสารเมือก (mucilage/gelatinous sheath) หรืออาจเป็นสารพวเคทิน (pectin) ส่วนผนังเซลล์ชั้นในของสาหร่ายนั้นส่วนใหญ่จะเป็นสารพวเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่าย ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจถึงลักษณะของคาร์โบไฮเดรตก่อน จึงจะสามารถเข้าใจกลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์สาหร่ายได้

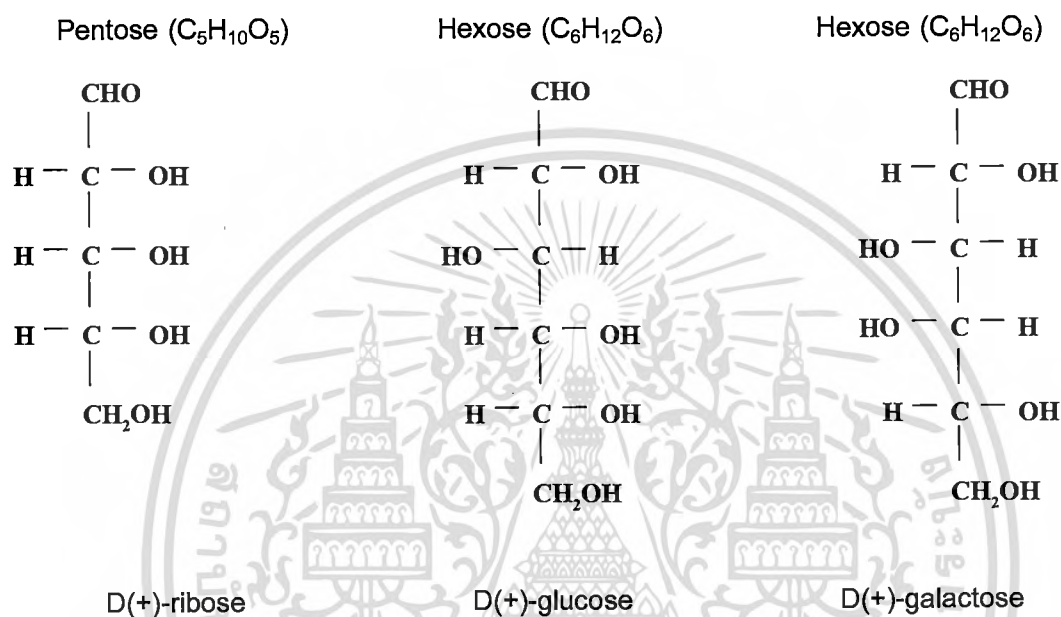
คาร์โบไฮเดรต^[424, 436, 532]

คาร์โบไฮเดรตคือ สารประกอบประเภทพอลิไฮดรอกซีอัลดีไฮด์ (polyhydroxy aldehydes) หรือ พอลิไฮดรอกซีคีโตน (polyhydroxy ketones) หรือเป็นสารประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำไปเป็นสารประกอบไดสารประกอบหนึ่งข้างต้น ตัวอย่างของคาร์โบไฮเดรต เช่น สารที่พืชสีเขียวสร้างขึ้นโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ น้ำตาล แป้ง เซลลูโลส เป็นต้น

ถ้าพิจารณาผลผลิตของปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำจะสามารถจำแนกคาร์โบไฮเดรตได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. มอโนแซ็กคาไรด์

มอโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) คือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานของการโบไฮเดรต มอโนแซ็กคาไรด์ไม่สามารถแตกตัวออกเป็นโมเลกุลเล็กโดยการแยกสลายด้วยน้ำได้ เช่น ไรโบส (ribose), กลูโคส (glucose) และ กาแล็กโทส (galactose) เป็นต้น (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ตัวอย่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวไรโบส กลูโคส และ กาแล็กโทสที่เป็น เพนโทส (pentose น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม) และ เฮกโซส (hexose น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม)

ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://www.fao.org> ^[304]

2. ไดแซ็กคาไรด์

ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) เป็นน้ำตาลที่เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำจะแตกออกเป็นมอโนแซ็กคาไรด์ 2 โมเลกุล ซึ่งอาจจะเหมือนกันก็ได้ เช่น ซูโครส (sucrose), แล็กโทส (lactose) และ มอลโทส (maltose)

3. พอลิแซ็กคาไรด์

พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide หรือ carbohydrate-polymer) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เกิดการแยกสลายด้วยน้ำให้ มอโนแซ็กคาไรด์จำนวนมาก พวกที่ให้มอโนแซ็กคาไรด์จำนวน 3 ถึง

10 โมเลกุลอาจแบ่งประเภทได้ว่าเป็น ออลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

พอลิแซ็กคาไรด์เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก เช่นแป้ง (starch) เซลลูโลส (cellulose) และไกลโคเจน (glycogen) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยมอโนแซ็กคาไรด์เพียงชนิดเดียว คือ D-กลูโคส พอลิแซ็กคาไรด์บางตัวประกอบด้วยหน่วยมอโนแซ็กคาไรด์มากกว่าหนึ่งชนิด

เซลลูโลส เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดตามธรรมชาติ เส้นใยในผนังเซลล์ของพืชทุกชนิดประกอบด้วยเซลลูโลส เซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำเมื่อให้ความร้อนและมีกรดซัลฟิวริกเจือจาง พันธะไกลโคซิดิกแตกออกให้ D-กลูโคส เซลลูโลสจึงเป็นพอลิเมอร์โซ่ตรงของ D-กลูโคส หลายพันธะที่ต่อกันด้วยพันธะ β -1, 4-ไกลโคซิดิก

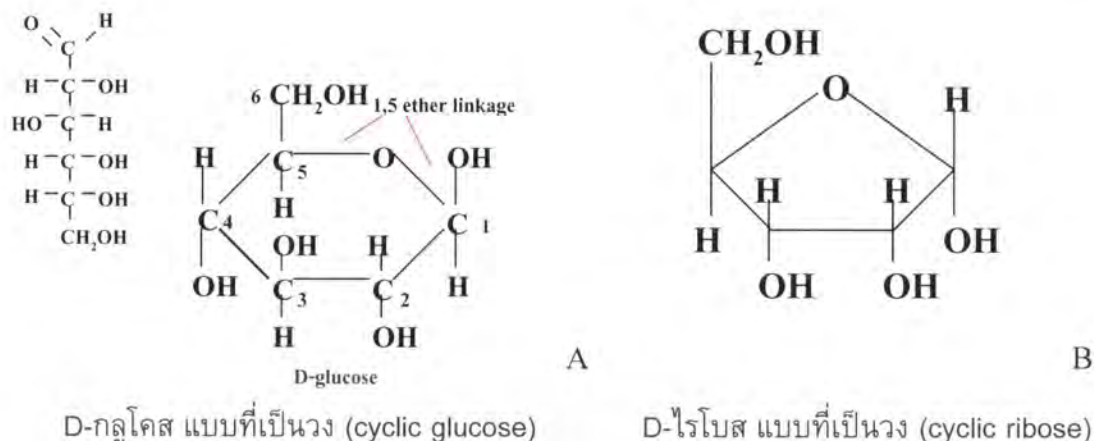
แป้ง พบในลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในไซโทพลาซึมของเซลล์พืช โดยแป้งมีส่วนผสมของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกทิน (amylopectin) ในแป้งมีอะไมโลสประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ และอะไมโลเพกทินประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์ อะไมโลสประกอบด้วยกลูโคส 200 – 1,500 โมเลกุล ซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาวแบบไม่มีกิ่งและขดเป็นเกลียวแบบเฮลิคัล ส่วนอะไมโลเพกทินมีโครงสร้างต่างจากอะไมโลสคือ นอกจากกลูโคสต่อเป็นโซ่ยาวแล้วยังมีการต่อแบบกิ่งด้วย โดยกลูโคสต่อกันเป็นโซ่ยาว 12 ถึง 25 โมเลกุล จะแตกกิ่งครั้งหนึ่งและส่วนที่เป็นโซ่กิ่งมีกลูโคสต่อกัน 20 ถึง 25 โมเลกุล อะไมโลเพกทิน ประกอบด้วยกลูโคส 2,000 – 200,000 โมเลกุล

สมบัติทางกายภาพของคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วหลายหมู่ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอนิล จึงละลายได้ดีมากในน้ำและตัวทำละลายมีขั้ว แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว คาร์โบไฮเดรตมีหมู่ไฮดรอกซิลหลายหมู่ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุล เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจน

คาร์โบไฮเดรตที่โมเลกุลไม่ซับซ้อนมาก เช่น กลูโคส สามารถที่จะมีโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ แบบที่เป็นไซคลิกคือเป็นวง กับแบบอะไซคลิกหรือโซ่เปิดคือไม่เป็นวง โดยในโมเลกุลของกลูโคสมีทั้งส่วนที่เป็นคาร์บอนิล และส่วนที่เป็นแอลกอฮอล์

D-กลูโคสโซ่เปิดเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาหมู่คาร์บอนิลได้ นอกจากน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลเฮกโซสจะสามารถมีโครงสร้างที่เป็นวงแล้ว D-ไรโบส (D-ribose) ซึ่งเป็นอัลโดเพนโทสก็สามารถอยู่ในรูปที่มีโครงสร้างเป็นวงห้าเหลี่ยมที่เสถียรได้เช่นกัน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 ลักษณะของ D-กลูโคส และ D-โรโบส แบบที่เป็นวง

ที่มา : A: ดัดแปลงจาก <http://www.palaeos.com> [332]

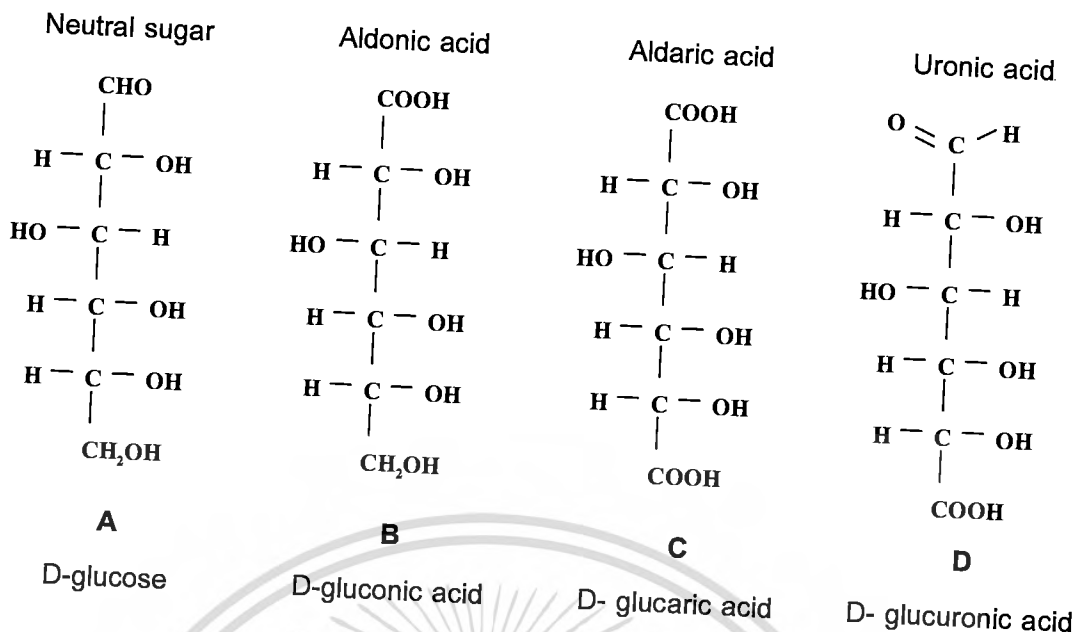
B: ดัดแปลงจาก <http://www.fao.org> [304]

คาร์โบไฮเดรตมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายประเภท ทั้งน้ำตาลที่เป็นกลาง (neutral sugar) และน้ำตาลที่อยู่ในรูปที่เป็นกรด (sugar acid/acidic sugar) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญในทางด้านการนำมาบำบัดโลหะหนัก น้ำตาลที่เป็นกรดคือน้ำตาลที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) อยู่ในโมเลกุล เกิดจากการ oxidation เพื่อสร้างกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) มีน้ำตาลที่เป็นกรดอยู่หลัก ๆ สามประเภทคือ aldonic, aldaric และ uronic acids (ภาพที่ 6)

- น้ำตาล aldonic acid เกิดเมื่อมีการ oxidation หมู่ aldehyde carbon จะทำให้เกิดเป็นน้ำตาล ตัวอย่างเช่น gluconic acid

- น้ำตาล aldaric acid จะสร้างจากการ oxidation ของทั้ง aldehyde carbon และ คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (C-6 carbon) ตัวอย่างของน้ำตาลในกลุ่มนี้เช่น D-glucaric acid ซึ่ง น้ำตาลกลุ่ม aldaric นี้พบว่ามีผลสำคัญต่อชีววิทยาน้อย

- ส่วนน้ำตาล uronic acid พบว่ามีความสำคัญในทางชีวภาพสูงมาก กลุ่มนี้เกิดจากการ oxidation คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ทำให้เกิดเป็นพวก glucuronic, galacturonic และ mannuronic acids เป็นต้น uronic acid มีความสำคัญทางด้านการลดพิษของยา และพบเป็นส่วนประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดด้วยกัน



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะของน้ำตาลกลูโคสที่เป็นกลาง และน้ำตาลที่เป็นกรด
ที่มา : A: ดัดแปลงจาก <http://www.steve.gb.com> ^[368]

B: ดัดแปลงจาก <http://www.steve.gb.com> ^[367]

C: ดัดแปลงจาก <http://www.steve.gb.com> ^[369]

D: ดัดแปลงจาก <http://www.fao.org> ^[304]

พอลิแซ็กคาไรด์ที่ผนังเซลล์สาหร่าย

องค์ประกอบของผนังเซลล์ของสาหร่ายหลัก ๆ คือคาร์โบไฮเดรต โดยพบไขมันและโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยแต่พบในปริมาณน้อย และที่ภายนอกของผนังเซลล์อาจมีส่วนของหินปูน เหล็ก หรือไคติน (chitin) หุ้มอยู่ ผนังเซลล์ชั้นนอกจะเป็นเมือก (mucilage/gelatinous sheath) หรืออาจเป็นสารพวกเพกทิน (pectin) ส่วนผนังเซลล์ชั้นในของสาหร่ายนั้นส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกเซลลูโลส^[147]

พอลิแซ็กคาไรด์ที่ผนังเซลล์สาหร่าย (cell wall polysaccharide) (พอลิแซ็กคาไรด์ก็คือคาร์โบไฮเดรตที่เกิดการแยกสลายด้วยน้ำให้มโนแซ็กคาไรด์) สามารถแบ่งเป็นกลุ่มคร่าว ๆ คือกลุ่มที่ละลายในน้ำ (water-soluble polysaccharide) และกลุ่มที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยในน้ำ (water-insoluble polysaccharide) ซึ่งกลุ่มที่ไม่สามารถละลายน้ำได้นั้นส่วนใหญ่แล้วจะเกาะติดอยู่ที่ผนังเซลล์ ส่วนในกลุ่มที่ละลายในน้ำได้นั้นส่วนใหญ่จะเป็นเมือกที่ล้อมรอบอยู่รอบ ๆ เซลล์ มักอยู่ห่างจากผนังเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนของเพกทิน นอกจากพวกเพกทินแล้วเมือกที่ผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์สาหร่ายยังประกอบด้วยพวกละอองประกอบอื่น ๆ เช่น agarose, algin, carrageenan, xylan ซึ่งมักพบในสาหร่ายสีแดง fucoïdan, laminaran ซึ่งมักพบในสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นต้น

โดยทั่วไประหว่างที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตจะมีการปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์^[128, 494, 495, 655] (exopolysaccharides, extracellular polysaccharide/EPS) โดยมีส่วนหนึ่งที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์หรือละลายอยู่ในอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงซึ่งยังคงเรียกว่าเป็นส่วน EPS และอีกส่วนหนึ่งที่เคลือบเกาะอยู่ที่เซลล์ ลักษณะเป็นเมือกหุ้มเซลล์จะได้เรียกว่าเป็นส่วนแคปซูลาร์พอลิแซ็กคาไรด์ (capsular polysaccharide/CPS) ส่วนของ CPS ที่ล้อมรอบติดเซลล์อาจเกิดการจับตัวเป็นสารเชิงซ้อนกับประจุบวกของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ ซึ่งลักษณะเหล่านี้เป็นลักษณะที่สำคัญที่จะนำสาหร่ายไปสร้างเป็นแผ่นสำหรับกำจัดโลหะหนักคือสร้างเป็นฟิล์มชีวภาพ (biofilm หรือ biogranule) ขึ้นมา เพราะพวกนี้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดี

ผนังเซลล์ของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยส่วนเมือกที่สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนนี้ประกอบด้วยน้ำตาลเช่น glucose, xylose, mannose, galactose, arabinose, rhamnose, fucose, galactose, glucuronic acid, galacturonic acid, sulfuric acid, pyruvic acid เป็นต้น^[178, 432] ซึ่งเมือกที่หุ้มติดที่ผนังเซลล์ด้านนอกนั้นจะมีบทบาทที่สำคัญในการดูดซับแร่ธาตุหรือโลหะหนัก เนื่องจากชั้นเมือกนี้จะมีกลุ่มของ uronic acid หรือกรดยูโรนิกเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ผนังเซลล์สาหร่ายจะแสดงบทบาทที่สำคัญในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก คือมีบทบาทในการจับไว้ที่ผิวเซลล์และการนำเข้าเซลล์^[432, 433, 587] ซึ่งลักษณะของเมือกในสาหร่ายแต่ละกลุ่มนั้นอาจแตกต่างกันไป ตัวอย่างของเมือกหรือพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่ละลายน้ำได้แก่ pectin, agarose, carrageenan, fucoïdan, laminaran^[432] (ภาพที่ 7)

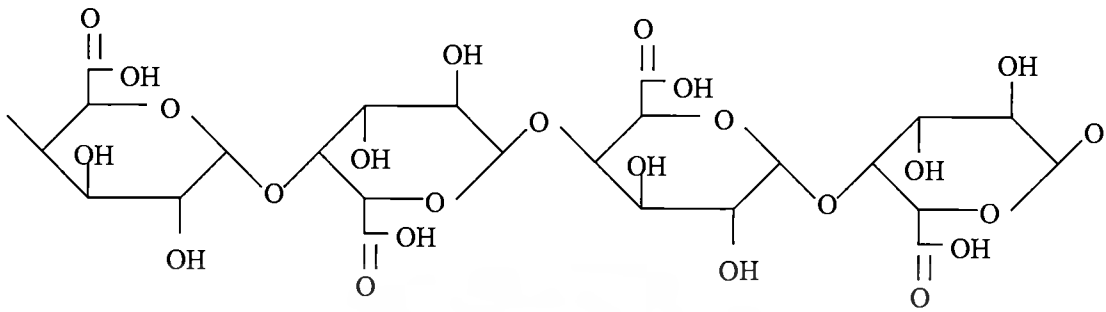
- pectin ประกอบด้วยน้ำตาล arabinose, galactose และ galacturonic acid (ภาพที่ 7A)

- agarose หน่วยย่อยของ agarose ประกอบด้วย 1,3-linked beta-D-galactopyranose และ 1,4-linked 3,6-anhydro-alfa-L-galactopyranose (ภาพที่ 7B)

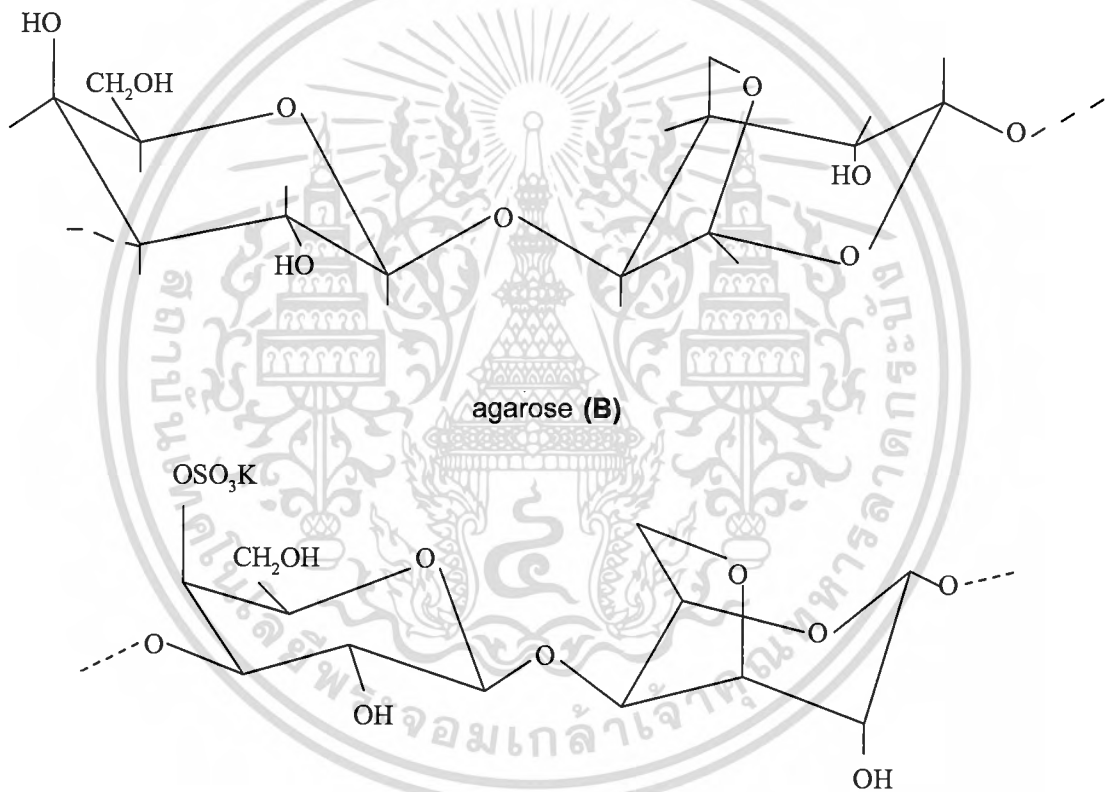
- carrageenan เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ D-galactose-3,6-anhydro-, D-galactose (ภาพที่ 7C)

- fucoïdin หรือ fucoïdin เป็นกลุ่มของ sulphated polysaccharides พบ ester sulphate และ fucose เป็นองค์ประกอบ (ภาพที่ 7D)

- laminan หรือ laminarin เป็นส่วน β -glucan ที่ละลายน้ำ พบได้ในสาหร่ายสีน้ำตาลเป็นหลัก และพบในกลุ่ม Chrysophyceae ด้วย พบได้สูงถึง 20-36 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้งของสาหร่าย โดยพบว่ามีส่วนที่ละลายในน้ำเย็นได้ด้วยเช่นกัน โครงสร้างเป็นสายตรงของ β -1,3-linked glucan (ภาพที่ 7E)



pectin (polygalacturonic acid) (A)



carrageenan (C)

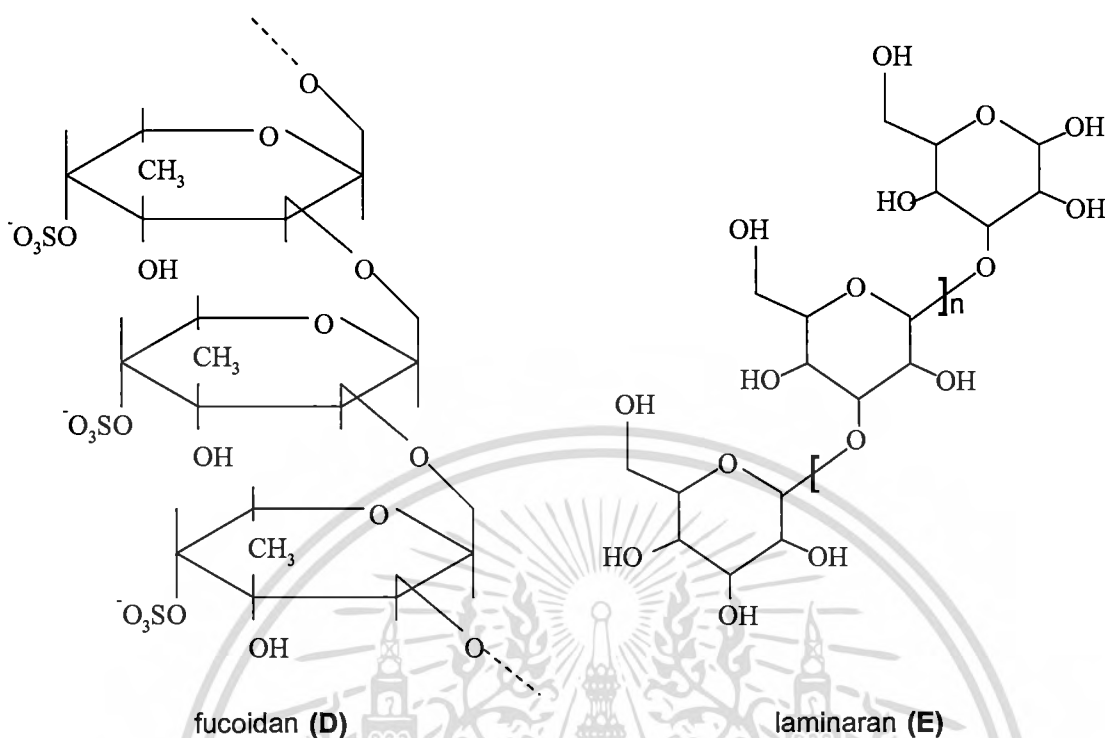
ภาพที่ 7 พอลิแซ็กคาไรด์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่าย

ที่มา : A: ดัดแปลงจาก <http://www.food-info.net>^[306]

B: ดัดแปลงจาก <http://www.cermav.cnrs.fr>^[287]

C: ดัดแปลงจาก <http://www.cybercolloids.net>^[295]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ 5 สำหรับและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7 (ต่อ)

ที่มา : D: ดัดแปลงจาก www.cactusbotanics.com [686]

E: ดัดแปลงจาก <http://www.sinicearasy.cz> [360]

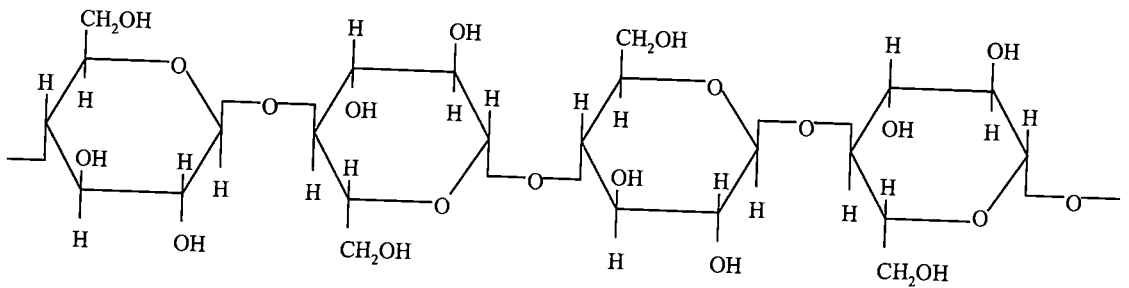
พอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble polysaccharide) ที่สกัดจากผนังเซลล์สาหร่ายนั้นจะประกอบด้วย cellulose, xylan, mannan, alginic acid, fucinic acid, chitin เป็นต้น^[432] โดยมีลักษณะของแต่ละชนิดคือ

- cellulose เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวของกลูโคส เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ ทำหน้าที่เสริมโครงสร้างของเซลล์ให้แข็งแรง เซลลูโลส ประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ที่จัดเป็นเส้นยาวตรงเชื่อมต่อกันด้วย β -1:4-glycosidic bonds ผนังเซลล์ที่เป็นเซลลูโลสพบได้ในสาหร่ายสีแดง สีนํ้าตาล สีเขียว สาหร่ายไฟ ส่วนในสาหร่ายสีเขียวแกมนํ้าเงินไม่มีหลักฐานว่ามีเซลลูโลสที่ผนังเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในบางสกุลของ สาหร่ายสีเขียวแกมนํ้าเงินเช่นสกุล *Nostoc* มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ (ภาพที่ 8A)

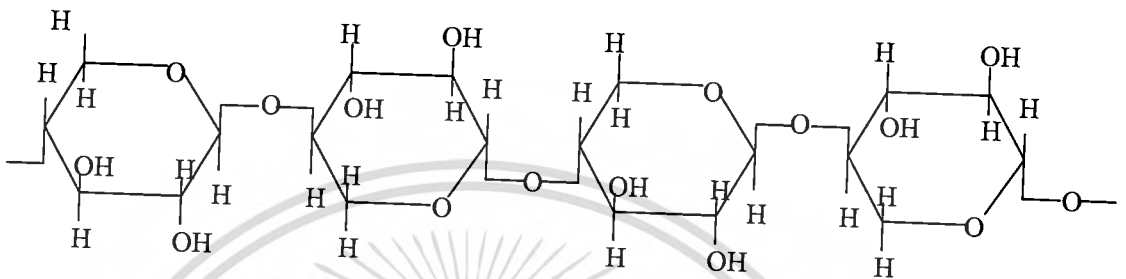
- xylan ละลายในด่าง ประกอบด้วยสายของ β -1:3-linked D-xylose มีองค์ประกอบหลักคือ xylose และพบมี uronic, glucuronic acid ด้วย พบในสาหร่าย สีแดง และสีเขียว บางชนิด (ภาพที่ 8B)^[357]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าโดยวิธีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

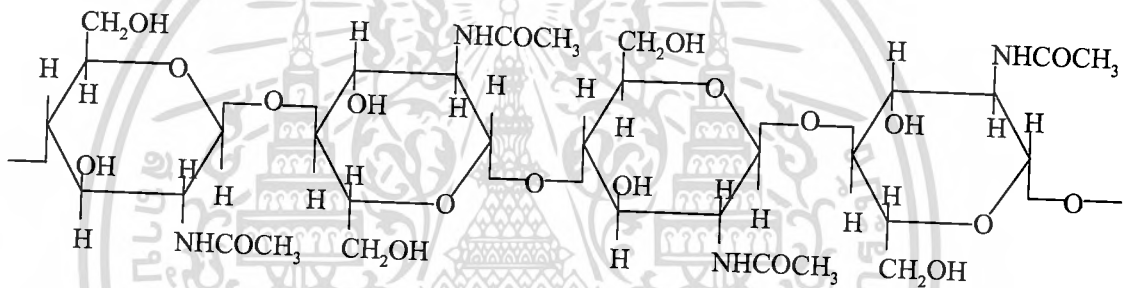
บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย



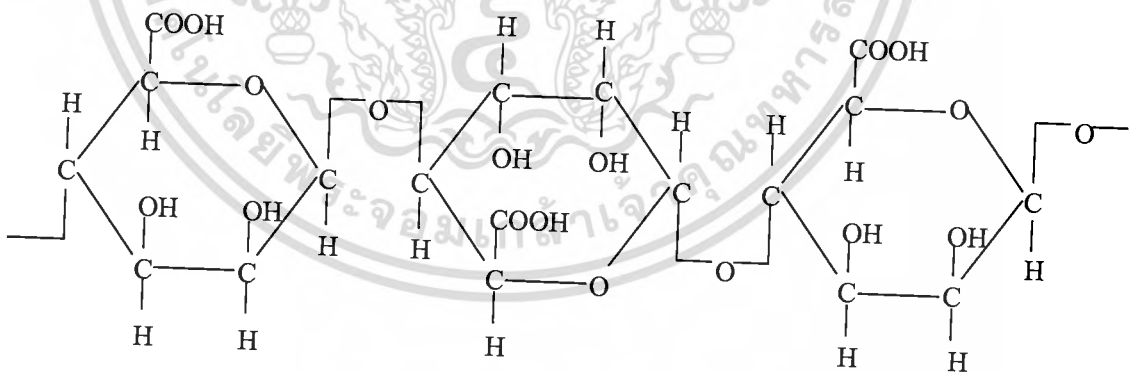
cellulose (A)



xylan (B)



chitin (C)

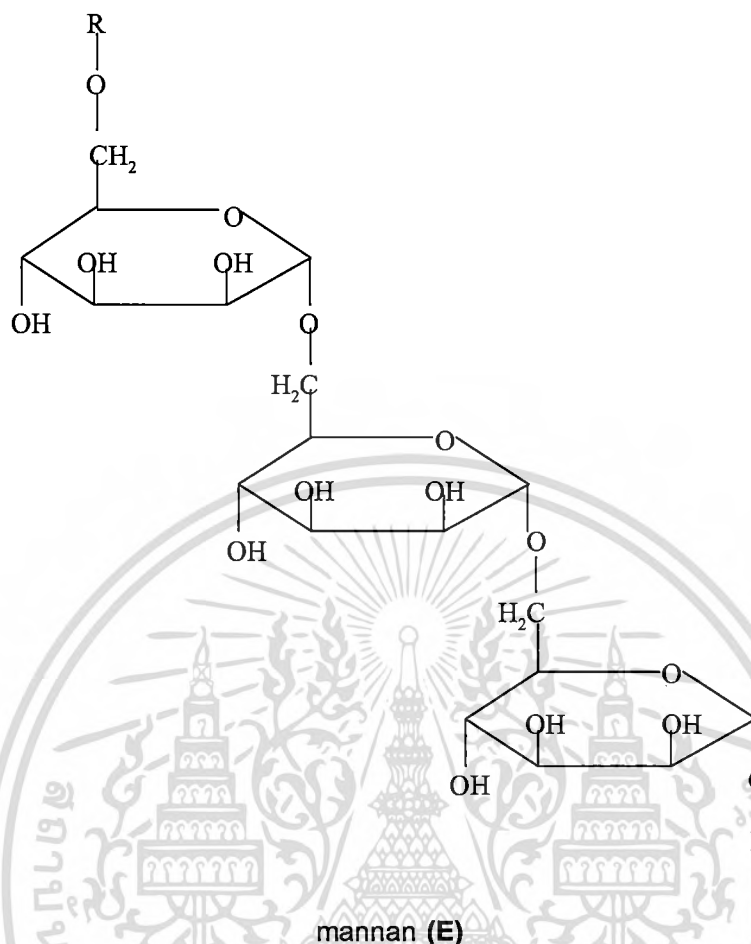


alginic acid (D)

ภาพที่ 8 พอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำชนิดต่าง ๆ ที่พบที่ผนังเซลล์สาหร่าย
ที่มา : A, B, C: ดัดแปลงจาก <http://www.scientificpsychic.com>^[356]

D: ดัดแปลงจาก <http://food.oregonstate.edu>^[220]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8 (ต่อ)

ที่มา : E: ดัดแปลงจาก <http://www.biosite.dk> [280]

- chitin เป็นสายของ N-Acetyl-D-glucosamine พบในสาหร่ายสีเขียวบางชนิด แต่พบที่ผนังด้านนอกของผนังเซลล์เท่านั้น เช่นพบในสาหร่าย *Cladophora* (ภาพที่ 8C)

- alginic acid เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล ซึ่งมี polyuronic acid อยู่ด้วย ซึ่งไม่พบในสาหร่ายดิวิชันอื่น ๆ โดยพบว่ามีประมาณ 10-25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งของสาหร่ายสีน้ำตาล ประกอบด้วย mannuronic acid เป็นองค์ประกอบหลัก (ภาพที่ 8D)

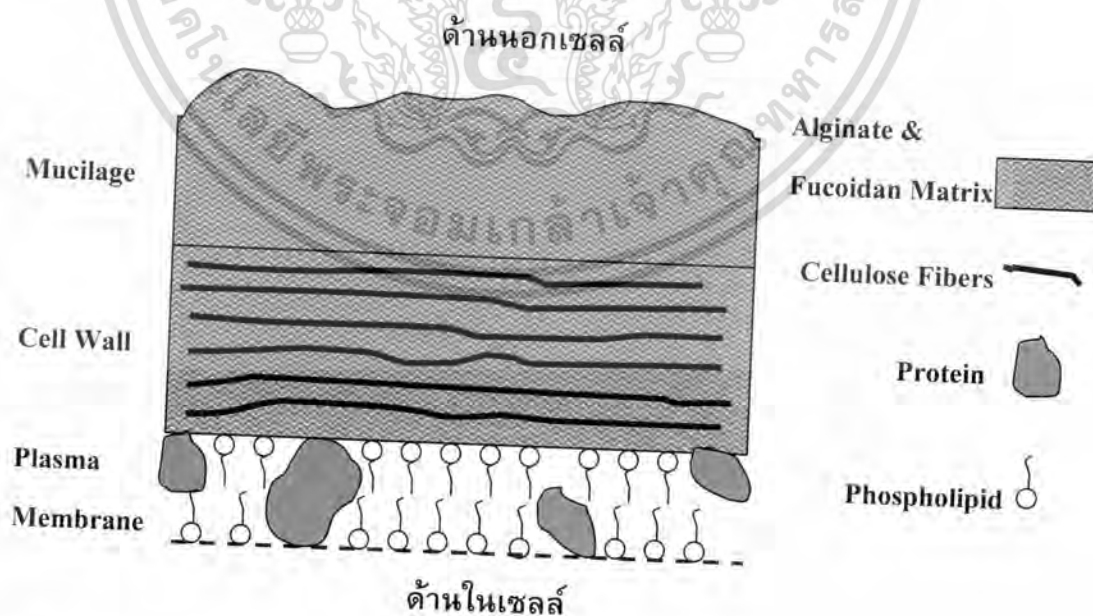
- mannan เป็นพวกที่ละลายในด่าง ประกอบด้วยสายของ β -1:4-linked D-mannopyranose พบในผนังเซลล์ของสาหร่ายสีแดง *Porphyra* สาหร่ายสีเขียวพวก *Codium*, *Acetabularia* เป็นต้น โดยน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลักของ mannan คือ mannose (ภาพที่ 8E)

- fucinic acid พบในสาหร่ายสีน้ำตาล อยู่ในรูปของเกลือแคลเซียมและกรด alginic acid ซึ่ง fucinic acid เป็น dipentose-dicarboxylic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังเซลล์ของสาหร่ายกับการดูดซับโลหะหนัก

การดูดซับโลหะหนักในสาหร่ายส่วนใหญ่จะเกิดที่ผนังเซลล์ (cell wall) เป็นหลัก ผนังเซลล์ของสาหร่ายประกอบด้วยเส้นใยที่มีโครงสร้างของเส้นใยขนาดเล็ก (fibril) และองค์ประกอบที่อยู่ในโครงร่างของเส้นใยแตกต่างกันไป โดยเส้นใยส่วนใหญ่คือเซลลูโลส แต่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วย mannan หรือ xylan ในสาหร่ายสีเขียวที่มีรูปร่างเป็นหลอด ท่อ หรือในบางสกุลของสาหร่ายสีแดง และพบว่าในสาหร่ายสีน้ำตาลและสีแดงมีอัสสนฐานพอลิแซ็กคาไรด์ (amorphous matrix polysaccharide) ประกอบอยู่ปริมาณมาก ส่วนในสาหร่ายสีน้ำตาลมี alginic acid เป็นองค์ประกอบหลัก และมีซัลเฟตพอลิแซ็กคาไรด์ (sulfated polysaccharides) เช่นพวก fucooidan polysulfate (ภาพที่ 9) ส่วนในสาหร่ายสีแดงจะมี sulfated galactans เช่น agar, carrageenan, porphyran เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนสาหร่ายสีเขียวผนังเซลล์จะประกอบด้วย complex heteropolysaccharides (เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยมอโนแซ็กคาไรด์หลาย ๆ ชนิดมาต่อกัน และมักจะพบน้ำตาลอะมิโนรวมอยู่ด้วย) ที่มีพวก galactose, arabinose, xylose, rhamnose และ glucuronic หรืออาจมี sulfate เป็นองค์ประกอบรวม โดยสารชีวโมเลกุล (biopolymer) เหล่านี้ทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักได้ดี ตัวอย่างสารชีวโมเลกุลที่พบในสาหร่ายกลุ่มต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1 และองค์ประกอบของสารชีวโมเลกุล แสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 9 ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล

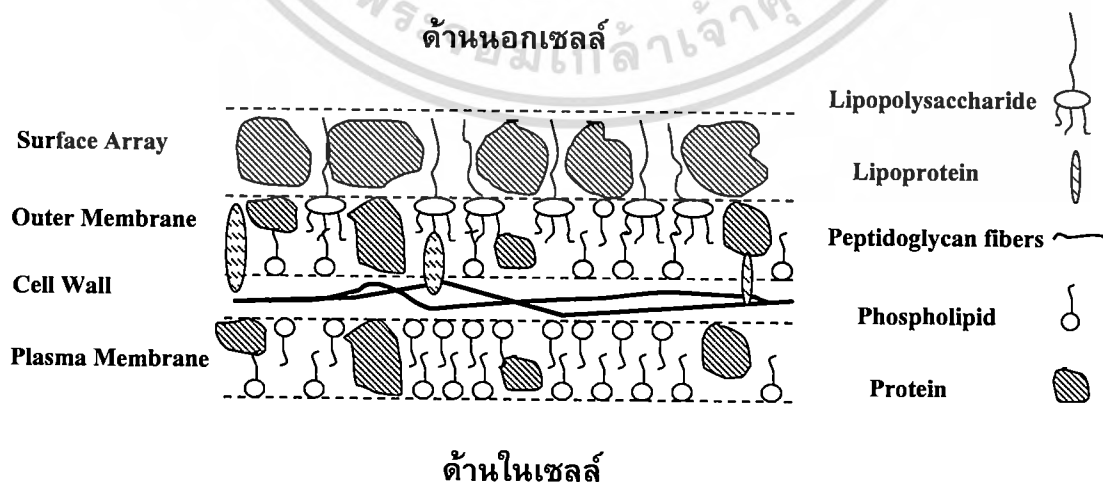
ที่มา : ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000)^[587]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 5 สาหร่ายทะเลพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้นกลุ่มของกรดที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักเป็นหลัก คือหมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ใน uronic acid หรือน้ำตาลที่เป็นกรด เช่น guluronic, glucuronic, mannuronic อาจพบใน sulphonate group ได้ด้วย สำหรับ hydroxyl group พบในพอลิแซ็กคาไรด์ทุกชนิด และจะให้ประจุลบได้เมื่อพีเอชมากกว่า 10 เท่านั้น^[587]

หมู่คาร์บอกซิลที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลักที่จับโลหะหนัก พบได้มากในสาหร่ายสีน้ำตาลเป็นเพราะมี alginic acid เป็นองค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วย mannuronic, guluronic acid ซึ่งมีมากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งของสาหร่ายสีน้ำตาล หมู่คาร์บอกซิลจะพบน้อยใน glucuronic ของสาหร่ายสีเขียว และสีแดง ส่วน sulfonate group จะพบมากในสาหร่ายสีแดง เพราะมี carrageenan, porphyran และ agar และยังพบ sulfonate group ใน fucoidan ของสาหร่ายสีน้ำตาลและใน sulfated heteropolysaccharides ของสาหร่ายสีเขียว โดยเฉพาะในสาหร่ายสีเขียวยังพบหมู่ฟังก์ชันของ amino acid (hydroxyl, carboxyl, sulfhydryl, amine, imine, amide, และ anidazole) ด้วย ซึ่งพวกนี้จะประกอบอยู่ที่ผนังเซลล์และทำหน้าที่จับโลหะหนักได้เช่นกัน (ตารางที่ 1, 2)

ส่วนผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ (ภาพที่ 10) (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีโครงสร้างผนังเซลล์คล้ายแบคทีเรียแกรมลบ) มีส่วนของ peptidoglycan อยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักผนังเซลล์ทั้งหมด ในส่วน peptidoglycan จะมี glucosamine และ muramic acid ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ปลายสายของกรดอะมิโน และยังมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่กรดอะมิโนต่าง ๆ เช่น asparagines, lysine, cysteine หรือ aspartic acid และมีส่วน lipopolysaccharide และ lipoprotein อยู่ที่ด้านนอกของผนังเซลล์ (outer membrane) ซึ่งจะมีกลุ่ม phosphonate (ตารางที่ 2) ทำหน้าที่สร้างประจุลบที่ผิวนอกทำให้เกิดการจับกับประจุบวกได้



ภาพที่ 10 ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000)^[587]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

ตารางที่ 1 สารชีวโมเลกุล (biomolecule) ที่พบในสิ่งมีชีวิตกลุ่มต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการดูดซับโลหะหนัก

กลุ่มสิ่งมีชีวิต	polysaccharide			with carboxyl		sulfonate		second amine		phosphonate		หมายเหตุ
	cell	Man	Xyl	Muc	Alg	Sgal	Fuc	Cti	PG	LPS	PLi	
Rhodophyta	f	(x)	(f)		(x)	x						(PC), (Ca)
Chlorophyta	f	(f)	(f)	x								(no), (PC), (Ca)
Charophyta	f											Ca
Euglenophyta												No, PC, (lor)
Phaeophyta	f				x		x					
Pyrrophyta	(x)			x								(no), theca
Chrysophyta	(f)			(x)				(x)				(no), (lor), (sca), (Si), (Ca)
Cryptophyta												No, periplast plates
gram negative												
bacteria									x	OM	OM	

ที่มา : Schiewer and Volesky (2000)^[587]

หมายเหตุ : cell=cellulose, man-mannan, xyl=xylan, muc=mucilage also containing uronic acids and sulfonate groups, Cti=chitin,

PG=peptidoglycan, TA=teichoic acid, LPS= lipopolysaccharide, PLi= phospholipid, x=present, f= in inner fibrillar skeleton, OM= in outer membrane, no= no cell wall, PC=proteinaceous cuticle, lor= lorica, theca, thecal plates, sca=scales, Ca=calcified, Si= silicified, วงเล็บหมายถึงโมเลกุลนั้นพบในบางสกุลเท่านั้นหรือพบในปริมาณน้อย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของสารชีวโมเลกุล (biomolecule)

พอลิเมอร์	พันธะเชื่อมต่อ	มอนอเมอร์	หมู่ฟังก์ชัน
Polysaccharides			
-cellulose	β -1,4	D-glucose	
-mannan (algal)	β -1,4	D-mannose	
-xylan	β -1,3, β -1,4	D-xylose	
Uronic acids			
-alginic acid	β -1,4	D-mannuronic acid	carboxyl
	α -1,4	L-guluronic acid	carboxyl
-teichuronic acid	linear hexuronic	glucuronic acid	carboxyl
Sulfated polysaccharides			
-agar, porphyran	β -1,3	D-galactose	sulfonate
	α -1,4	L-anhydrogalactose	sulfonate
-carrageenan	β -1,3	D-galactose	sulfonate
	α -1,4	D-(anhydro)galactose	sulfonate
-fucoidan	α -1,2 (α -1,3; α -1,4)	L-fucose	sulfonate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พอลิเมอร์	พันธะเชื่อมต่อ	มอนอเมอร์	หมู่ฟังก์ชัน
Nitrogenated biopolymers			
-chitosan	β -1,4	D-glucosamine	amine
-chitin	β -1,4	N-acetyl-D-glucosamine	second amine, acetyl
-peptidoglycan	β -1,4	N-acetyl-D-glucosamine	second amine, acetyl
	β -1,4	muramic acid with peptide side chain	second amine, acetyl, carboxyl, etc.
Phosphated biomolecules			
-lipopolysaccharides		phosphorylated lipid, oligosaccharide core, and polysaccharide side chain	phosphodiester
-phospholipids		phosphatidyl ethanolamine and fatty acids	phosphonate

ที่มา : Schiewer and Volesky (2000)^[58]

การพิสูจน์บทบาทของพอลิแซ็กคาไรด์ในการกำจัดโลหะหนัก

จากการที่พอลิแซ็กคาไรด์ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจำนวนมาก ทั้งที่เป็นกลาง และเป็นกรด ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นหมู่ฟังก์ชันในการให้ตำแหน่งยึดจับ (binding site) กับโลหะหนักได้ดี จึงน่าที่จะมีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี จึงได้มีการทดลองศึกษาเพื่อทดสอบว่าพอลิแซ็กคาไรด์มีบทบาทในการกำจัดโลหะหนักได้จริง รวมถึงศึกษาความสามารถของพอลิแซ็กคาไรด์ในการกำจัดโลหะหนักด้วย

โดยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดแคดเมียมโดยพอลิแซ็กคาไรด์หลาย ๆ ประเภท เช่น pectin, carrageenan และ alginate และพบว่า citrus pectin สามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดถึง 7.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยพบว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์ที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ ความชอบจับกับประจุบวกของโลหะหนักและลักษณะของช่องว่างที่อยู่บนตัวดูดซับ^[166] นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้พอลิแซ็กคาไรด์จากสิ่งมีชีวิตเทียบกับพอลิแซ็กคาไรด์สังเคราะห์พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์จากสิ่งมีชีวิตแสดงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าและมีต้นทุนที่ต่ำกว่า

ได้มีการศึกษาพบว่า *Zoogloea* sp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียน้ำเค็ม สามารถสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ได้สองแบบคือพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์และละลายอยู่ในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ (exocellular polysaccharides –EPS) และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์แต่ยังคงเกาะติดอยู่บนผนังเซลล์ (cell-bound/ capsular polysaccharide-CPS) โดยพบว่าในส่วนของ CPS สามารถดูดซับโลหะหนัก Cr, Pb และ Fe ได้มีประสิทธิภาพสูงมาก โดยดูดซับได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ จากสารละลาย ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุลบ (anionic polysaccharides) เช่น น้ำตาลที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบเช่น uronic acid ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้ทำหน้าที่เป็นตัวจับประจุบวกของโลหะหนักได้ดี^[430]

ได้มีการทดลองสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ (CPS/ EPS) จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Gloeotheca magna* พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิดนี้มี CPS 15 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมของสาหร่าย และมี EPS 9 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเมื่อนำมาศึกษาความสามารถของพอลิแซ็กคาไรด์ในการดูดซับ แคดเมียมและแมงกานีส พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 115-425 ไมโครกรัมต่อกรัม และดูดซับแมงกานีสได้ 473-906 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งจากการทดลองนี้จึงเป็นหลักฐานชี้ให้เห็นชัดเจนว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นส่วนหนึ่งที่หุ้มเซลล์สาหร่ายไว้นั้น สามารถแสดงบทบาทหลักในการดูดซับโลหะหนักได้^[482]

การนำสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ที่มี CPS หรือมีเมือกหุ้มเซลล์ มาดูดซับตะกั่ว โดยเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ทำการสกัด CPS ออกจากผิวเซลล์แล้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 5 สาหร่ายและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

ซึ่งผลที่ได้พบว่าเซลล์สาหร่ายที่มี CPS หุ้มเซลล์สามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 8.59 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) แต่เซลล์สาหร่ายที่ผ่านการสกัด CPS กำจัดตะกั่วได้เพียง 1.51 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) (ตารางที่ 3) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่ายพบว่าสาหร่ายที่มี CPS หุ้มเซลล์มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงกว่ามาก การที่เซลล์สาหร่ายที่ไม่มี CPS หุ้มเซลล์แล้วยังสามารถกำจัดตะกั่วได้ สาเหตุเนื่องมาจากเซลล์สาหร่ายที่ผ่านขั้นตอนการสกัด CPS นั้น ผนังเซลล์ถูกทำลายด้วยความร้อนประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส ระหว่างขั้นตอนการสกัด จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นที่ผนังเซลล์ได้ เมื่อนำเซลล์นี้มาดูดซับโลหะหนัก ทำให้โลหะหนักสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปจับกับพอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่ภายในเซลล์ได้ จึงทำให้เซลล์สามารถดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายได้บ้าง แต่ยังคงอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าเซลล์ที่มี CPS หุ้มเซลล์มาก^[571]

ตารางที่ 3 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Gloeocapsa gelatinosa* และ *Calothrix marchica* ที่มีและไม่มีพอลิแซ็กคาไรด์ (CPS) หุ้มเซลล์ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ตัวดูดซับ	<i>Gloeocapsa gelatinosa</i>		<i>Calothrix marchica</i>	
	การดูดซับ (%)	ปริมาณดูดซับ (mg/g dry wt.)	การดูดซับ (%)	ปริมาณดูดซับ (mg/g dry wt.)
เซลล์ที่มี CPS	92.1 $\pm$ 1.0	8.59 $\pm$ 0.15	36.3 $\pm$ 0.9	3.42 $\pm$ 0.07
เซลล์ที่ไม่มี CPS	16.3 $\pm$ 0.9	1.51 $\pm$ 0.08	33.6 $\pm$ 1.2	3.17 $\pm$ 0.12

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2004b)^[571]

ส่วนการดูดซับตะกั่วโดยเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* ที่สกัดและไม่สกัดเมือกที่หุ้มเซลล์หรือ CPS ออก (ตารางที่ 3) พบว่าเซลล์ที่มี CPS หุ้มเซลล์สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.42 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนสาหร่ายที่ผ่านการสกัด CPS ดูดซับตะกั่วได้ 3.17 ± 0.12 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของ *C. marchica* นั้นเป็นเส้นสาย และเส้นสายสานกันเป็นแผ่นขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อนำเซลล์มาสกัด CPS ออก ความร้อนระหว่างการสกัดและ CPS ที่หลุดออกจากผนังเซลล์ ทำให้เซลล์สาหร่ายแยกออกจากกัน ไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน จึงทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของเซลล์ในการจับโลหะหนัก นอกจากนี้ความร้อนยังทำลายผนังเซลล์ ดังนั้นเมื่อนำไปดูดซับโลหะหนักแม้ CPS ที่ผิวจะลดลง แต่พื้นที่ผิวเซลล์ในการดูดซับโลหะหนักมีมากกว่า และโลหะหนักยังเข้าไปสัมผัสกับสารประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเซลล์และยึดจับกับสารเหล่านั้นได้^[20] จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไม่แตกต่างจากเซลล์ที่มี CPS หุ้มเซลล์

และเมื่อนำ CPS ที่สกัดได้จากเซลล์สาหร่าย *G. gelatinosa* มาดูดซับตะกั่ว พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วได้ 82.22 ± 4.82 มิลลิกรัมต่อกรัม^[573] ส่วน CPS ที่สกัดจาก *C. marchica* พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วได้ 64.15 ± 5.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าแม้ CPS เพียงลำพัง ไม่มีการทำงานของเซลล์สาหร่ายเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็สามารถดูดซับตะกั่วได้

ซึ่งจากรายงานการศึกษาต่าง ๆ นี้จึงชี้ให้เห็นได้ว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์นั้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์ และชี้ให้เห็นว่าสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สามารถผลิต CPS และ EPS ได้สูงจะมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสิ่งมีชีวิตที่ผลิต CPS และ EPS ได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันจะมีความสามารถและมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้น ตัวอย่างค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักแสดงใน ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชัน ในสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนัก

กลุ่ม	ตำแหน่งที่พบ	ค่า pKa
carboxyl	uronic acid	3-4.4
sulphonate	cysteic acid	1.3
phosphate	polysaccharide	0.94-2.1
hydroxyl	tyrosine-phenolic	9.5-10.5
amino	cystidine	4.1
imino	peptide	13
imidazole	histidine	6-7

ที่มา : Volesky (1990a)^[657]; Duangkokkrud (2002)^[110]

ตารางที่ 5 หมู่ฟังก์ชันที่พบในสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก

หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง	pKa	ligand atom	ตำแหน่งที่พบ
hydroxyl	-OH	9.5-13	O	PS, UA, SPS, AA,
carbonyl (ketone)	>C=O		O	Peptide bond
carboxyl	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{OH} \end{array}$	1.7-4.7	O	UA, AA
sulfhydryl (thiol)	-SH	8.3-10.8	S	AA
thioether	>S		S	AA
sulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{S}=\text{O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	1.3	O	SPS
amine	-NH ₂	8-11	N	Cto, AA
secondary amine	>NH	13	N	Cti, PG, peptide bond
imine	=NH	11.6-12.6	N	AA
amide	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{NH}_2 \end{array}$		N	AA
imidazole	$\begin{array}{c} -\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \parallel \quad \diagup \\ \text{H}-\text{C}-\text{N}=\text{CH} \end{array}$	6.0	N	AA
phosphonate	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ -\text{P}=\text{O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	0.9-2.1 6.1-6.8	O	PL
phosphodiester	>P=O OH	1.5	O	TA, LPS

ที่มา : Schiewer and Volesky (2000)^[587]

หมายเหตุ : PS = polysaccharide, UA= uronic acids, SPS= sulfated,

Cto=chitosan, Cti=chitin, PG=peptidoglycan, AA=amino acids (e.g. in
proteins and PG), TA=teichoic acid, PL= phospholipids,

LPS=lipopolysaccharides.

หมู่ฟังก์ชัน

หมู่ฟังก์ชัน (functional group) เป็นส่วนโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว หมู่ฟังก์ชันมักเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและสมบัติทางเคมีอื่น ๆ ของโมเลกุลที่มีพวกมันเป็นส่วนประกอบ

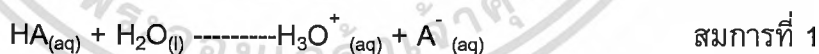
สารชีวโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชัน หลายอย่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ หมู่ -OH, -SH, -NH₂, -COOH, -CHO^[351] โดยตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์แสดงในตารางที่ 5 และตารางผนวกที่ 5

ค่าคงที่การแตกตัวของกรด^[209]

การที่สาหร่ายจะดูดซับโลหะหนักได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับการทำงานของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันจะทำหน้าที่จับโลหะหนักได้ต่อเมื่อหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวมีประจุลบ ซึ่งการจะให้ประจุลบได้หรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid dissociation constant- pKa) และค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย

นิยามของ pKa คือค่า pH ที่มีหมู่ที่สามารถแตกตัวให้โปรตอน (deprotonated) ได้ครึ่งหนึ่งส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะอยู่ในสภาวะรับโปรตอนเข้าไว้

ตามทฤษฎีของ Bronsted-Lowry นั้น กรดสามารถให้โปรตอนหรือ H⁺ ส่วนเบสนั้นจะสามารถรับโปรตอน ดังนั้นปฏิกิริยากรด-เบส จึงเกี่ยวข้องกับการขนส่งโปรตอนจากกรดไปยังเบส ความแรงของกรดวัดได้จากค่าคงที่คือ



HA คือกรด, H₂O คือเบส, H₃O⁺ และ A⁻ คือผลจากการขนส่งโปรตอน

ซึ่งมีค่าคงที่ที่สมดุลของปฏิกิริยา คือ

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]} \quad \text{สมการที่ 2}$$

ปริมาณในวงเล็บหมายถึงความเข้มข้นของแต่ละชนิด

กรดที่มีการขนส่งโปรตอนได้มาก จะแสดงค่า K_a สูงกว่า ดังนั้นค่า K_a จึงแสดงความแรงของกรดและเมื่อใส่ลอการิทึมในสมการที่ 2 จะได้

$$\log K_a = \log [H_3O^+] + \log \frac{[A^-]}{[HA]} \quad \text{สมการที่ 3}$$

ซึ่งค่า pH ของสารละลายแสดงได้เป็น

$$pH = -\log [H_3O^+] \quad \text{สมการที่ 4}$$

ซึ่งค่า $-\log [H_3O^+]$ วัดได้โดยการใช้เครื่องอ่านพีเอช (pH meter) เมื่อนำสมการที่ 4 ไปแทนที่ใน สมการที่ 3 จะได้

$$\log K_a = -pH + \log \frac{[A^-]}{[HA]} \quad \text{สมการที่ 5}$$

ที่จุดซึ่ง $[A^-] = [HA]$ ค่า $\frac{[A^-]}{[HA]} = 1$ และ $\log$ ของ 1 เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\log K_a = -pH \quad \text{สมการที่ 6}$$

ดังนั้นการหาค่า K_a จำเป็นต้องวัดค่า pH ที่จุดที่ $[A^-]$ เท่ากับ $[HA]$

ความแรงของกรดจะแสดงในรูป $-\log K_a$ ซึ่งเขียนให้กระชับในสัญลักษณ์ pK_a

$$pK_a = -\log K_a \quad \text{สมการที่ 7}$$

ดังนั้นที่จุด $[HA] = [A^-]$ สมการ 6 จะเขียนได้เป็น

$$pK_a = pH \quad \text{สมการที่ 8}$$

ถ้าค่า pK_a มีค่าน้อย ค่า K_a ยิ่งมีค่ามากหมายความว่าโปรตอนได้ดี แต่ถ้า pK_a มีค่ามาก ค่า K_a จะยิ่งมีค่าน้อย หมายความว่าโปรตอนได้ไม่ดี และหากสารสามารถแตกตัวให้โปรตอนได้หลายครั้ง สารนั้นจะมีค่า pK_a ได้หลายค่าเท่ากับจำนวนการแตกตัวให้โปรตอน

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

CLASSIFICATION AND CHARACTERISTICS OF ALGAE

การจัดหมวดหมู่สาหร่ายเบื้องต้น [1, 2, 13, 50, 51, 65, 66, 113, 114, 183, 262, 263, 273, 310, 420, 421, 433, 441, 448, 512, 518, 535, 536, 541, 567, 568, 604, 605, 606, 609]

การจัดจำแนกกลุ่มของสาหร่ายโดยทั่วไปจะใช้ลักษณะหลัก ๆ ในการแยกเป็นกลุ่มคือใช้ประเภทของรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ประเภทของอาหารสะสม ลักษณะของการเคลื่อนไหวหรือลักษณะการมีหรือไม่มีหนวด จำนวนหนวด ประเภทของหนวดและตำแหน่งของหนวด ลักษณะองค์ประกอบของผนังเซลล์ รายละเอียดเฉพาะอย่างที่เป็นลักษณะเด่นของแต่ละกลุ่ม โดยสาหร่ายจะอยู่ในสอง kingdom คือ

Kingdom Monera ซึ่งในกลุ่มนี้จะประกอบด้วยพวก blue green algae และ bacteria

Kingdom Protista ซึ่งในกลุ่มนี้จะประกอบด้วยพวก algae, fungi, slime และ protozoa

ได้มีการจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของสาหร่ายโดยนักวิจัยทางด้านสาหร่ายไว้ในหลายแบบโดยมีการจัดเป็นกลุ่มใหญ่และแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ๆ ซึ่งจำนวนกลุ่มของสาหร่ายในการจัดอาจมีไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับเกณฑ์หลัก ๆ ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มสาหร่าย โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกหมวดหมู่คือพิจารณาจาก รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง อาหารสะสม ผนังเซลล์ หนวด และลักษณะพิเศษอื่น ๆ ตัวอย่างการแบ่งกลุ่มของสาหร่ายตามแบบของนักวิจัยท่านต่าง ๆ เช่น

Tilden (1935)^[630] ได้จัดสาหร่ายไว้ 5 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyceae

Chlorophyceae

Chrysophyceae

Phaeophyceae

Rhodophyceae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

Papenfuss (1955)^[518] ได้จัดสาหร่ายไว้ 8 กลุ่มหลัก คือ

Schizophycophyta

Schizophyceae

Chlorophycophyta

Chlorophyceae

Charophycophyta

Charophyceae

Chrysophycophyta

Xanthophyceae

Chrysophyceae

Bacillariophyceae

Cryptophyceae

Pyrrhophycophyta

Dinophyceae

Chloromonadophyceae

Phaeophycophyta

Phaeophyceae

Euglenophycophyta

Euglenophyceae

Rhodophycophyta

Rhodophyceae

Christensen (1962)^[72] ได้จัดสาหร่ายไว้ 4 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyta

Cyanophyceae

Chlorophyta

Euglenophyceae

Loxophyceae

Prasinophyceae

Chlorophyceae

Chromophyta

Xanthophyceae

Chrysophyceae

Bacillariophyceae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การคัดลอกหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cryptophyceae
 Dinophyceae
 Raphidophyceae
 Haptophyceae
 Craspedophyceae
 Phaeophyceae

Rhodophyta

Rhodophyceae

Chapman and Chapman (1973)^[65, 66] ได้จัดสาหร่ายไว้ 11 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyta

Cyanophyceae

Chlorophyta

Chlorophyceae

Prasinophyceae

Charophyceae

Euglenophyta

Euglenophyceae

Chloromonadophyta

Chloromonadophyceae

Xanthophyta

Xanthophyceae

Eustigmatophyceae

Bacillariophyta

Bacillariophyceae

Chrysophyta

Chrysophyceae

Haptophyceae

Phaeophyta

Phaeophyceae

Pyrrhophyta

Desmophyceae

Dinophyceae

Cryptophyta

Cryptophyceae

Rhodophyta

Rhodophyceae

Round (1973)^[567] ได้จัดสาหร่ายไว้ 13 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyta

Cyanophyceae

Chlorophyta

Chlorophyceae

Oedogoniophyceae

Zygnematophyceae

Bryopsidophyceae

Charophyta

Charophyceae

Prasinophyta

Prasinophyceae

Euglenophyta

Euglenophyceae

Xanthophyta

Xanthophyceae

Chrysophyta

Chrysophyceae

Haptophyta

Haptophyceae

Bacillariophyta

Centrobacillariophyceae

Pennatobacillariophyceae

Dinophyta (=Pyrrophyta)

Desmophyceae

Dinophyceae

Eustigmatophyceae

Phaeophyta

Phaeophyceae

Cryptophyta

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์งานนี้ให้อดจนปล่อยมือแล้วจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

Cryptophyceae

Rhodophyta

Rhodophyceae

Hindak et al. (1975)^[183] ได้จัดสาหร่ายไว้ 5 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyta

Cyanophyceae

Euglenophyta

Euglenophyceae

Chlorophyta

Chlorophyceae

Conjugatophyceae

Charophyceae

Chromophyta

Chrysophyceae

Bacillariophyceae

Dinophyceae

Phaeophyceae

Cryptophyceae

Raphidophyceae

Xanthophyceae

Rhodophyta

Rhodophyceae

Bold et al. (1980)^[51] ได้จัดสาหร่ายไว้ 8 กลุ่มหลัก คือ

Cyanochloronta

Myxophyceae

Chlorophycophyta

Chlorophyceae

Euglenophycophyta

Euglenophyceae

Charophyta

Charophyceae

Chrysophycophyta

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xanthophyceae
 Chrysophyceae
 Bacillariophyceae
 Phaeophycophyta
 Phaeophyceae
 Pyrrhophycophyta
 Dinophyceae
 Rhodophycophyta
 Rhodophyceae

Khan (1983)^[421] ได้จัดสาหร่ายไว้ 11 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophyta
 Cyanophyceae
 Chlorophyta
 Chlorophyceae
 Oedogoniophyceae
 Conjugatophyceae
 Charophyta
 Charophyceae
 Euglenophyta
 Euglenophyceae
 Xanthophyta
 Xanthophyceae
 Chrysophyta
 Chrysophyceae
 Haptophyceae
 Bacillariophyta
 Bacillariophyceae
 Dinophyta
 Dinophyceae
 Desmophyceae
 Phaeophyta
 Isogeneratophyceae

Heterogeneratophyceae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cyclosporophyceae
- Cryptophyta
 - Cryptophyceae
- Rhodophyta
 - Rhodophyceae

Bold and Wynne (1978)^[50] ได้จัดสาหร่ายไว้ 9 กลุ่มหลัก คือ

- Cyanophyta
- Rhodophyta
- Chlorophyta
- Euglenophyta
- Charophyta
- Phaeophyta
- Chrysophyta
- Pyrrhophyta
- Cryptophyta

Bold and Wynne (1985)^[664] ได้จัดสาหร่ายไว้ 9 กลุ่มหลัก คือ

- Cyanophyta
 - Cyanophyceae
- Prochlorophyta
- Chlorophyta
 - Chlorophyceae
- Charophyta
 - Charophyceae
- Phaeophyta
 - Phaeophyceae
- Chrysophyta
 - Chrysophyceae
 - Prymnesiophyceae
 - Xanthophyceae
 - Eustigmatophyceae
 - Raphidophyceae
 - Bacillariophyceae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pyrrhophyta

Ebriophyceae

Ellobiophyceae

Syndiniophyceae

Dinophyceae

Desmophyceae

Rhodophyta

Rhodophyceae

Cryptophyta

South and Whittick (1987)^[609] ได้จัดสาหร่ายไว้ 6 กลุ่มหลัก คือ

Cyanophycophyta

Cyanophyceae

Prochlorophycophyta

Prochlorophyceae

Euglenophycophyta

Euglenophyceae

Chlorophycophyta

Chlorophyceae

Charophyceae

Prasinophyceae

Chromophycophyta

Chrysophyceae

Bacillariophyceae

Dinophyceae

Phaeophyceae

Cryptophyceae

Raphidophyceae

Xanthophyceae

Eustigmatophyceae

Prymnesiophyceae (= Haptophyceae)

Rhodophycophyta

Rhodophyceae (Glaucophycophyta)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเป็นต้นแบบลอกเลียน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lee (1989)^[441] ได้จัดสาหร่ายไว้ 15 กลุ่มหลัก คือ^[328]

Cyanophyta

Cyanophyceae

Prochlorophyta

Glaucophyta

Rhodophyta

Rhodophyceae

Chlorophyta

Micromonodophyceae

Charophyceae

Ulvophyceae

Chlorophyceae

Euglenophyta

Euglenophyceae

Dinophyta

Dinophyceae

Cryptophyta

Cryptophyceae

Chrysophyta

Chrysophyceae

Synurophyceae

Prymnesiophyta

Prymnesiophyceae

Bacillariophyta

Bacillariophyceae

Xanthophyta

Xanthophyceae

Eustigmatophyta

Eustigmatophyceae

Raphidophyta

Raphidophyceae

Phaeophyta

สำหรับการจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของสาหร่ายโดย Bold and Wynne (1978)^[50] และได้มีการปรับปรุงโดย กาญจนภาชน์ (2527)^[714] ดังนี้

Division Cyanophyta	: สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน
Division Rhodophyta	: สาหร่ายสีแดง (red algae หรือ rhodophytes)
Division Chlorophyta	: สาหร่ายสีเขียว (green algae หรือ Chlorophytes)
Division Euglenophyta	: ยูกลีโนยด์ (euglenoids)
Division Charophyta	: สาหร่ายไฟ (stoneworts)
Division Phaeophyta	: สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae หรือ phaeophytes)
Division Chrysophyta	: สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (golden-brown algae) หรือ สาหร่ายสีเขียว แกมเหลือง (yellow-green algae) และ ไดอะตอม (diatom)
Division Pyrrophyta	: ไดโนแฟลเจลเลต (dinoflagellate)
Division Cryptophyta	: คริปโตโมแนดส์ (cryptomonads)

โดยได้มีการแสดงลักษณะของรงควัตถุและอาหารสะสมของแต่ละดิวิชันไว้ในตารางที่ 1

ซึ่งจากการรวบรวมรายงานชนิดของสาหร่ายทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ใช้ในการดูดซับ โลหะหนักพบว่าการจัดกลุ่มของ Round (1973)^[567] สามารถจัดกลุ่มได้ครอบคลุมมากที่สุด ดังนั้นในหนังสือเล่มนี้จึงยึดเกณฑ์การจัดกลุ่มตามของ Round (1973)^[567] โดยสาหร่ายกลุ่มที่พบรายงานว่ามีการนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักตามการแบ่งกลุ่มของ Round (1973)^[567] คือดิวิชัน

- Division Cyanophyta
- Division Rhodophyta
- Division Chlorophyta
- Division Prasinophyta
- Division Euglenophyta
- Division Charophyta
- Division Phaeophyta
- Division Bacillariophyta
- Division Dinophyta (=Pyrrophyta)
- Division Cryptophyta

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดด้านรงควัตถุและอาหารสะสมของแต่ละดิวิชัน

กลุ่ม	รงควัตถุ	อาหารสะสม
Division Cyanophyta		
Class Cyanophyceae	chlorophyll a, β -carotene phycocyanin, phycoerythrin	cyanophycean starch
Division Rhodophyta		
Class Rhodophyceae	chlorophyll a, α , β -carotene/ xanthophylls, phycocyanin, phycoerythrin/	floridean starch
Division Chlorophyta		
Class Chlorophyceae	chlorophyll a, b, α , β , δ -carotene/ xanthophyll	starch
Division Prasinophyta		
Class Prasinophyceae	chlorophyll a, b, β , δ -carotene/ xanthophyll	starch
Division Euglenophyta		
Class Euglenophyceae	chlorophyll a, b, β -carotene/ xanthophyll	paramylon
Division Charophyta		
Class Charophyceae	chlorophyll a, b, α , β , δ -carotene/ xanthophyll	starch
Division Phaeophyta		
Class Phaeophyceae	chlorophyll a, c, β -carotene/ fucoxanthin	laminaran
Division Bacillariophyta		
Class Bacillariophyceae	chlorophyll a, c, β , δ -carotene/ xanthophyll	chrysolaminaran
Division Dinophyta		
Class Dinophyceae	chlorophyll a, c, β -carotene/ xanthophyll	starch
Class Eustigmatophyceae	chlorophyll a, c, β -carotene/ xanthophyll	starch
Division Cryptophyta		
Class Cryptophyceae	chlorophyll a, c, α , β , ϵ -carotene/ xanthophyll	starch

ที่มา : กาญจนภาวน์ (2527)^[714], ลัตดา (2542)^[729]

ดิวิชันไซยาโนไฟตา (Division Cyanophyta)

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน/ ไซยาโนแบคทีเรีย (blue green algae/ cyanobacteria)

สาหร่ายในกลุ่มนี้อาจเรียกว่าเป็น Division Myxophyta, Cyanophyta, Cyanochloronta หรือเรียกชื่อสามัญว่าเป็นพวก “ไซยาโนแบคทีเรีย” (cyanobacteria) เนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับแบคทีเรียมากกว่าสาหร่าย ในปัจจุบันจึงนิยมเรียกสมาชิกในกลุ่มนี้ว่า “ไซยาโนแบคทีเรีย” มากกว่าคำว่า “สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน”^[510, 708]

สำหรับในตำราเล่มนี้เนื่องจากเป็นการกล่าวถึงสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่ จึงยังคงเรียกสมาชิกในกลุ่มนี้ว่าเป็น “สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน” เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการเรียกสมาชิกในกลุ่มอื่น ๆ ว่า “สาหร่าย” โดยลักษณะเด่นของพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินคือเป็นพวก prokaryote เหมือนกับแบคทีเรียแต่มีข้อแตกต่างจากแบคทีเรียที่อยู่ใน Kingdom เดียวกันคือเมื่อพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีขบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงแล้วผลผลิตที่ได้จะมีออกซิเจนเกิดขึ้น และจากการศึกษา fossil พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เป็นสิ่งมีชีวิตพวกแรกที่เกิดขึ้นในโลกและเป็นตัวผลิตให้ออกซิเจนแก่บรรยากาศ

1. ลักษณะทั่วไป

ลักษณะโดยทั่วไปของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินคือส่วนของรงควัตถุไม่รวมอยู่ในพลาสทิด (plastid) เหมือนสาหร่ายชนิดอื่น แต่รงควัตถุจะกระจายอยู่ในไซโทพลาซึม และสาหร่ายกลุ่มนี้จะไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเลยแม้แต่สกุลเดียว และเป็นพวกที่เซลล์ไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริง เป็นสาหร่ายที่ไม่มีหนวดและสามารถเคลื่อนไหวโดยไม่ใช้หนวดได้ สาหร่ายกลุ่มนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่ต่างจากสาหร่ายกลุ่มอื่นอย่างเห็นได้ชัดคือสาหร่ายกลุ่มนี้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ และพบว่าสาหร่ายกลุ่มนี้สามารถเปลี่ยนสีได้ตามความเข้มแสงที่ใช้เลี้ยง

2. ลักษณะสำคัญของดิวิชัน

2.1. รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วย chlorophyll-a, β -carotene, xanthophyll, phycocyanin, allophycocyanin, phycoerythrin เป็นหลัก โดยรงควัตถุจะกระจายอยู่ทั่วไปในไซโทพลาซึม รงควัตถุประกอบทำหน้าที่รับแสงส่งให้ chlorophyll-a ซึ่งเป็นรงควัตถุหลักเพียงตัวเดียว และรงควัตถุประกอบยังช่วยป้องกันแสงที่มากเกินไปไม่ให้เป็นอันตรายต่อรงควัตถุสังเคราะห์ด้วยแสง (chlorophyll-a) และต่อเซลล์

2.2. ผนังเซลล์ ชั้นในเป็น mucopeptide ชั้นนอกเป็นเมือก (gelatinous sheath) ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีคุณสมบัติคล้ายกับพวกแบคทีเรียแกรมลบ สาหร่ายในกลุ่มนี้ภายนอกผนังเซลล์มักมีเมือกหุ้ม โดยเมือกมีความหนาบางต่างกันตามชนิดและแหล่งที่อยู่ของสาหร่าย เมือกอาจมีสีหรือไม่มีสี และอาจแบ่งเป็นชั้น ๆ หลายชั้นหุ้มเซลล์ซ้อนกันอยู่

2.3. อาหารสะสมของสาหร่ายในกลุ่มนี้เป็นแป้งที่เรียกว่า cyanophycan starch

2.4. ไโซโทพลาซึมของพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีพวก cyanophycin granule กระจายอยู่ทั่วไปในไซโทพลาซึม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่สะสมอาหารที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสง อาหารสะสมนี้ทำปฏิกิริยากับไอโอดีนได้สีน้ำตาลแดง โดยส่วนไซโทพลาซึมแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ chromoplasm ซึ่งเป็นส่วนของไซโทพลาซึมที่อยู่ด้านนอกอยู่ใกล้กับผนังเซลล์ ในส่วนนี้มีรงควัตถุกระจายอยู่จำนวนมาก และมี cyanophycin granule อยู่ในส่วนนี้ ส่วนที่สองคือ centropasm เป็นส่วนของไซโทพลาซึมที่อยู่ด้านในเป็นบริเวณที่มีส่วนคล้ายกับนิวเคลียสอยู่ในส่วนนี้ (เพราะสาหร่ายกลุ่มนี้ยังไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริง)

2.5. แก๊สแวกิวโอล (gas vacuole) หรือช่องว่างในเซลล์ อยู่ในส่วนของ chromoplasm เป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายทั่วไป แก๊สแวกิวโอลมีลักษณะเป็นถุงกลมหรือมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วนของถุงจะบาง ๆ เป็นสารประกอบพวกโปรตีนให้ออกซิเจนผ่านผนังถุงได้ จากการศึกษาในหลอดทดลองจะพบว่ามีสารประกอบในโตรเจนพวก amine เป็นส่วนประกอบอยู่ ปกติแล้วส่วนของแก๊สแวกิวโอลมีสีเหลือง แต่เมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นจุดสีดำแทนเพราะสะสมไนโตรเจน และเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจะเห็นเป็นสีแดงซึ่งเนื่องมาจากการสะท้อนของแสง ถ้าสาหร่ายกลุ่มนี้อยู่ในที่มืดจะไม่มีแก๊สแวกิวโอล จะปรากฏเมื่อมีแสงเท่านั้น โดยแก๊ส แวกิวโอลจะทำหน้าที่กรองแสง และช่วยในการลอยตัวของสาหร่าย

2.6. สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถเคลื่อนที่ได้แม้ไม่มีหนวด โดยมีการเคลื่อนที่แบบถอยหน้าถอยหลัง (backward and forward gliding) การเคลื่อนที่เฉพาะปลายซ้าย-ขวา (pendulum/ swinging movement) การเคลื่อนที่แบบเป็นคลื่น (waving movement) และการเคลื่อนที่แบบควงสว่าน (spiral movement) การเคลื่อนที่ของสาหร่ายแบบต่าง ๆ นั้นเกิดได้จากการที่สาหร่ายผลิตสารเมือกแล้วปล่อยออกทางรูเล็ก ๆ ของผนังเซลล์ ทำให้เกิดการผลัดดันน้ำที่อยู่รอบ ๆ จึงเคลื่อนที่ไปได้ อีกแบบคือการยืดของเซลล์ในสายโดยเซลล์เกิดการยืด-หด ไม่เท่ากันตลอดทุกเซลล์ในสาย บางเซลล์ยืด บางเซลล์หด จึงเกิดลักษณะเป็นคลื่นจึงทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ อีกแบบคือการแลกเปลี่ยนของน้ำกับสารละลายนอกเซลล์ซึ่งมีไม่เท่ากันตลอดทั้งสาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงตึงผิว (surface tension) จึงเคลื่อนที่ไปได้ นอกจากนี้ปัจจัยภายนอกเช่นการเพิ่มของปริมาณแสง การเพิ่มของอุณหภูมิจะส่งผลทำให้เซลล์ของสาหร่ายมีการเคลื่อนไหวมากขึ้น

3. รูปร่าง

สาหร่ายทุกชนิดในดิวิชันนี้ไม่มีหนวด และมีรูปแบบของเซลล์ทั้งแบบเซลล์กลม อยู่เดี่ยว ๆ อยู่เป็นกลุ่มหรือเป็นเส้นสาย โดยเซลล์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียงเป็นแถว มีหรือไม่มีเมือกหุ้ม เส้นสายของสาหร่ายอาจมีการแตกแขนง มีทั้งการแตกแขนงแท้และแตกแขนงแบบเทียมซึ่งการแตกแขนงแท้คือการที่เซลล์ภายในเส้นสายมีการแบ่งเซลล์ออกทางด้านข้างหรือมีการแตกแขนงโดยเซลล์ภายในเส้นสายนั้นเอง และการแตกแขนงเทียมเป็นคุณสมบัติที่พบเฉพาะในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเท่านั้น โดยเซลล์ในสายแบ่งตัวให้เซลล์ใหม่ 2 เซลล์ ผนังเซลล์ส่วนที่ชนกันจะโค้งมน หลังจากนั้นเซลล์ใหม่ทั้ง 2 เซลล์หรือเซลล์เดี่ยวจะแบ่งตัวเป็นแขนงใหม่ดันออกด้านข้างของสายเดิม เกิดเป็นแขนงเทียม

พวกเป็นเส้นสายบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ โดยใช้ส่วน heterocyst เป็นหลัก ลักษณะของ heterocyst คือมีผนังเซลล์หนา ภายในมีสีใสหรือสีเหลืองจาง ๆ เพราะไม่มีรงควัตถุอื่น ๆ อยู่ มีเพียงแต่ carotene เท่านั้น ปกติสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะอยู่เป็นอิสระ แต่มีบางชนิดอาศัยอยู่ในแพลงก์ตอนด้วยกัน เช่น *Richelia intracellularis* อาศัยในไดอะตอมพวก *Rhizosolenia*

4. การสืบพันธุ์¹³⁷⁾

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศเท่านั้น ไม่มี การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยการสืบพันธุ์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีหลายรูปแบบดังนี้

4.1. การแบ่งเซลล์ สาหร่ายพวกที่มีเมือกหุ้ม เซลล์ที่แบ่งใหม่จะถูกหุ้มไว้ด้วยเมือก เดิมทำให้เห็นเป็นกลุ่มเซลล์อยู่รวมภายในเมือกเดียวกัน หลังจากนั้นจึงหลุดเป็นเซลล์เดี่ยว ๆ ต่อไป

4.2. การแตกตัวของกลุ่มเซลล์ โดยเริ่มจากการแบ่งเซลล์ภายในกลุ่มของสาหร่ายก่อน จนขนาดของกลุ่มเซลล์สาหร่ายใหญ่ขึ้น มีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นและสาหร่ายกลุ่มใหญ่หลุดเป็น กลุ่มย่อย ๆ ไปเจริญเป็นกลุ่มใหม่ต่อไป

4.3. การขาดของเซลล์ อาจเกิดจากการขาดโดยธรรมชาติโดยการที่แบ่งเซลล์ให้เส้น สายยาวขึ้น เมื่อกระทบกระเทือนจะขาด ซึ่งเส้นสายนี้จะเจริญเติบโตต่อไป

4.4. การสร้าง akinete สร้างสปอร์เป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ

5. แหล่งที่อยู่

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถพบได้ทั้งในเขตร้อน เขตหนาว พบอยู่ในน้ำ อยู่บนบก ส่วนใหญ่สาหร่ายกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงินนี้มักพบในแหล่งน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง (พีเอชต่ำกว่า 4-5 จะไม่พบ) โดยแหล่งน้ำที่พบนั้นพบได้ทั้งในน้ำจืด ทั้งบริเวณที่เป็นลำคลอง บริเวณหนอง บึง ในทะเล และยังสามารถพบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ที่บริเวณน้ำพุร้อน โดยพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายสามารถพบได้ที่อุณหภูมิสูงสุดถึง 85.2 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถพบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ในบริเวณที่แห้งแล้งเช่น ทะเลทรายด้วย

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมักมีการบลูมของสาหร่ายเกิดขึ้น (water bloom) การเกิด water bloom มักเกิดในช่วงน้ำเป็นด่าง พีเอชสูงประมาณ 7.8-11.0 มีปริมาณสารอินทรีย์ละลายในน้ำสูงประมาณ 10-15 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้ได้แก่สกุล (genus) *Chroococcus*, *Gloeocapsa*, *Anacystis*, *Gloeotheca*, *Synechocystis*, *Merismopedia*, *Eucapsis*, *Coelosphaerium*, *Microcystis*, *Chamaesiphon*, *Dermocarpa*, *Xenococcus*, *Hyella*, *Oscillatoria*, *Spirulina*, *Lyngbya*, *Phormidium*, *Microcoleus*, *Nostoc*, *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Raphidiopsis*, *Richelia*, *Cylindrospermum*, *Tolypothrix*, *Scytonema*, *Calothrix*, *Rivularia*, *Gloeotrichia*, *Hormothamnium*, *Symploca*, *Nostochopsis*, *Brachytrichia* (Synonyme=Kyrutthrix), *Mastigocladus*, *Stigonema* [100, 714, 729]

6. สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

สาหร่ายในดิวิชันนี้ได้มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักอยู่หลายสกุล โดยมีตัวอย่างของสกุลที่นำมาใช้บำบัดโลหะหนัก เช่นสกุล *Chroococcus*, *Gloeocapsa*, *Anacystis*, *Microcystis*, *Gloeotheca*, *Synechocystis*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Lyngbya*, *Spirulina*, *Nostoc*, *Anabaena*, *Calothrix*, *Tolypothrix*, *Scytonema*, *Mastigocladus* และ *Stigonema* ลักษณะของแต่ละสกุลมีดังนี้

Chroococcus สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ล่องลอยเป็นอิสระในน้ำ หรืออาศัยอยู่บริเวณที่ผิวดินชื้นแฉะ ลักษณะเป็นเชลล์เดี่ยว รูปร่างกลมหรือรี แต่มักพบอยู่เป็นกลุ่มมากกว่าเดี่ยวโดยในกลุ่มมี 2-4 เชลล์และมักไม่เกิน 16 เชลล์ เพราะแบ่งเชลล์แล้วเชลล์ยังรวมอยู่ในเมือกหุ้มเดียวกันจึงทำให้เห็นเป็นกลุ่มเชลล์

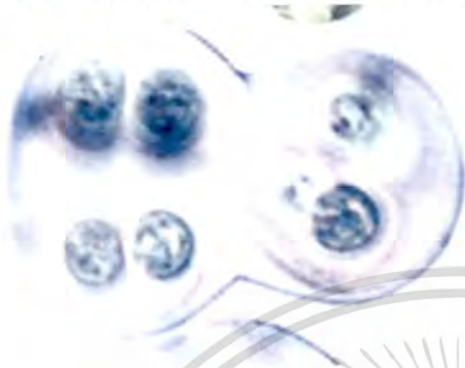


ภาพที่ 1 *Chroococcus*

ที่มา : <http://www.keweenawalgae.mtu.edu> [316]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บทที่ 6 การบำบัดน้ำเสียและลักษณะของสาหร่าย: แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gloeocapsa สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยลอยเป็นอิสระในน้ำ หรืออาศัยอยู่ในบริเวณที่ชื้นแฉะ ลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว รูปร่างรี เมื่อเซลล์แบ่งตัวจะรวมอยู่ภายในเมือกหุ้มเดิม อยู่เป็นกลุ่ม มี เมือกหุ้มแต่ละเซลล์และหุ้มทั้งกลุ่มเซลล์รวมกัน เมือกที่หุ้มอาจไม่มีสีหรือมีสีเหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลและอาจเห็นเมือกที่หุ้มเป็นชั้น ๆ ได้ชัดเจน

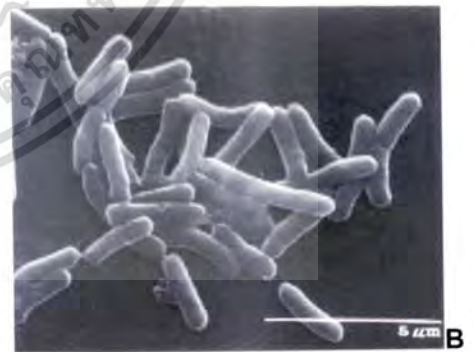
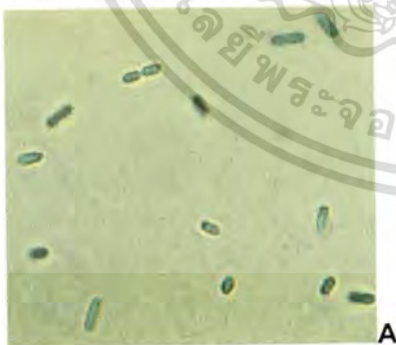


ภาพที่ 2 *Gloeocapsa*

ที่มา : A: <http://www.cyanosite.bio.purdue.edu>^[397]

B: <http://www.biltek.tubitak.gov.tr>^[276]

Anacystis สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยลอยเป็นอิสระในน้ำ หรืออาศัยอยู่ตามที่ชื้นแฉะ เซลล์มีลักษณะกลมหรือรีหรือเซลล์มีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนใหญ่เซลล์มีกิริยาวหรือเซลล์อาจไม่อยู่เดี่ยว ๆ แต่อยู่เป็นคู่ติดกัน ทุกเซลล์มีเมือกหุ้ม ซึ่งในตำราบางเล่มอาจรวมเอาพวก *Chroococcus*, *Gloeocapsa* มาไว้ในสกุลนี้

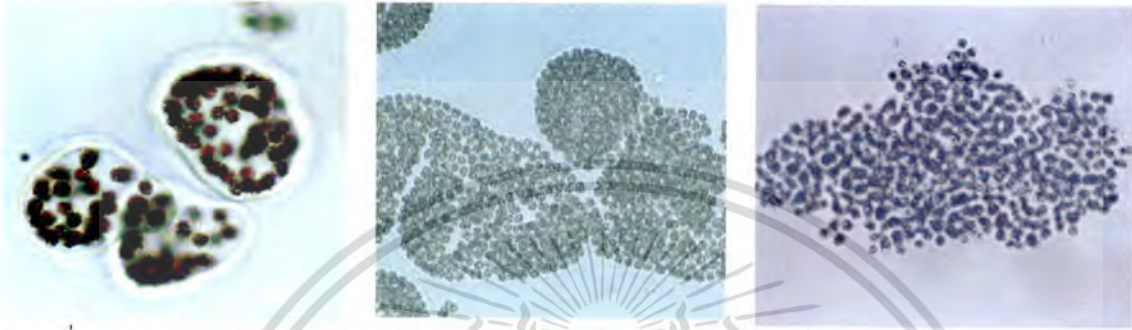


ภาพที่ 3 *Anacystis*

ที่มา : A: <http://www.ibvf.cartuja.csic.es>^[314]

B: <http://www.cyanogroup.com>^[294]

Microcystis สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยลอยเป็นอิสระในน้ำ กลุ่มเซลล์รูปร่างกลมในระยะแรก ต่อมารูปร่างไม่แน่นอน เซลล์กระจายอยู่ทั่วไป แต่ละเซลล์เดี่ยวมีลักษณะกลมภายในเซลล์มี gas vacuole เห็นเป็นจุดดำ ๆ กระจายทั่วไป เป็นชนิดที่เกิดการบลูมได้บ่อยมาก และเมื่อบลูมแล้วจะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะชนิด *Microcystis aeruginosa* เพราะเป็นชนิดที่สามารถสร้างพิษขึ้นมา จึงทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และต่อคนหรือสัตว์ที่บริโภคสัตว์น้ำหรือน้ำจากแหล่งน้ำนั้น



ภาพที่ 4 *Microcystis*

Gloeothoece สาหร่ายสกุลนี้มีเซลล์เป็นรูปทรงกระบอก เซลล์อาจตรงหรือโค้ง ไม่มีรอยคอดของเซลล์ ปลายเซลล์มีลักษณะโค้งมน เซลล์อาจอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเซลล์เล็ก ๆ หรือรวมเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ มีเมือกหุ้มเซลล์และหุ้มกลุ่มเซลล์

Gloeothoece



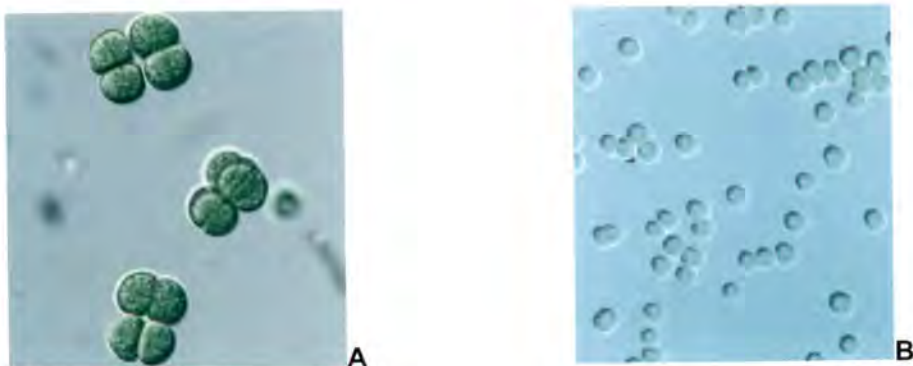
ภาพที่ 5 *Gloeothoece*

ที่มา : A: <http://www.rbgsyd.nsw.gov>^[345]

B: <http://protist.i.hosei.ac.jp>^[247]

Synechocystis สาหร่ายสกุลนี้มีเซลล์เป็นรูปทรงกลม อาจอยู่เป็นเซลล์เดี่ยว ๆ หรืออยู่เป็นคู่หลังจากแบ่งเซลล์ หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่มเซลล์ขนาดเล็ก มีจำนวนเซลล์ไม่มาก ไม่มีเมือกหุ้มเซลล์ ส่วนใหญ่พบในน้ำนิ่ง บางครั้งเซลล์ที่มีทรงกลมเมื่อแบ่งเซลล์แล้วเซลล์จะมีรูปร่างเป็นครึ่งของทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย



ภาพที่ 6 *Synechocystis*

ที่มา : A: <http://protist.i.hosei.ac.jp>^[246]

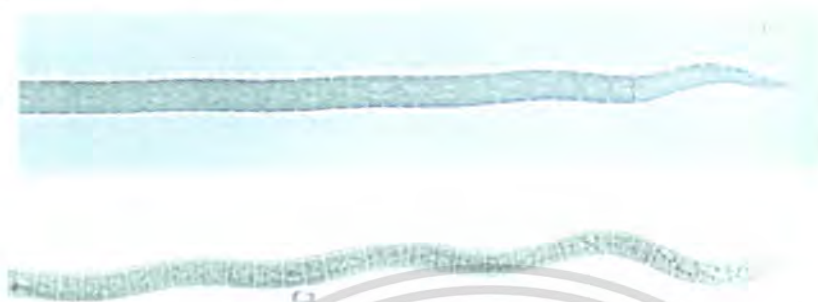
B: <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp>^[274]

Oscillatoria สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ล่องลอยเป็นอิสระในน้ำ พบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม หรืออาจอาศัยอยู่ตามที่ชื้นแฉะ (Synonyme = *Trichodesmium*) มีลักษณะเป็นเส้นสายเดี่ยว ๆ หรืออยู่เป็นกลุ่มเซลล์ที่หนาแน่น เส้นสายไม่แตกแขนง สายรูปทรงกระบอก ส่วนเซลล์ที่อยู่ปลายสุดของเส้นสายหรือที่เรียกว่า apical cell มีลักษณะกลมมน โดยอาจกว้างเท่าเซลล์ในสาย หรือเซลล์เล็กกว่าเซลล์ในเส้นสายและรูปร่างเซลล์เรียวสูงขึ้นไปบางชนิดมีลักษณะของเซลล์ที่อยู่ปลายสุดเปลี่ยนรูปร่างไปจนมีลักษณะคล้ายหมวกหุ้มปลายเส้นสายอยู่เรียกว่า calyptra สาหร่ายสกุลนี้ไม่มีเมือกหุ้ม จึงเรียกเส้นสายสาหร่ายนี้ว่า trichome (ไม่ใช่ filament) สาหร่ายสกุลนี้เคลื่อนไหวแบบเดินหน้า ถอยหลังหรือแกว่งซ้าย-ขวา การสืบพันธุ์โดยการสร้าง hormogonia (hormogone) คือการขาดของเส้นสายได้เป็นเส้นสายสั้น ๆ เพื่อไปเจริญเป็นเส้นสายใหม่ สาหร่ายในสกุลนี้สามารถสร้างสาร geosmin ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นเหม็นโคลนในเนื้อสัตว์น้ำ โดยสาร geosmin ที่สาหร่ายสร้างขึ้นจะเข้าสู่สัตว์น้ำได้โดยการที่สัตว์น้ำกินสาหร่ายเข้าไปโดยตรง และอีกทางคือสาร geosmin ที่สาหร่ายปล่อยออกมาจากเซลล์และละลายอยู่ในน้ำนั้นซึมเข้าทางผิวหนังสัตว์น้ำ



ภาพที่ 7 *Oscillatoria*

Phormidium สาหร่ายในสกุลนี้มี trichome เป็นรูปทรงกระบอก เหยียดตรงหรือเป็นเกลียวเล็กน้อย โดยปกติแล้ว trichome ไม่มีเมือกหุ้ม บางชนิดอาจมีเมือกนุ่มหุ้ม เส้นสายจะสร้าง hormogonia ในการสืบพันธุ์ ไม่มีการสร้าง heterocyst และ akinete เส้นสายสามารถเคลื่อนที่ได้



ภาพที่ 8 *Phormidium*

ที่มา : ยวดี (2548)^[726]

Lyngbya สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยเป็นอิสระในน้ำ พบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม หรืออาศัยอยู่ในบริเวณที่ชื้นแฉะ ลักษณะเป็นเส้นสายที่เกิดจากเซลล์มาเรียงต่อกันเป็นแถวยาว ๆ แถวเดียว เส้นสายมีลักษณะคล้าย *Oscillatoria* มาก (แต่ไม่มี calyptra) ต่างกันตรงที่เส้นสายของสาหร่ายสกุลนี้มีเมือกหุ้ม จึงเรียกเส้นสายเป็น filament โดยมีเมือกที่หุ้มเส้นสายอาจมีสีน้ำตาลปนเหลือง สีดำ การสืบพันธุ์โดยการสร้าง hormogone



ภาพที่ 9 *Lyngbya*

ที่มา : ยวดี (2548)^[726]

Spirulina สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยเป็นอิสระในน้ำ พบในน้ำจืด และน้ำเค็ม (Synonyme = *Arthrospira*) ลักษณะเป็นเส้นสายที่เกิดจากเซลล์มาเรียงต่อกันเป็นแถวเดียวไม่มีเมือกหุ้ม ลักษณะเส้นสายคล้าย *Oscillatoria* ที่ขดเป็นเกลียว เป็นชนิดที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจเพราะสามารถใช้สาหร่ายนี้เป็นแหล่งโปรตีนให้คนและสัตว์ และทำเป็นอาหารเสริมสุขภาพที่สะดวกต่อการรับประทาน โดยชนิดที่พบว่ามีคุณค่าทางอาหารสูงคือ *Spirulina platensis*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 10 *Spirulina*

Nostoc สาหร่ายสกุลนี้มีชื่อเรียกเป็นภาษาไทยว่า “ผักผม” พบได้บริเวณดินที่ชื้นแฉะ บริเวณหน้าผาชัน หรือพบอาศัยในแหล่งน้ำจืดที่สะอาด บางชนิดนำมารับประทานได้ โดยเฉพาะ *Nostoc commune* ซึ่งมีชื่อเรียกภาษาไทยว่า “สาหร่ายเห็ดลาบ” ซึ่งประชาชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยเฉพาะในจังหวัดมหาสารคามนิยมนำมาประกอบอาหารประเภทลาบรับประทาน โดยจะพบสาหร่ายชนิดนี้ในธรรมชาติในช่วงฤดูฝน ลักษณะของสาหร่ายนี้คือมีส่วนเส้นสายที่มักขดงอ อยู่รวมกันเป็นกลุ่มใหญ่จำนวนมาก โดยสาหร่ายฝังตัวอยู่ในเมือกที่มีลักษณะเป็นวุ้นหนา บางชนิดเหนียวมาก และกลุ่มของสาหร่ายจะมีรูปร่างต่าง ๆ กัน อาจเป็นก้อนหรือเป็นเส้นเหมือนเส้นผม เซลล์เดี่ยว ๆ ที่มาประกอบเป็นเส้นสายมีลักษณะค่อนข้างกลม และภายในเส้นสายนั้นพบ heterocyst กับ akinete มักอยู่ใกล้เคียงกัน



A



B

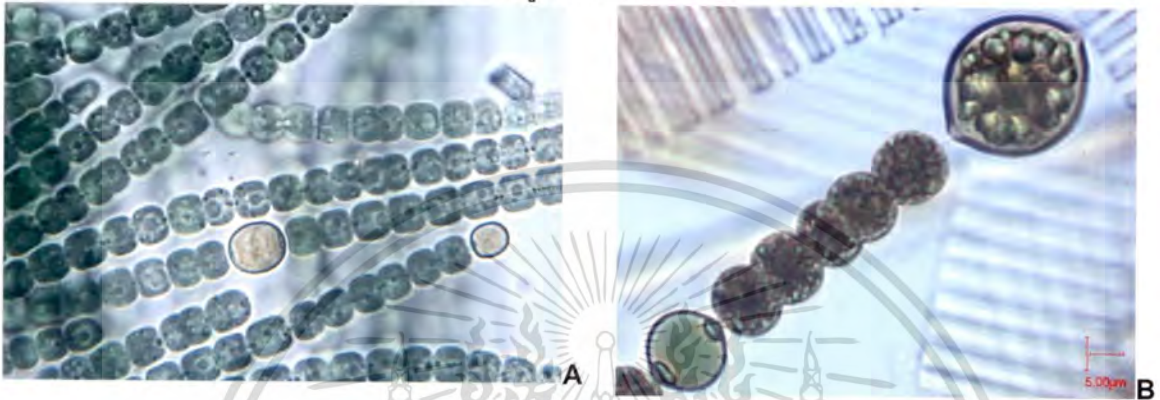
ภาพที่ 11 *Nostoc*

ที่มา : A: ยุวดี (2548)^[726]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขหรือลอกเลียนแบบ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

Anabaena สาหร่ายสกุลนี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่ลอยลอยเป็นอิสระในน้ำหรืออาศัยอยู่ร่วมกับแหนแดง พบอาศัยในแหล่งน้ำจืด ลักษณะเซลล์เดี่ยวค่อนข้างกลม มีขนาดเล็ก เซลล์เดี่ยวมาเรียงต่อกันเป็นเส้นสาย สายมักอยู่เดี่ยว ๆ ไม่ขดงอ มีเมือกบาง ๆ หุ้ม เซลล์ไม่รวมกลุ่มกัน จะอยู่เป็นเส้นสายเดี่ยว ๆ และ heterocyst มักเกิดอยู่กลางเส้นสาย บางชนิดจะสามารถสร้างพืษได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นเมื่อเกิดมีการเพิ่มปริมาณมากขึ้นในแหล่งน้ำจึงทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์ที่มากินน้ำ และพืษจะสะสมอยู่ในตัวสัตว์น้ำได้ด้วย



ภาพที่ 12 *Anabaena*

ที่มา : A: <http://www.micrographia.com> [321]

B: <http://plantphys.info> [245]

Calothrix สาหร่ายสกุลนี้พบอาศัยอยู่บริเวณก้อนหิน กิ่งไม้ ใบไม้ สาหร่ายขนาดใหญ่พบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เซลล์เดี่ยวมีรูปร่างกลม มาเรียงตัวกันเป็นเส้นสาย เซลล์ที่บริเวณโคนของแต่ละเส้นสายมีขนาดใหญ่ และเรียวเล็กลงทางปลายเส้นสาย เซลล์ปลายเส้นสายอาจมนหรือเรียวแหลมเป็นเส้น เส้นสายไม่แตกแขนงหรืออาจพบแตกแขนงแบบเทียม ถ้าพบว่ามีการแตกแขนงเทียมแขนงใหม่ที่ได้จะเป็นอิสระจากอันเดิม มีเมือกหุ้มแต่ละเส้นสาย มักมี basal heterocyst คือมีตำแหน่งของ heterocyst อยู่ที่ส่วนโคนของเส้นสาย มี akinete เกิดติดอยู่กับ heterocyst บางครั้งอาจพบ intercalary heterocyst คือมี heterocyst อยู่ตรงกลางเส้นสาย

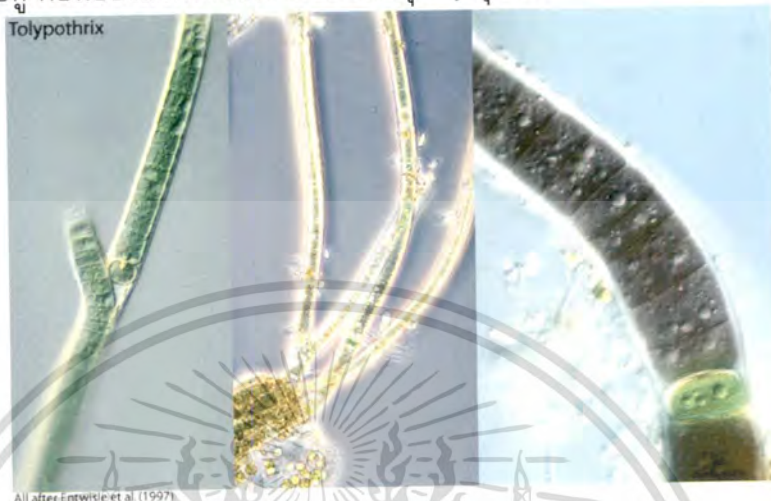


ภาพที่ 13 *Calothrix*

ที่มา : ยิวดี (2548) [726]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่ายแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

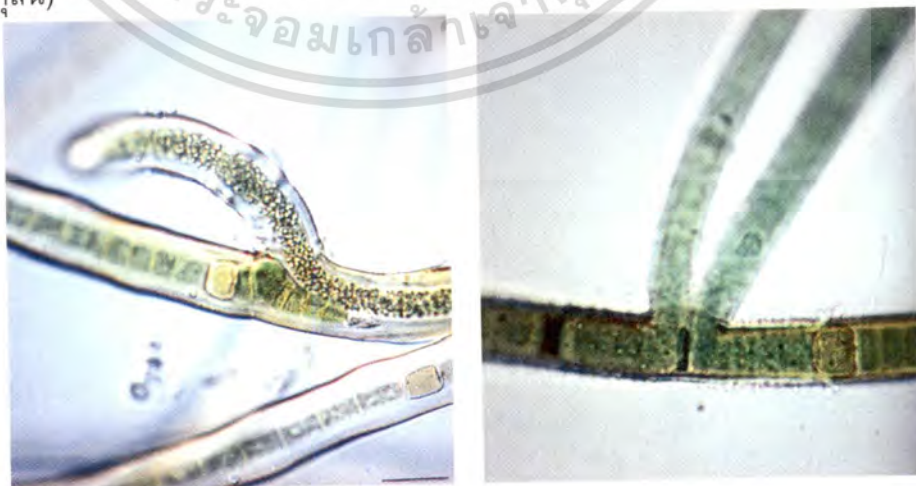
Tolypothrix สาหร่ายสกุลนี้มีลักษณะเป็นก้อน หรือกระจุกอยู่ในน้ำจืด ตามบริเวณคูน้ำที่ใสสะอาด เซลล์เดี่ยวมีรูปร่างกลมมาเรียงต่อกันเป็นเส้นสาย เส้นสายมารวมตัวกันเป็นกระจุกมีการแตกแขนงเทียมแบบเดี่ยว มักแตกแขนงติดกับบริเวณ heterocyst บางครั้งอาจพบว่าการแตกแขนงแบบคู่ ก้อนของสาหร่ายมีลักษณะเป็นปุย ๆ นุ่มมือ



ภาพที่ 14 *Tolypothrix*

ที่มา : <http://www.rbgsyd.nsw> [346]

Scytonema สาหร่ายสกุลนี้พบอาศัยตามเปลือกไม้ หรือตามบริเวณผิวดินหรือบนบกที่ชุ่มชื้น เซลล์เดี่ยวมีรูปร่างกลม มาเรียงตัวต่อกันเป็นเส้นสาย มีการแตกแขนงเทียมแบบคู่ โดยแตกแขนงระหว่าง heterocyst หรืออาจพบแตกแขนงเดี่ยวติดกับ heterocyst ลักษณะเส้นสายที่มารวมกันเป็นกลุ่มจะปุยเหมือนก้ามหอย นุ่มมือ (ตำราบางเล่มอาจรวมสกุล *Tolypothrix* เข้าไว้กับสกุลนี้)



ภาพที่ 15 *Scytonema*

ที่มา : ยวดี (2548) [726]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

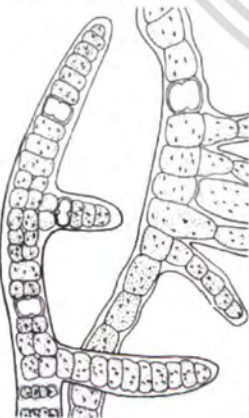
Mastigocladus สาหร่ายสกุลนี้ เส้นสายมีการแตกแขนงเป็นรูปตัว “V” คลว่า ออกทางด้านข้างของเส้นสายหลัก การแตกแขนงเป็นแบบแขนงแท้ และแตกออกทางด้านข้าง มีเมือกบางและนุ่มหุ้มเส้นสาย เซลล์ในเส้นสายหลักเป็นรูปถังเบียร์ จนถึงทรงกระบอกสั้น เส้นสายที่แตกแขนงจะเป็นรูปทรงกระบอกยาว heterocyst อยู่ภายในเส้นสาย



ภาพที่ 16 *Mastigocladus*

ที่มา : ยุกติ (2548)^[726]

Stigonema สาหร่ายสกุลนี้มีลักษณะเป็นเส้นสายอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เส้นสายมีลักษณะโค้ง ไม่เหยียดตรง มีการแตกแขนงทางด้านข้างเส้นสาย การเรียงตัวของเซลล์ในเส้นสายมีจำนวนแถวของเซลล์ 1, 2 หรือหลายแถว บางครั้งมีการเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ที่ปลายบนสุดของเส้นสาย แขนงที่แตกออกทางด้านข้างมีลักษณะและจำนวนแถวของเซลล์หลายแถวเหมือนแขนงหลัก เมือกที่หุ้มเส้นสายจะอยู่ชิดติดกับเส้นสายขณะเส้นสายอายุน้อย เมื่อเส้นสายมีอายุมากขึ้นเมือกจะหนา กว้างขึ้น ลักษณะเมือกจะหนาเป็นชั้น ๆ มี heterocyst อยู่ระหว่างกลางเส้นสายหรือด้านข้างเส้นสาย มีการสร้าง hormogonia ที่ปลายของแขนงย่อยที่อายุน้อย



A



B

ภาพที่ 17 *Stigonema*

ที่มา : A: <http://www.rbgsyd.nsw>^[343]

B: <http://www2.una.edu>^[395]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บทที่ 6 การจัดหาวัตถุดิบและลักษณะของสาหร่าย

ดิวิชันโรโดไฟตา (Division Rhodophyta)

สาหร่ายสีแดง (red algae)

สาหร่ายในดิวิชันนี้พบในทะเลมากกว่าน้ำจืด มีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่จนมองเห็นชัดเจนด้วยตาเปล่า สาหร่ายพวกที่มีขนาดใหญ่มักเป็นสาหร่ายที่ดำรงชีวิตแบบยึดเกาะอยู่บนพื้น เกาะบนพืชชนิดอื่น หรือเกาะตามก้อนหิน สาหร่ายในดิวิชันนี้มีสมาชิกประมาณ 4,000 ชนิด โดยเป็นพวกสาหร่ายที่อยู่ในน้ำจืดประมาณ 200 ชนิดเท่านั้น นอกนั้นเป็นพวกที่อยู่ในน้ำเค็ม สาหร่ายสีแดงที่พบในเขตร้อนมักมีขนาดเล็ก ที่พบในเขตอบอุ่นและเขตหนาวมักมีขนาดใหญ่ สาหร่ายสีแดงไม่มีชนิดที่เป็นพวกลอยลอยเป็นอิสระ สาหร่ายสีแดงพวกที่อยู่ในน้ำจืดมักขึ้นในที่น้ำไหลโดยมีส่วนล่างของทลัสส์ยึดติดกับพื้น กิ่งไม้ รากไม้ที่จมน้ำ หรือบนก้อนหิน

1. ลักษณะทั่วไป

สาหร่ายสีแดงเป็นสาหร่ายที่ไม่มีหนวดทั้งเซลล์ปกติและเซลล์สืบพันธุ์ (ไม่มีระยะใดในวงจรชีวิตที่มีหนวด) มีรงควัตถุช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงที่พิเศษจากสาหร่ายกลุ่มอื่นคือมี phycobilin และ phycoerythrin ระหว่างเซลล์ของสาหร่ายสีแดงที่อยู่ติดกันจะมี pit connection ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้มีการติดต่อกันของไซโทพลาซึมระหว่างเซลล์ อาหารสะสมของสาหร่ายสีแดงมีคุณสมบัติคล้ายกับอาหารสะสมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

2. รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายสีแดงประกอบด้วย chlorophyll-a เป็นหลัก และมี chlorophyll-d อยู่เล็กน้อย ส่วน carotene จะประกอบด้วยชนิด α และ β -carotene และมีรงควัตถุพวก xanthophyll, phycobilin (phycocyanin, phycoerythrin) เนื่องจากสาหร่ายสีแดงมีรงควัตถุประเภท phycoerythrin ประกอบอยู่จึงสามารถเจริญเติบโตในที่ลึกได้เพราะ phycoerythrin ตัวนี้สามารถดูดแสงสีน้ำเงินเพื่อนำไปส่งต่อให้ chlorophyll-a สังเคราะห์ด้วยแสงได้ และเพราะว่าแสงสีน้ำเงินเท่านั้นที่ผ่านลงน้ำลึกได้ สาหร่ายชนิดอื่นที่ไม่สามารถดูดแสงสีน้ำเงินได้จึงไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ที่ลึกได้ และพบว่าที่ระดับความเข้มแสงต่ำ ค่าอัตราส่วนของ phycobilin : chlorophyll จะมีค่าสูง (มี phycobilin มากกว่า chlorophyll) จึงทำให้สาหร่ายมีสีแดงเข้มกว่าที่ระดับความเข้มแสงสูง ดังนั้นจึงพบว่าที่ความเข้มแสงมาก สาหร่ายสีแดงจะมีสีออกไปในทางสีเขียว และที่ความเข้มแสงน้อยสาหร่ายสีแดงจะมีสีแดงสด

3. ส่วนประกอบของเซลล์สาหร่ายสีแดง

สาหร่ายสีแดงมีผนังเซลล์ชั้นในเป็นเซลลูโลส ส่วนผนังเซลล์ชั้นนอกเป็นเมือก ซึ่งเป็นสารพวก sulfate galactan ซึ่งเป็นพวก agar, porphyran, carrageenan (นำไปสกัดใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้) สาหร่ายสีแดงบางชนิดผนังเซลล์ชั้นในเป็นสารพวก xylan ชั้นนอกเป็น mannan ในส่วนของไฟรีนอยด์จะมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางคลอโรพลาสต์

อาหารสะสมของสาหร่ายสีแดงคือแป้งที่มีชื่อเรียกว่า floridean starch อาหารสะสมของสาหร่ายสีแดงอีกประเภทหนึ่งคือน้ำตาล floridoside ซึ่งทำหน้าที่เหมือนน้ำตาล sucrose ในสาหร่ายสีเขียวและพืชชั้นสูง โดยทั่วไป

4. รูปร่าง

สาหร่ายสีแดงเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว อยู่เป็นกลุ่มเซลล์ หรือเส้นสายไม่แตกแขนง เพราะส่วนใหญ่สาหร่ายสีแดงจะเป็นเส้นสายที่แตกแขนง หรือรวมตัวกันเป็นแผ่นหรือแตกแขนงจนเป็นก้อนคล้ายปะการัง ซึ่งเนื่องจากมีหินปูนเป็นองค์ประกอบจึงดูแข็งแรงคล้ายปะการัง

ทลล์ของสาหร่ายสีแดงส่วนมากจะมีแกน โดยประเภทของแกนคือมีแกนประกอบด้วยเส้นสายเดี่ยว (uniaxial) หรือแกนประกอบด้วยหลายเส้นสาย (multiaxial) แกนแบบหลายเส้นสายจะทำให้สาหร่ายมีโครงสร้างเป็น pseudoparenchymatous การเจริญของทลล์จึงมาจากการเจริญของเส้นสายทั้งหลายจึงทำให้มีการเจริญได้หลายทิศทาง เจริญได้ในแนวสามมิติ จึงมีลักษณะคล้ายกับพืชที่มีเซลล์แบบ parenchyma

ลักษณะพิเศษของสาหร่ายสีแดงคือมี hair หรือ tendril มีลักษณะเป็นเส้นสายซึ่งใสไม่มีสี ซึ่งจะหลุดร่วงได้ง่าย และมีหน้าที่ป้องกันอันตรายจากแสงแดดที่มากเกินไปต่อความต้องการของสาหร่าย และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อดูดซึมธาตุอาหาร และช่วยในการยึดเกาะกับสาหร่ายอื่นที่ตัวสาหร่ายสีแดงเองไปอาศัยเกาะอยู่

5. การเกิดหินปูน

การเกิดหินปูน (calcification) สาหร่ายสีแดงสามารถผลิตหินปูนได้ด้วยตัวเอง หรือโดยเกิดจากหินปูนจากในน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาเกาะและสะสมอยู่บนทลล์ของสาหร่าย ซึ่งหินปูนพวกนี้จะมีประโยชน์ในการทำให้โครงสร้างทลล์ของสาหร่ายแข็งแรงขึ้นและทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะภายนอกได้ดี โดยสาหร่ายสีแดงที่มีหินปูนเกาะเรียกว่า coralline red algae สำหรับสาหร่ายสีแดงบางชนิดมี calcite เกาะ สาหร่ายสีแดงบางชนิดมีส่วนสำคัญในการเกิด coral reef

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ: เนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 บทที่ 6 การจัดทำวาคัมและลักษณะของสาหร่าย

6. การสืบพันธุ์

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสีแดงมีทั้งแบบที่อาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ แต่มีลักษณะเด่นเฉพาะของสาหร่ายสีแดงคือ ในสาหร่ายสีแดงทุกชนิดเซลล์สืบพันธุ์จะไม่มีหนวด การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสีแดงแบ่งได้เป็น

6.1. การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยการสร้างสปอร์

6.2. การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยทำการสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมียขึ้นมาให้ผสมกันได้เป็นต้นอ่อน

ตัวอย่างสกุลของสาหร่ายที่พบในทวีปนี้ ได้แก่ *Porphyridium*, *Goniotrichum*, *Compsopogon*, *Erythrocladia*, *Erythrotrichia*, *Porphyra*, *Bangia*, *Acrochaetium*, *Batrachospermum*, *Liagora*, *Scinaia*, *Galaxuara*, *Bonnemaisonia*, *Actinotrichia*, *Nemalion*, *Gelidium*, *Gelidiella*, *Corallina*, *Jania*, *Amphiroa*, *Lithophyllum*, *Lithothamnium*, *Peyssonelia*, *Cheilosporum*, *Grateloupia*, *Halymenia*, *Callophyllis*, *Prionitis*, *Gigartina*, *Chondrus*, *Euclima*, *Gracilaria*, *Hypnea*, *Ceratodictyon*, *Titanophora*, *Champia*, *Griffithsia*, *Ceramium*, *Centroceras*, *Spyridia*, *Caloglossa*, *Polysiphonia*, *Acanthophora*, *Laurencia*, *Leveillea*, *Solieria*, *Catenella*, *Martensia*, *Wrangelia*, *Odonthalia*, *Bostrychia*, *Palmaria*, *Asparagopsis*

7. สาหร่ายสีแดงที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

สาหร่ายในทวีปนี้ที่มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักอยู่หลายสกุล เช่น *Gelidium*, *Chondrus*, *Gracilaria*, *Polysiphonia*, *Palmaria* และ *Asparagopsis* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้

Gelidium สาหร่ายสกุลนี้พบในทะเล สาหร่ายนี้นำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม การสกัดวุ้น (agar) ลักษณะของทลล์มีขนาดต่าง ๆ กัน จะแข็ง อวบน้ำ แตกแขนง 2 ข้าง แบบขนนก ระยะสืบพันธุ์ปลายแขนงจะพองออก ถ้าเป็นการสืบพันธุ์แบบสร้าง cystocarp (กระเปาะสปอร์) จะมีรูเปิดที่เรียกว่า ostiole 2 รู



ภาพที่ 18 *Gelidium*

ที่มา : A: <http://www.surialink.com> ^[376]

B: <http://www.canari.org> ^[285]

Chondrus ชื่อสามัญคือ Irish moss เป็นสกุลที่ไม่มีในประเทศไทย สกุลนี้สามารถนำมา สกัด carrageenan สาหร่ายสกุลนี้พบในน้ำเค็ม ทลล์แตกแขนงแบบคู่หลายครั้งจนเป็นพุ่ม สีแดงเข้มหรือม่วง ทลล์อวบน้ำ ใช้ประโยชน์ในการรักษาโรคกระเพาะปัสสาวะ ลำไส้อักเสบ



ภาพที่ 19 *Chondrus*

ที่มา : A: <http://www.herbdatanz.com> ^[312]

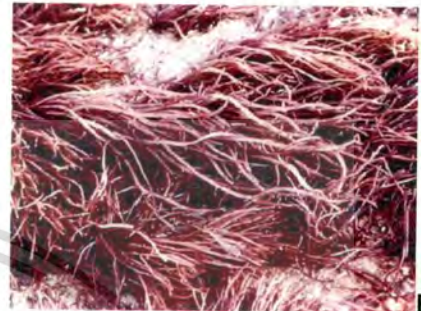
B: <http://www.biopix.dk> ^[279]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น ถือว่าหากมีการนำข้อมูลไปใช้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gracilaria สาหร่ายสกุลนี้ใช้ประโยชน์โดยการสกัดวุ้น พบอาศัยในน้ำเค็ม ลักษณะรูปร่างของทัลลัสคือกลม แบนอวบน้ำ แตกแขนงมากน้อยสุดแต่ชนิด บางชนิดแตกแขนงมากจนเป็นพุ่มใหญ่ ต้น gametophyte (ช่วงที่เป็นต้น haploid คือมีโครโมโซมหนึ่งชุด) สร้าง cystocarp เป็นปุ่มกลม ๆ ขนาดหัวเข็มหมุดทั่วผิวทัลลัส



A



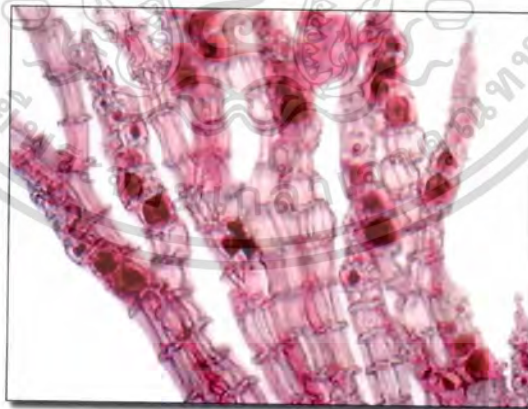
B

ภาพที่ 20 *Gracilaria*

ที่มา : A: <http://www.botany.hawaii.edu> ^[283]

B: <http://peixes.brasilmergulho.com> ^[241]

Polysiphonia พบในทะเล ลักษณะเป็นเส้นสายแตกแขนงได้ มีโครงสร้างเป็นเซลล์กลาง 1 เซลล์ และมีเซลล์ล้อมรอบ 4-24 เซลล์ เซลล์มีลักษณะยาวเป็นท่อนเรียงต่อกัน ปลายแขนงมีเส้นสายไม่มีสี



ภาพที่ 21 *Polysiphonia*

ที่มา : <http://www.olympusmicro.com> ^[330]

Palmaria ทัลลัสเป็นแผ่นแบนบาง สีแดงเข้ม ส่วนคล้ายใบยาว 50-300 มิลลิเมตร มีส่วนคล้ายรากยึดเกาะเป็นรูปถ้วย มีส่วนคล้ายต้นต่อจากส่วนยึดเกาะ ทัลลัสอาจมีใบเดี่ยวหรือแตกแขนงแบบคู่ ส่วนใบแบ่งแบบขนนก หรืออาจแตกแขนงคล้ายนิ้วมือ รูปร่างใบมีหลายแบบทั้งเรียวยาว รูปไข่ แบนกว้าง หรือแคบ พบบริเวณหาดหิน หรือเกาะตามสาหร่ายชนิดอื่น^[358]



A



B

ภาพที่ 22 *Palmaria*

ที่มา : A: <http://www.horta.uac>^[313]

B: <http://www.seaweedssofaraska.com>^[258]

Asparagopsis ทัลลัสมีสีแดงอ่อน เมื่อนำขึ้นจากน้ำสีจะจางลงและเปลี่ยนเป็นสีส้ม ลักษณะเป็นพุ่ม มีแกนของทัลลัสเป็นท่อรูปทรงกระบอก ขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 200 มิลลิเมตร มีการแตกแขนงไม่เป็นระเบียบ



ภาพที่ 23 *Asparagopsis*

ที่มา : <http://www.surialink.com>^[375]

ดิวิชันคลอโรไฟตา (Division Chlorophyta)

สาหร่ายสีเขียว (green algae)

สาหร่ายในดิวิชันนี้พบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล บนบก บริเวณผิวดินที่ชื้นแฉะ และในอากาศ ในรูปแบบของสปอร์ และยังพบว่ามีบางพวกดำรงชีวิตในลักษณะที่เป็นการเกาะอยู่บนพืชชนิดอื่น ซึ่งส่วนมากอาศัยอยู่ในน้ำ



ภาพที่ 24 ลักษณะองค์ประกอบเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวที่เป็นเซลล์เดี่ยวพวกที่เคลื่อนที่ได้
ที่มา : <http://www.agen.ufl.edu> [273]

1. ลักษณะทั่วไป (ภาพที่ 24)

สาหร่ายในกลุ่มนี้มีขนาดตั้งแต่เล็กมาก จนถึงขนาดใหญ่เป็นทลัสส์เห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า สาหร่ายพวกที่มีขนาดเล็กมักดำรงชีวิตในลักษณะที่เป็นแพลงก์ตอน สาหร่ายพวกที่มีขนาดใหญ่มักยึดเกาะบนพื้น สาหร่ายในกลุ่มนี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ทั้งรูปร่างเป็นแบบ unicell, colony, filament, parenchymatous form, siphonous form โดยมีทั้งสาหร่ายพวกที่เคลื่อนที่ได้ และพวกที่เคลื่อนที่ไม่ได้

2. รงควัตถุ

ประกอบด้วย chlorophyll-a, b และในสาหร่ายบางชนิดมี iron tannin complex ซึ่งเป็นรงควัตถุสีม่วงอยู่ในแควิวอล และพบรงควัตถุพวก α , β , δ -carotene, xanthophyll : lutein, violaxanthin, neoxanthin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนประกอบของเซลล์

3.1. คลอโรพลาสต์สามารถเห็นได้ชัดเจนและใช้ในการจัดกลุ่มย่อยได้อีกด้วย โดยคลอโรพลาสต์ มีหลายรูปร่างโดยมีทั้งเป็นรูปถ้วย รูปพองน้ำ รูปร่างแห รูปดาว เป็นขด รูปดาวยาว ขดเป็นวงรอบเซลล์ แถบข้างเซลล์หรือกลางเซลล์

3.2. อาหารสะสมมีไฟรินอยด์ซึ่งทำหน้าที่สร้างแป้งอยู่บนคลอโรพลาสต์ บางชนิดที่ไม่มีไฟรินอยด์ จะสะสมอาหารในรูปไขมัน แป้งที่สร้างขึ้นมาเป็นแป้งพวก amylose, amylopectin

3.3. ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวชั้นในเป็นเซลล์ลูโลส ชั้นนอกมีเมือกเป็นพวกเพกทิน บางชนิดอาจมีไคติน หินปูน หรือ silica หุ้มอีกทีหนึ่ง เวลาจับจึงรู้สึกกระด้างมือ สาหร่ายสีเขียวเป็นพวกยูคาริโอตโดยมี 1 หรือหลายนิวเคลียส พวกที่มีหลายนิวเคลียสคือมีหลายเซลล์แต่ไม่มีผนังกันระหว่างเซลล์จึงมองดูว่ามีหลายนิวเคลียสอยู่ในเซลล์เดียว

4. การเคลื่อนที่

สาหร่ายสีเขียวพวกเคลื่อนที่ได้จะพบว่ามี eye spot และหนวด

5. การสืบพันธุ์

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสีเขียวมีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศสาหร่ายจะสืบพันธุ์โดยสร้าง akinete สปอร์แบบต่าง ๆ หรือโดยการขาดท่อน การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ เป็นการรวมของ gamete

ตัวอย่างสกุลของสาหร่ายสีเขียวที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่ *Chlamydomonas*, *Carteria*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Gonium*, *Pandorina*, *Eudorina*, *Platydorina*, *Pleodorina*, *Volvox*, *Spondylomorom*, *Asterococcus*, *Tetraspora*, *Elakatothrix*, *Chlorococcum*, *Golenkinia*, *Pediastrum*, *Sorastrum*, *Coelastrum*, *Botryococcus*, *Chlorella*, *Dictyosphaerium*, *Planktosphaeria*, *Eremosphaera*, *Oocystis*, *Nephrocytium*, *Lagerheimia*, *Franceia*, *Treubaria*, *Dimorphococcus*, *Ankistrodesmus*, *Schroederia*, *Selenastrum*, *Quadrigula*, *Tetraedron*, *Scenedesmus*, *Actinastrum*, *Crucigenia*, *Tetrastrum*, *Micractinium*, *Hydrodictyon*, *Ulothrix*, *Microspora*, *Chaetophora*, *Draparnaldia*, *Draparnaldiopsis*, *Oedogonium*, *Bulbochaete*, *Percursaria*, *Monostroma*, *Enteromorpha*, *Ulva*, *Rhizoclonium*, *Chaetomorpha*, *Cladophora*, *Pithophora*, *Codium*, *Halimeda*, *Udotea*, *Penicillus*, *Avrainvillea*, *Chlorodesmis*, *Caulerpa*, *Bryopsis*, *Pseudobryopsis*, *Cladophoropsis*, *Siphonocladus*, *Valonia*, *Borgessenia*, *Dictyosphaeria*, *Microdictyon*, *Anadyomene*, *Struvea*, *Boodlea*, *Acetabularia*, *Neomeris*, *Cymopolia*, *Spirogyra*, *Zygnema*, *Mougeotia*, *Mesotaenium*, *Gonatozygon*, *Netrium*, *Closterium*,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย ปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Penium, Pleurotenium, Triploceras, Euastrum, Cosmarium, Micrasterias, Xanthidium, Staurostrum, Staurodesmus, Onychonema, Spondylosium, Hyalotheca, Desmidium

6. สาหร่ายสีเขียวที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้ที่มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนัก เช่น สกุล *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Nannochloropsis*, *Chlamydomonas*, *Dunaliella*, *Oocystis*, *Eudorina*, *Scenedesmus*, *Spirogyra*, *Oedogonium*, *Ulothrix*, *Microspora*, *Chaetophora*, *Ulva*, *Chaetomorpha*, *Cladophora*, *Codium*, *Caulerpa* และ *Schizomeris* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้

Chlorococcum สาหร่ายสกุลนี้อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว มีลักษณะกลมหรือรี มีไฟรีนอยด์ 1 อัน หรือมากกว่าอยู่บนคลอโรพลาสต์ซึ่งเป็นรูปถ้วย หรือเป็นแถบข้างเซลล์ พบทั่วไปบนดินที่ชื้นแฉะ



ภาพที่ 25 *Chlorococcum*

ที่มา : <http://silicasecchidisk.conncoll.edu> ^[251]

Chlorella สาหร่ายสกุลนี้เป็นเซลล์เดี่ยวขนาดเล็ก รูปร่างกลมหรือรี ผนังเซลล์ค่อนข้างบาง คลอโรพลาสต์เป็นรูปถ้วย มีไฟรีนอยด์ 1 อัน บนคลอโรพลาสต์ เป็นสาหร่ายที่มีโปรตีนสูง จึงนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดสาร *chlorellin* ออกมาจาก *Chlorella* ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องสำอาง



ภาพที่ 26 *Chlorella*

ที่มา : A: <http://www.rbgsyd.nsw.gov> ^[337]

B: <http://io.uwinnipeg.ca> ^[229]

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย

Chlamydomonas มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวรูปร่างกลม รี มีขนาด 2 เส้น คลอโรพลาสต์รูปถ้วย มี stigma บนคลอโรพลาสต์ เมื่อสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมจะสร้างแคโรทีนอยด์ขึ้นมาจำนวนมาก และผนังเซลล์หนากลายเป็น akinete



A



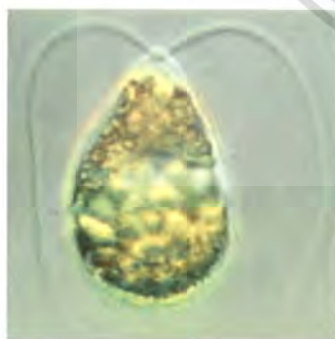
B

ภาพที่ 27 *Chlamydomonas*

ที่มา : A: <http://rydberg.biology.colostate.edu> ^[250]

B: <http://www.ucmp.berkeley.edu> ^[385]

Dunaliella เซลล์มีรูปร่างหลายแบบ รี ไข่ กระบอก ลูกแพร์ กระสวย เกือบกลม สมมาตรของเซลล์อาจเป็นแบบวัดมิ แบบ bilateral หรือเซลล์ทั้ง 2 ข้าง ไม่เหมือนกัน (asymmetry) เซลล์เปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไป เซลล์ไม่มีผนังและมักหุ้มด้วยสารเมือกหนวดยาวเท่ากัน 2 เส้น อยู่ทางด้านบนสุดของเซลล์ การเคลื่อนไหวของหนวดทั้ง 2 เส้นเหมือนกัน คลอโรพลาสต์ขนาดใหญ่ 1 อัน ในเซลล์มีแวคิวโอลกระจายอยู่ทั่วไป



A



B

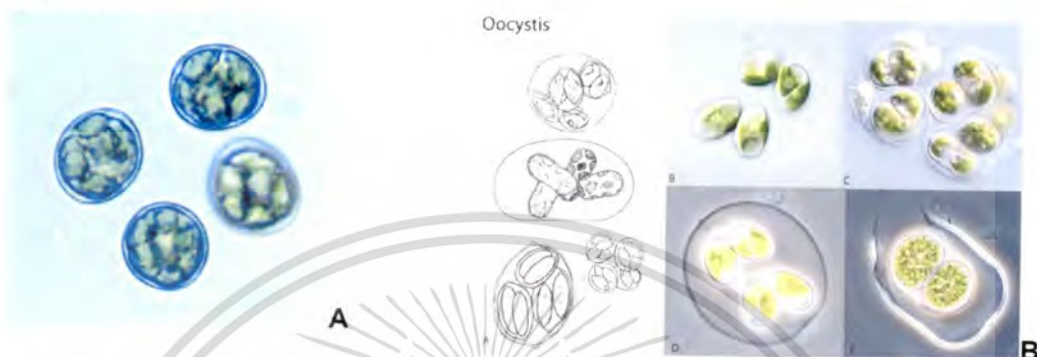
ภาพที่ 28 *Dunaliella*

ที่มา : A: www.biol.tsukuba.ac.jp ^[685]

B: <http://www.uwm.edu> ^[389]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Oocystis เซลล์อยู่เดี่ยว ๆ หรือเป็นกลุ่มเซลล์จำนวน 2-16 เซลล์ ภายในผนังเซลล์พ่อ-แม่ เซลล์รูปไข่หรือคล้ายทรงกระบอก หัวท้ายมักกลม หรืออาจมีกลุ่มปุ่มเห็นได้ชัดเจน คลอโรพลาสต์ มี 1 อัน หรือมากกว่า คลอโรพลาสต์มีรูปร่างหลายแบบ อาจมีรูปกลม เป็นแผ่น คล้ายรูปดาว หรือเป็นร่างแห มี 1 ไพร์นอยต์ใน 1 คลอโรพลาสต์บางชนิดอาจไม่มีไพร์นอยต์ เลยก็ได้



ภาพที่ 29 *Oocystis*

ที่มา : B: <http://www.rbgsyd.nsw.gov> [338]

Eudorina กลุ่มเซลล์ทรงกลมหรือรี มีเซลล์เดี่ยวประกอบอยู่จำนวน 16-32 เซลล์ แต่ละเซลล์รูปร่างกลม หรือค่อนข้างกลม มีขนาด 2 เส้น คลอโรพลาสต์รูปถ้วย มี stigma อยู่ ด้านบนใกล้โคนหลอด



ภาพที่ 30 *Eudorina*

Scenedesmus เป็นกลุ่มเซลล์ที่มีเซลล์เรียงต่อกันทางด้านข้าง กลุ่มละ 4, 8, 12 เซลล์ แต่ละเซลล์อาจรี ยาว กลมมน บางชนิดเซลล์ริมสุดมีหนามยื่นยาวออกมา บางชนิดมีหนามสั้น ๆ อยู่ที่ขอบเซลล์ คลอโรพลาสต์เป็นแถบอยู่ข้างเซลล์ สืบพันธุ์โดยการสร้าง autocolony เป็นสาหร่ายที่มีโปรตีนสูงพอกับ *Chlorella* จึงนิยมมาใช้อาหารในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

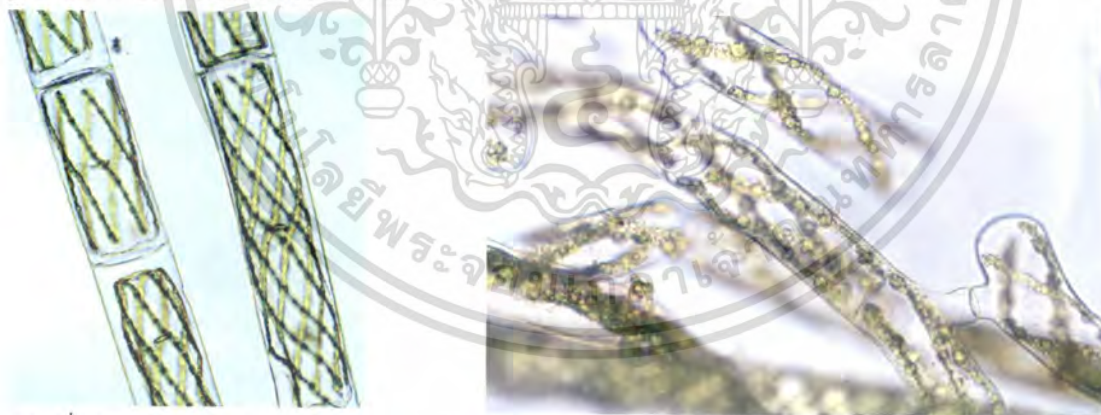


ภาพที่ 31 *Scenedesmus*

ที่มา : B: <http://www.microscopy-uk.org>^[323]

C: <http://www.rbgsyd.nsw.gov>^[344]

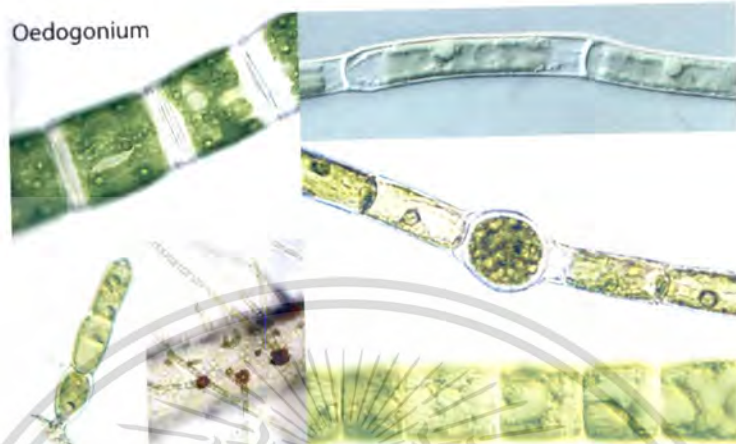
Spirogyra ชื่อสามัญคือ “เทา” สามารถนำมารับประทานได้ ลักษณะเป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง เหมือนเส้นผมแต่เป็นสีเขียว จับตัวรู้สึกลื่นมือเนื่องจากมีเมือกหุ้มภายนอก เซลล์รูปทรงกระบอกมีความยาวเท่ากับความกว้างไปจนถึงยาวหลายเท่าของความกว้าง คลอโรพลาสต์เป็นเส้นขดจากปลายข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่ง บนสายคลอโรพลาสต์มีไฟรินอยด์เรียงตลอดสาย กลางเซลล์เป็นแวคิวโอลขนาดใหญ่ นิวเคลียสแขวนลอยในแวคิวโอล โดยมีสาย cytoplasmic strand เชื่อมโยงยึดติดไว้กับผนังเซลล์ สืบพันธุ์โดยการขาดท่อน และการรวมของ amoeboid gamete โดยผ่านท่อเชื่อมระหว่างเซลล์หรือระหว่างเส้นสาย



ภาพที่ 32 *Spirogyra*

Oedogonium พบได้ในแหล่งน้ำจืด เป็นพวงเกาะตามก้อนหิน หรือเกาะตามพืชอื่น ๆ เป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง เซลล์ล่างสุดทำหน้าที่ยึดเกาะ เซลล์อาจสั้นหรือยาวเป็นรูปทรงกระบอก คลอโรพลาสต์เป็นรูปดาวยาวอยู่ข้างเซลล์ แบ่งเซลล์แบบ intercalary cell division โดยผนังเซลล์นอกสุดเพิ่มความหนาขึ้น ผนังเซลล์ชั้นในยืดยาวออก ผนังชั้นนอกขาดเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นาเบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่เท่าที่ 6 ภารกิจค้ำหลักและลักษณะของสำคัญแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปล้องเรียก apical cap และเกิดเป็นผนังเซลล์ตัดขวางได้เซลล์ใหม่ 2 เซลล์ และยังมีการสืบพันธุ์โดยการสร้าง zoospore หรือสืบพันธุ์แบบ oogamy โดยเซลล์สืบพันธุ์เพศเมียเรียก egg เซลล์สืบพันธุ์เพศผู้เรียก antherozoid



ภาพที่ 33 *Oedogonium*
ที่มา : <http://www.rbgsyd.nsw.gov> [340]

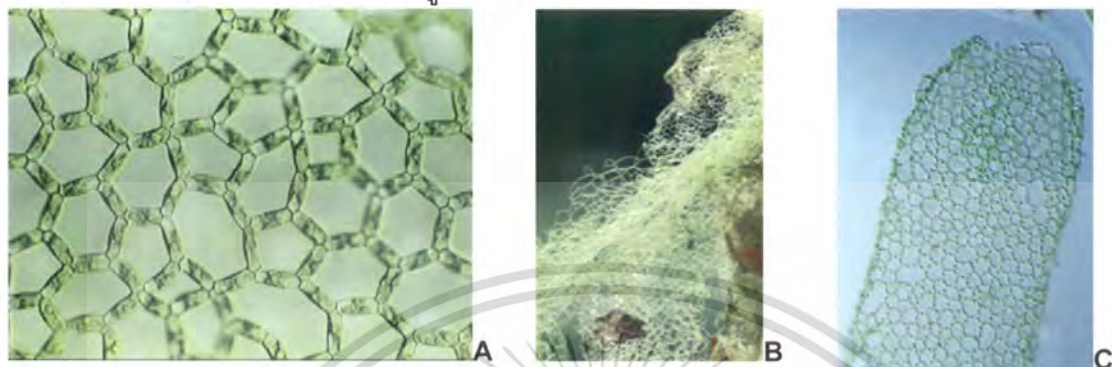
Ulothrix เป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง เซลล์ล่างสุดทำหน้าที่คล้ายรากยึดเกาะ (holdfast) แต่ละเซลล์เป็นรูปทรงกระบอก มีนิวเคลียส 1 อัน คลอโรพลาสต์เป็นแผ่นอาจเต็มทั้งเซลล์ หรือเป็นวงอยู่ตรงกลาง และอาจหุ้มรอบหรือเกือบรอบ พบได้ทั้งน้ำจืด และน้ำเค็ม



ภาพที่ 34 *Ulothrix*
ที่มา : <http://www.rbgsyd.nsw.gov> [341]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้อ่านและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hydrodictyon เป็นกลุ่มเซลล์แบบที่มีจำนวนเซลล์แน่นอน ไม่เกิดทดแทน มีลักษณะเหมือนถุงยาว ๆ ที่ทำด้วยตาข่ายและมีหัว ท้ายปิด บางชนิดยาวถึง 1 เมตร แต่ละเซลล์รูปทรงกระบอกเรียงต่อกันเป็นรูปตาข่าย แต่ละช่องตาข่ายประกอบด้วย 6 เซลล์ (อาจมีเพียง 3 หรือมากถึง 9 เซลล์) คลอโรพลาสต์เป็นรูปตาข่าย



ภาพที่ 35 *Hydrodictyon*

ที่มา : A: <http://www.biol.tsukuba.ac.jp> ^[278]

B: <http://hydrodictyon.eeb.uconn.edu> ^[226]

C: <http://www.microscopy-uk.org> ^[322]

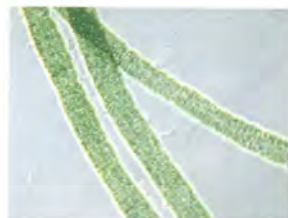
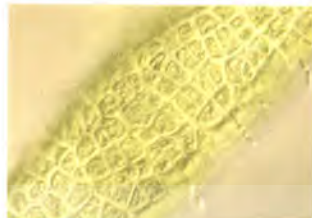
Microspora เป็นเส้นสายที่มีส่วนคล้ายรากยึดเกาะกับพื้นในขณะที่ยังอ่อนอยู่ เมื่อโตขึ้นจะหลุดลอยน้ำเป็นอิสระ ผนังเซลล์มีลักษณะเป็นรูปตัว “H” เกยซ้อนกัน เมื่อขาดท่อนจะขาดตรงรอยต่อนี้ คลอโรพลาสต์เป็นรูปตาข่าย สืบพันธุ์โดยการขาดท่อน สร้างสปอร์หรือ akinete



ภาพที่ 36 *Microspora*

ที่มา : <http://www.rbgsyd.nsw.gov> ^[339]

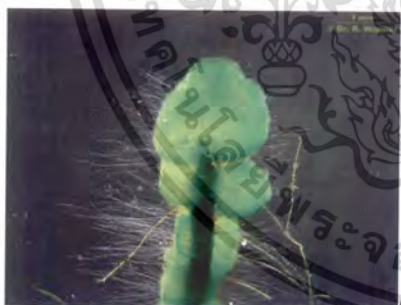
Schizomeris เป็นเส้นสายไม่แตกแขนง ยึดเกาะกับพื้น ตามพืชน้ำ หรือก้อนหิน เส้นสายเป็นรูปทรงกระบอก บริเวณโคนที่ยึดติดกับพื้นมักมีรอยคอดเล็กน้อย เซลล์ตอนโคนเรียงกันแถวเดียว ถัดขึ้นมาเซลล์เรียงกันหลายแถว ขนาดความกว้างเซลล์ไม่เท่ากัน



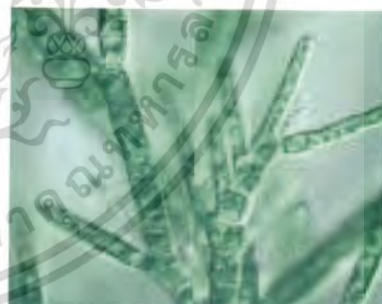
ภาพที่ 37 *Schizomeris*

ที่มา : <http://www.rbgsyd.nsw.gov>^[342]

Chaetophora เป็นเส้นสายที่แตกแขนงได้ มีส่วนโคนยึดเกาะ บางชนิดเส้นสายฝังในสารวุ้น มีลักษณะเป็นก้อนกลมหรือยาว บางชนิดมีหินปูนคลุมส่วนโคน เซลล์มีขนาดใหญ่ ประกอบด้วย คลอโรพลาสต์ที่มีลักษณะเป็นแถบ พบในแหล่งน้ำจืด อาจเป็นพื้เกาะตามพืชน้ำอื่นหรือเกาะตามก้อนหิน



A



B

ภาพที่ 38 *Chaetophora*

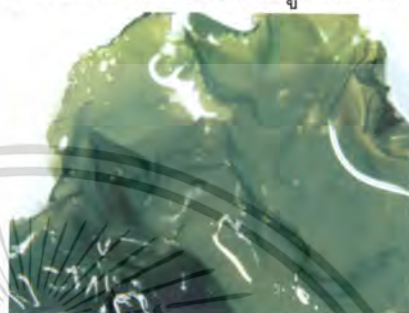
ที่มา : A: <http://www.dr-ralf-wagner.de>^[302]

B: <http://www.glerl.noaa.gov>^[311]

Ulva พบในทะเล มีชื่อสามัญคือ “sea lettuce” หรือ “ผักกาดทะเล” ทั่วลัสเป็นแผ่นบาง มีความหนา 2 ชั้นเซลล์ ส่วนล่างเป็น holdfast ต้นที่งอกใหม่ ๆ มีเซลล์เรียงกันแถวเดียว ต่อมาหลายแถวและมี 2 ชั้นเหมือน *Enteromorpha* แต่ 2 ชั้นนี้ไม่แยกจากกัน การเจริญโดยแบ่งเซลล์ทั้งในแนวกว้างและแนวยาว จึงแผ่ออกเป็นแผ่น และมีรอยจีบอยู่ตรงขอบ



A



B

ภาพที่ 39 *Ulva*

ที่มา : A: <http://www.jonolavsakvarium.com> [315]

Chaetomorpha พบในทะเลแพร่กระจายอยู่ทั่วโลก พบเกาะบนหิน บนเปลือกหอยในน้ำ เป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง เซลล์ล่างสุดค่อนข้างยาวทำหน้าที่เป็น holdfast อาจขึ้นอยู่เป็นเส้นเดี่ยว ๆ หรือขึ้นเป็นกระจุก เซลล์มีลักษณะเหมือนถังเบียร์ ตรงกลางเซลล์ป่อง เซลล์เรียงต่อกันเป็นสายตรงหรือขดงอ คลอโรพลาสต์เป็นรูปดาวยาว แยกเป็นตอน ๆ หรือเป็นปล้อง ๆ ใช้ประโยชน์โดยการสกัดสารวันจากสาหร่ายนี้



A



B

ภาพที่ 40 *Chaetomorpha*

ที่มา : A: <http://www.frontiernet.net> [307]

B: <http://www.oceanproaquatics.com> [329]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าทางใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cladophora มีชื่อสามัญที่เรียกพวกที่พบในน้ำจืดว่า “lake ball” ส่วนพวกที่พบในน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มจะเรียกว่า “cladophora ball” ทลัสมีลักษณะเป็นเส้นสายแตกแขนง เซลล์ตอนล่างทำหน้าที่เป็น holdfast เซลล์เป็นรูปทรงกระบอกมีความยาวมากกว่าความกว้าง ผั่นเซลล์มีสามชั้น ชั้นในเป็นสารพวกเซลลูโลส ชั้นกลางเป็นพวกเพกทิน ชั้นนอกสุดเป็นไคติน คลอโรพลาสต์เป็นรูปดาซ่าย พบได้ทุกแห่งทั่วโลกทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม บางชนิดขึ้นเป็นก้อนกลม ขนาด 2-10 เซนติเมตร ภายในมีเส้นสายแตกแขนงจำนวนมาก ตรงกลางจึงไม่ได้รับแสง เกิดการตายและเน่าเกิดแก๊สดันให้ก้อนของสาหร่ายลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำ

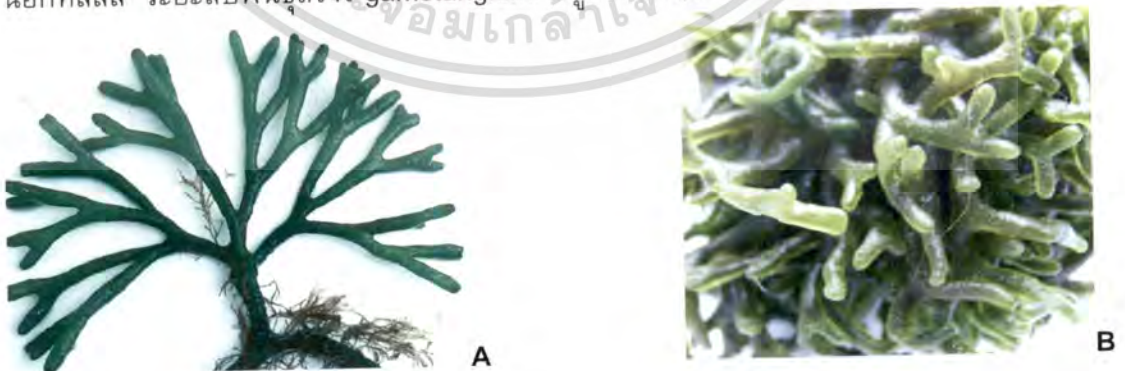


ภาพที่ 41 *Cladophora*

ที่มา : A: <http://courses.bio.psu.edu> [204]

B: <http://www.plantgeek.net> [335]

Codium พบในทะเล ลักษณะมีทั้งเป็นแบบก้อนกลมภายในกลวงหรือตัน แบบเป็นต้นตั้งตรงแตกแขนงเหมือนเขากวาง หรือคืบคลานอยู่ตามพื้นเมื่อจับดูจะรู้สึกหยุ่นมือแบบฟองน้ำ ไม่มีหินปูนหุ้ม เมื่อตัดขวางทลัสจะพบว่ากลางทลัสเป็นหลอดหรือท่อประสานกันแน่น ไม่มีมีส่วนที่ยูริมนอกเป็นส่วนที่มีส่วนปลายหลอดพองเป็นถุงรี ๆ เรียก utricle เรียงกันตลอดผิวนอกทลัส ระยะสืบพันธุ์สร้าง gametangium อยู่บน utricle



ภาพที่ 42 *Codium*

ที่มา : A: <http://massbay.mit.edu> [235]

Caulerpa พบในทะเล มีชื่อสามัญคือ “สาหร่ายพวงองุ่น” ทัลลัสเป็นท่อนติดต่อกันตลอด มีส่วนคล้ายรากฝอยทำหน้าที่ยึดเกาะ และทอดแขนงออกเป็นระยะ ๆ ส่วนที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงมีลักษณะคล้ายใบเรียกว่า ramulus ซึ่งมีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ กัน บางชนิดกลมหรือแบน หรือเป็นเส้นเหมือนขนนก ทัลลัสมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ บางชนิดอาจยาวถึง 1 เมตร ขึ้นตามพื้นทรายปนโคลน หรือเกาะบนซากปะการัง รับประทานได้ ใน *Caulerpa* จะมีสาร caulerpine หรือ caulerpicin ซึ่งเป็นสารที่มีพิษ ในรายที่แพ้จะมีอาการคัน ชาที่ริมฝีปาก แต่จะเป็นเพียงชั่วคราวระยะสั้น ๆ แล้วก็จะหาย



A



B

ภาพที่ 43 *Caulerpa*

ที่มา : A: <http://www.bio.mtu.edu>^[277]

ดิวิชันพลาซิโนไฟตา (Division Pracinophyta)

1. ลักษณะทั่วไป

ขนาดเล็กมาก มีหนวด เซลล์มักมีสีเขียวมะกอก ลักษณะของเซลล์มีรูปร่างเซลล์เป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือแบนข้าง หรือแบนจากบนลงล่าง มีตาอยู่ในคลอโรพลาสต์ บางสกุลมี ejectosome ทำหน้าที่ป้องกันตัวเช่นในสกุล *Pyramimonas*

2. รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

ประกอบด้วย chlorophyll-a, b, β , δ -carotene, xanthophyll : lutein, neoxanthin มีคลอโรพลาสต์ รูปร่างเป็นแผ่น หรือกลม

3. ส่วนประกอบของเซลล์

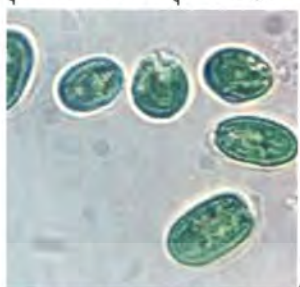
- อาหารสะสมเป็นแป้ง amylose และ amylopectin
- ผนังเซลล์มีส่วนของเซลล์หุ้มด้วยเกล็ดที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ บางครั้งมีลักษณะเหมือนเปลือกหุ้มเซลล์
- หนวด มี 1, 2, 4, 6 หรือ 8 เส้น บนหนวดมีขนแข็ง หนา มีเกล็ดคลุมหนวด

ตัวอย่างสาหร่ายที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่สกุล *Pyramimonas*, *Tetraselmis*, *Platymonas* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้

4. สาหร่ายที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างสาหร่ายในดิวิชันนี้ที่มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักได้แก่ *Tetraselmis* และ *Platymonas* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุลดังนี้

Tetraselmis สาหร่ายสกุลนี้เซลล์มีขนาดเล็กมาก มีหนวด เซลล์มักมีสีเขียวมะกอก เซลล์แบนข้าง มีเกล็ดคลุมเซลล์ มีหนวด 4 เส้น ปลายบนสุดของเซลล์เว้าเป็นแฉ่ง พบในน้ำเค็ม สกุลนี้อาจรวมสกุล *Platymonas* ด้วย



A



B

ภาพที่ 44 *Tetraselmis*

ที่มา : A: <http://www.uae.gov> ^[383]

B: <http://www.marinebiology.edu> ^[319]



ภาพที่ 45 *Platymonas*

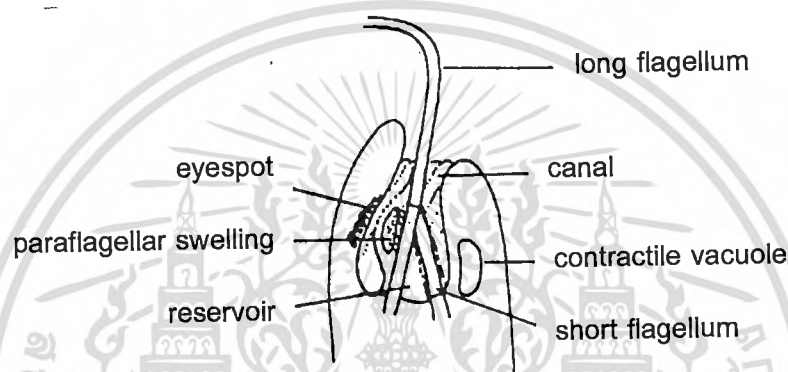
ที่มา : <http://www4.eas.asu.edu> ^[396]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าที่ใดหรือในลักษณะใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิวิชันยูกลีโนไฟตา (Division Euglenophyta)

ยูกลีโนอยด์ (euglenoid)

สาหร่ายกลุ่มนี้เป็นพวกสาหร่ายที่มีหนวด มีสีเขียวหรือไม่มีสี โดยมีหนวด 2 เส้น (หรือหลายเส้น) ตำแหน่งของหนวดอยู่ทางด้านหน้า (anterior) และมักพบว่ามี stigma เป็นองค์ประกอบของเซลล์ (ภาพที่ 46)



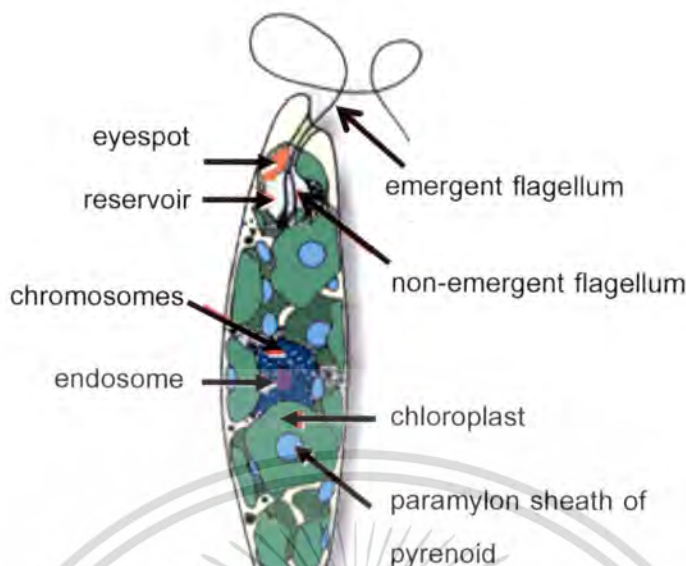
ภาพที่ 46 ไดอะแกรมแสดงส่วนหน้าของยูกลีโนอยด์
ที่มา : กาญจนภาชนะ (2527)^[714]

1. รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

รงควัตถุจะประกอบด้วย chlorophyll a, b, β -carotene เล็กน้อย และ xanthophyll ชนิด lutein, neoxanthin, astaxanthin ถ้าเลี้ยงยูกลีโนอยด์ในที่ไม่มีแสงคลอโรฟิลล์จะลดลงจนไม่เหลือเลย กลายเป็นเซลล์ของยูกลีโนอยด์ที่ไม่มีสี คลอโรพลาสต์มีรูปร่างลักษณะทั้งขนาดเล็กใหญ่ รูปกลมแบน (discoid), เป็นแถบยาว (ribbon like), เป็นแฉกรูปดาว (stellate) โดยคลอโรพลาสต์ของยูกลีโนอยด์จะมีสีเขียวสด

ยูกลีโนอยด์หลายชนิดมี hematochrome ซึ่งมักพบในยูกลีโนอยด์พวกที่อยู่ในแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์สูง มีอุณหภูมิเกิน 30 องศาเซลเซียส พวกนี้มักลอยตามผิวหน้าน้ำ เวลาแสงจัดจะมีสีแดง เนื่องจาก granule ของ hematochrome หรือ euglenarhodon ในเซลล์เคลื่อนที่มาล้อมรอบคลอโรพลาสต์เอาไว้เพื่อป้องกันอันตรายจากแสงที่จัดเกินไป พอแสงจางลง granule สีแดงจะเคลื่อนที่ไปรวมกันกลางเซลล์ คลอโรพลาสต์จะเคลื่อนที่มาอยู่ภายนอกเซลล์ จึงเห็นเซลล์เป็นสีเขียวเช่นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่าย



ภาพที่ 47 ลักษณะเซลล์ของยูกลีนอยด์
ที่มา : <http://hypnea.botany.uwc.ac.za> [227]

2. ส่วนประกอบของเซลล์

2.1. อาหารสะสม แป้งที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า paramylon (β -1,3 polymer ของ glucose) ลักษณะเป็นแป้งที่ไม่ละลายน้ำ ต่างจากแป้งของสาหร่ายสีเขียวโดยทั่วไปซึ่งเป็นพวก α -1,4 linked polymer ของ glucose

2.2. ผนังเซลล์ ยูกลีนอยด์เป็นพวกไม่มีผนังเซลล์ที่แท้จริง มีส่วนหุ้มเซลล์ชั้นนอกสุดคือ plasmalemma ถัดเข้าไปเป็นชั้นของโปรตีนเรียก pellicle ขอบของ pellicle ที่เกยซ้อนกันอยู่ อาจมองเห็นเป็นแถบตามความยาวของเซลล์ pellicle

2.3. หนวดมี 2 เส้นหรือหลายเส้น พวกมี 2 เส้นจะมีจุดตั้งต้นอยู่ในกระเปาะด้านบนเซลล์ gullet เป็นส่วนเว้าเข้าไปในเซลล์ รูปร่างคล้ายขวดชมพู มีส่วนคล้ายคอเรียก canal ส่วนล่างของคอกว้างใหญ่เรียก reservoir โดยหนวดจะมีแบบเป็นหนวดที่มีความยาวมากจนโผล่พ้นกระเปาะ หนวดที่สั้นจนไม่สามารถโผล่พ้นออกมาจาก กระเปาะด้านบน ดังนั้นจึงมองเห็นหนวดของพวกยูกลีนอยด์ได้เพียงเส้นเดียว (ภาพที่ 47)

2.4. คอนแทร็กไทล์แวกิวโอล (contractile vacuole) มีหน้าที่ปรับสมดุลของน้ำในเซลล์ มีตำแหน่งอยู่ทางด้านหน้าของเซลล์ติดกับ reservoir โดยจะขับน้ำออกจาก reservoir ผ่านออกมาทาง canal และออกนอกเซลล์ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่บทที่ 6 การจัดพิมพ์และลักษณะของสำเนาแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5. นิวเคลียสของพวกลูกอินทรีย์มี 1 อัน (ช่วงแบ่งเซลล์จะเห็นมากกว่า 1) มีขนาดใหญ่ เห็นได้ชัดเจน อยู่บริเวณกลางเซลล์หรือค่อนข้างไปทางส่วนท้ายของเซลล์

2.6. eye spot เป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่รับแสง มีตำแหน่งอยู่ติดกับ reservoir โดยอยู่ในไซโทพลาซึม ซึ่งต่างจากในสาหร่ายอื่น ๆ ที่ eye spot จะอยู่ในคลอโรพลาสต์ อวัยวะนี้ นอกจากรับแสงแล้วยังทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของเซลล์อีกด้วย

3. แหล่งที่พบ

สาหร่ายกลุ่มลูกอินทรีย์สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม บริเวณที่ชื้นแฉะ โดยเฉพาะแหล่งน้ำจืดที่มีสารอินทรีย์อุดมสมบูรณ์จะพบสาหร่ายกลุ่มนี้ได้มาก ถ้าเกิดการ bloom ของลูกอินทรีย์จะทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียว แดง หรือน้ำตาลปนเหลือง สาหร่ายพวกลูกอินทรีย์บางชนิดจะขึ้นอาศัยอยู่บนสาหร่ายชนิดอื่น บนซากเน่าเปื่อยของพืช หรือเกาะตามตัวและยางค์ของพวก crustacean ลูกอินทรีย์พวกที่มีสีเมื่อเลี้ยงในที่ที่ไม่มีแสงสว่างนาน ๆ จะทำให้เป็นพวกลูกอินทรีย์ที่ไม่มีสี

4. การสืบพันธุ์

4.1. แบบไมอัสัยเพศ ซึ่งลูกอินทรีย์ส่วนใหญ่มีการสืบพันธุ์แบบนี้ โดยการแบ่งเซลล์ อาจเกิดในเซลล์ปกติที่มีการเคลื่อนไหว หรือเกิดในระยะพัก ซึ่งการแบ่งเซลล์ขณะเคลื่อนไหว คือ เกิดการแบ่งนิวเคลียสแบบ mitosis จากนั้นแบ่งโคนหนดเป็น 2 ส่วน และแบ่งเซลล์เป็นร่องตรง reservoir จนแยกออกจากกัน ได้ 2 เซลล์ของลูกอินทรีย์ที่มีขนาดเท่ากัน รูปร่างลักษณะเหมือนกัน และอีกแบบคือแบ่งเซลล์ระยะพัก โดยเซลล์ขับสารเมือกมาหุ้มตัวไว้ ต่อมาแบ่ง protoplast ได้จำนวนมากจนเป็นกลุ่มเซลล์แบบ palmelloid colony แต่ละ protoplast เมื่อหลุดออกมาจะว่ายน้ำเป็นอิสระมีลักษณะเหมือนฟอง แม่เต็มทุกประการ

4.2. แบบอาศัยเพศ จะพบน้อยมาก โดยการแบ่งนิวเคลียสแบบ meiosis พบใน *Phacus* ชนิดหนึ่ง

ตัวอย่างสกุลของสาหร่ายที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่ *Eutreptia*, *Euglena*, *Astasia*, *Trachelomonas*, *Strombomonas*, *Colacium*, *Phacus*, *Lepocinclis*, *Euglenomorpha*, *Paranema*

5. ลูกอินทรีย์ที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้ที่มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักได้แก่ *Euglena* โดยมีลักษณะของสกุลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Euglena มักพบในน้ำจืด เป็นเซลล์เดี่ยวมีขนาด 2 เส้น แต่โผล่ให้เห็นเพียงเส้นเดียว เยื่อหุ้มเซลล์ลักษณะเป็นแถบ บิดพาดบนเซลล์ บางชนิดมีปุ่มที่ผิวเซลล์ ร่องหนวดอยู่ทางด้านหน้าเยื้องมาด้านข้างเล็กน้อย คลอโรพลาสต์กลมแบน หรือเป็นแถบยาว อาจมีหรือไม่มีไฟรีโนยด์ ระยะเข้าซิสต์ (cyst) จะมีเมือกหุ้มภายนอก และเซลล์เคลื่อนไหวในซิสต์



ภาพที่ 48 *Euglena*

ดิวิชันแคโรไฟตา (Division Charophyta)

สาหร่ายไฟ (brittleworts, stoneworts)

สาหร่ายในกลุ่มนี้พบมากในบ่อน้ำจืดในทะเลสาบ หรือแหล่งน้ำที่มีหินปูนละลายอยู่ มีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูงมาก เช่น มีส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายลำต้น ใบ และราก มีส่วนคล้ายลำต้นเห็นเป็นข้อ (node), ปล้อง (internode) แต่ละข้อมีแขนงแตกออกโดยรอบ คล้ายใบ แหล่งที่พบพบทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย พืชน้ำทราย พืชน้ำโคลน มี rhizoid ยึดเกาะ บางชนิดขึ้นในบริเวณที่เป็นหินปูน พวกนี้จึงมีหินปูนเคลือบตามต้น สาหร่ายกลุ่มนี้เจริญได้เร็วมากบางครั้งขึ้นปิดกั้นทางเดินของน้ำ



ภาพที่ 49 ลักษณะของสาหร่ายไฟ และอวัยวะสืบพันธุ์

ที่มา : <http://mail.menr.gov.ua> ^[234]

1. ลักษณะทั่วไป

สาหร่ายกลุ่มนี้พวกที่ขึ้นในน้ำนิ่งส่วนที่คล้ายลำต้นจะตั้งต้นตรง ถ้าขึ้นในน้ำไหลส่วนที่คล้ายลำต้นจะเอนไปตามน้ำ บางชนิดยาวถึง 1 เมตร หรือยาวมากกว่านี้ ส่วนข้อ และปล้องเป็นเซลล์เดี่ยวที่ยึดยาวออก โดยส่วนข้อประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์

รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงประกอบด้วย chlorophyll-a, b, β -carotene

อาหารสะสมเป็นแป้ง amylose, amylopectin

การสืบพันธุ์จะสร้างอวัยวะสืบพันธุ์ที่มีลักษณะพิเศษไม่เหมือนพืชชนิดอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทางปัญญาสงวนลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเจริญเติบโต

จุดเจริญอยู่ที่เซลล์ปลายสุด (apical cell) โดยทำการแบ่งเซลล์แนวตั้งฉากกับแกน โดยเซลล์ที่เป็นปล้องจะยืดตัวยาวออก และเซลล์ที่เป็นข้อแบ่งแนวขนานได้เซลล์กลาง (central cell) และเซลล์ล้อมรอบ (pericentral cell) จำนวน 6, 8 หรือ 10 อัน เซลล์ล้อมรอบแบ่งต่อไปได้เป็นเซลล์ซึ่งโป่งออกเป็นเซลล์ยอดของแขนงย่อย และแบ่งเซลล์ต่อไปได้เป็นแขนงย่อยรอบข้อ แขนงย่อยหรือแขนงข้าง (lateral branch) จะยื่นยาวออกด้านข้างแต่ไม่ยาวเท่าแขนงหลักของต้น (main axis) เมื่อแบ่งได้จำนวนหนึ่งแล้ว เซลล์ยอดจะหยุดแบ่งเปลี่ยนรูปร่างให้แหลมขึ้น แต่ละข้อสามารถสร้างส่วนคล้ายรากยึดเกาะดูดเกลือแร่ได้ เซลล์คล้ายรากเกิดจากเซลล์ล้อมรอบของข้อล่าง ๆ มักเกิดในข้อที่ฝังในทราย โคลน

3. การสืบพันธุ์

3.1. แบบไม่อาศัยเพศ โดยการขาดท่อน ท่อนใหม่สร้างส่วนคล้ายราก ขอยึดเกาะสำหรับยึดเกาะและเจริญเป็นต้นที่สมบูรณ์ ขอบริเวณโคนอาจสร้างแขนง ส่วนคล้ายรากที่สืบหลานไปตามพื้นอาจสร้างหน่อเพื่องอกใหม่

3.2. แบบอาศัยเพศ สร้าง globule (เพศผู้) ผสมกับ nucule (เพศเมีย) ผสมแบบ oogamy อวัยวะสืบพันธุ์เกิดตรงข้อของแขนงย่อยซึ่งมีลักษณะคล้ายใบ โดยเจริญมาจากเซลล์ล้อมรอบของข้อ ยกเว้น *Nitella* ที่ globule เจริญมาจากเซลล์ยอดของแขนงย่อย

4. ประโยชน์และโทษ

สาหร่ายในคลาสนี้มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า สาหร่ายไฟ มาดไฟ สายร้อน เพราะเชื่อว่าบริเวณที่สาหร่ายไฟขึ้นอยู่จะทำให้มีความร้อนสูง ทำให้น้ำบริเวณนั้นร้อน ถ้าสาหร่ายชนิดนี้มีปริมาณมากในระยะที่ปลุกกล้าข้าวจะทำให้ต้นกล้าตายเนื่องจากความร้อนสูงเกินไป แต่ในความเป็นจริงเนื่องมาจากในบริเวณที่พบสาหร่ายชนิดนี้มักจะพบว่ามีหินปูนอยู่ในแหล่งน้ำสูงซึ่งตัวหินปูนนี้เองที่ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าแหล่งน้ำทั่วไป และสาหร่ายชนิดนี้ยังเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ปิดกั้นทางเดินน้ำ แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นอุปสรรคในการสัญจรทางน้ำได้อีกด้วย

ประโยชน์ของสาหร่ายคลาสนี้คือช่วยเพิ่มออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ ช่วยทำให้น้ำใสเพราะใบและก้านสามารถช่วยดักตะกอนในแหล่งน้ำ และยังให้ร่มเงาสัตว์น้ำ เป็นที่ยึดเกาะสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ในน้ำที่เป็นอาหารปลา ใช้เป็นปุ๋ยและใช้แก้ดินที่เป็นกรดเพราะมี calcium oxide และ calcium carbonate สูง และผลิตสารบางอย่างทำลายตัวอ่อนแมลง เช่น ลูกน้ำ

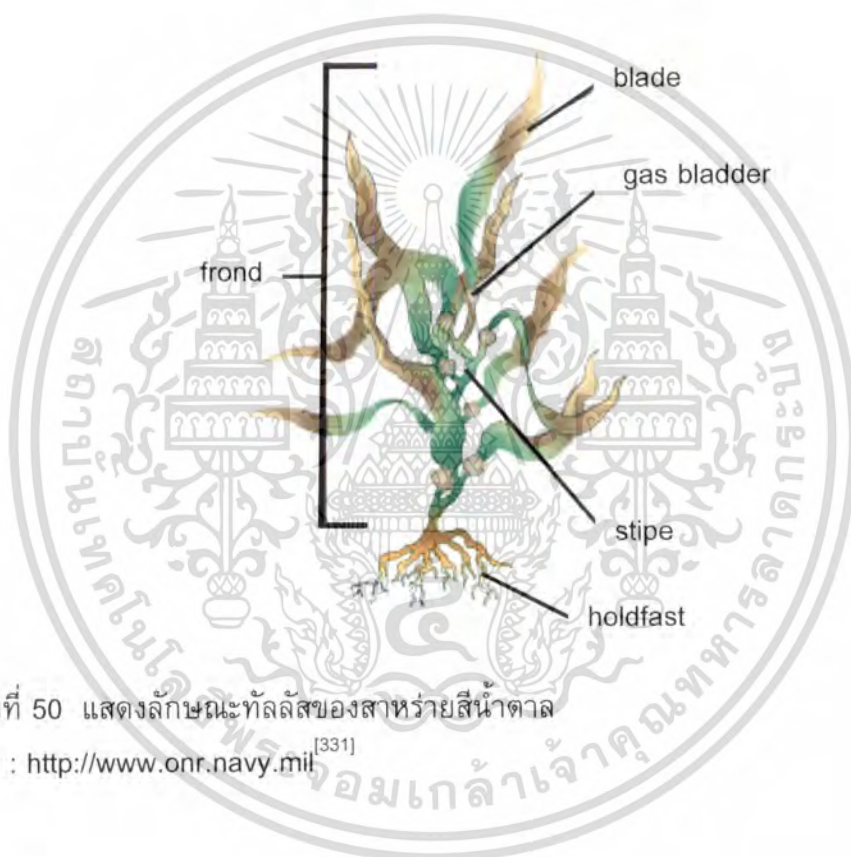
ตัวอย่างสกุลของสาหร่ายที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่ *Nitella*, *Tolypella*, *Nitellopsis*

สาหร่ายในดิวิชันนี้ยังไม่พบรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนัก

ดิวิชันไฟโอไฟตา (Division Phaeophyta)

สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae)

สาหร่ายสีน้ำตาลส่วนใหญ่พบในน้ำทะเลและน้ำกร่อย พบในน้ำจืดเพียงเล็กน้อย และพบอยู่ในเขตอบอุ่นและเขตหนาวมากกว่าเขตร้อน ส่วนใหญ่เป็นพวกยึดเกาะตามก้อนหิน หรือตามพืชชนิดอื่น สาหร่ายสีน้ำตาลบางชนิดเป็นพวก select host คือเป็นพวกที่เลือกชนิดของ host ที่ตัวสาหร่ายจะยึดเกาะ



ภาพที่ 50 แสดงลักษณะทลลัสของสาหร่ายสีน้ำตาล

ที่มา : <http://www.onr.navy.mil>^[331]

1. ลักษณะทั่วไป^[714]

1.1. เป็นพวกที่มีขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า พวกที่มีขนาดใหญ่มาก เรียกว่า kelp อาจมีความยาวมากถึง 60-70 เมตร โดยสาหร่ายสีน้ำตาลจะมีส่วนประกอบคือ ส่วนของ holdfast คือส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายรากช่วยในการยึดเกาะ stipe/ cauloid คือส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายต้น blade/ lamina/ phylloid คือส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายใบ ในสาหร่ายบางชนิดมีส่วนของ gas bladder/ air bladder/ pneumatocyst อยู่ที่โคนใบเพื่อช่วยพยุงให้ลอยตัวอยู่ในน้ำได้ โดยส่วนตั้งแต่เหนือ holdfast ขึ้นไปจนถึงปลาย blade เรียกว่าเป็นส่วนของ frond (ภาพที่ 50)

1.2. รงควัตถุที่พบในสาหร่ายสีน้ำตาลประกอบด้วย chlorophyll-a, c, β -carotene, xanthophyll เนื่องจากมี β -carotene กับ xanthophyll มากกว่าคลอโรฟิลล์จึงมีสีน้ำตาล น้ำตาลแกมเขียว

1.3. ส่วนประกอบของเซลล์ ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล มี 2 ชั้น ชั้นในเป็นสารพวก เซลลูโลสชั้นนอกเป็นสารเมือก สาหร่ายสีน้ำตาลเป็นพวกที่มีกรดแอลจินิกที่ผนังเซลล์ และที่ช่องว่างระหว่างเซลล์ โดยมีอยู่ประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง เมื่อสกัดกรดออกมาจากสาหร่ายจะอยู่ในรูปของเกลือ alginate โดยสามารถใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีคุณสมบัติเป็นตัวทำให้เกิด emulsion (emulsifying agent) และเป็นตัวคงรูป stabilizing agent

1.4. คลอโรพลาสต์ มีลักษณะกลมแบน (discoid or platelike) หรือเป็นแฉกรูปดาว อาจมีเพียง 1 อัน หรือมีจำนวนมากในแต่ละเซลล์ มีนิวเคลียส 1 อันในแต่ละเซลล์ มีแวคิวโอลขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางหรือข้างเซลล์ บางชนิดมีแวคิวโอลขนาดเล็กจำนวนมาก มีส่วนของ fucosan granule เป็นถุงเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วไปในเซลล์ ภายในถุงเป็นสารพวก fucosan มีคุณสมบัติคล้ายกับสารพวก tannin fucosan เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึม

1.5. อาหารสะสมของสาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำพวก lamarin, laminaran อาหารสะสมประเภท hexahydric alcohol พวก mannitol และอาหารสะสมประเภท sucrose และ glycerol

2. การสืบพันธุ์

2.1. แบบไม่อาศัยเพศ บางชนิดสามารถขยายพันธุ์โดยการขาดตอน บางชนิดสร้างแขนงพิเศษเรียก propagule/ propagulum ซึ่งสามารถหลุดไปงอกเป็นต้นใหม่ได้

2.2. แบบอาศัยเพศ เซลล์สืบพันธุ์ส่วนมากลักษณะเป็นรูปไข่ ทั้งสปอร์และแกมีต

ตัวอย่างสกุลของสาหร่ายที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่ *Ectocarpus*, *Ralfsia*, *Sphacelaria*, *Dictyota*, *Dictyopteris*, *Padina*, *Zonaria*, *Colpomenia*, *Hydroclathrus*, *Rosenvingea*, *Chorda*, *Laminaria*, *Postelsia*, *Nereocystis*, *Macrocystis*, *Alaria*, *Eisenia*, *Ascophyllum*, *Fucus*, *Sargassum*, *Turbinaria*, *Cystoseira*, *Durvillaea*, *Ecklonia*, *Undaria*, *Lessonia*, *Kjellmaniella*, *Bifurcaria*

3. สาหร่ายสีน้ำตาลที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้ที่มีรายงานว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักได้แก่สกุล *Padina*, *Laminaria*, *Macrocystis*, *Ascophyllum*, *Fucus*, *Sargassum*, *Cystoseira*, *Durvillaea*, *Ecklonia*, *Lessonia*, *Kjellmaniella*, *Undaria* และ *Bifurcaria* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Padina มีชื่อสามัญคือ “เห็ดหิน เห็ดหูหนูทะเล สหายพัด” พบในเขตอบอุ่นและเขตร้อนทั่วโลก ทัลลัสเป็นแผ่นแบนบางแผ่ออกเหมือนรูปพัด มีความหนา 1-8 เซลล์ ขอบทัลลัสม้วนลงด้านล่าง holdfast รูปถ้วย ที่ผิวด้านบนหรือทั้งด้านบนและด้านล่างอาจมีหินปูนเคลือบบนทัลลัสมีขนเรียงเป็นแถบโค้งขนานกับขอบเรียก hair line/ piliferous line มีหลายเส้นขนานกัน แม้ขนจะหลุดร่วงไปก็ยังคงเหลือรอยให้เห็น จุดเจริญอยู่ที่เซลล์ยอดซึ่งเป็นแถวยาวตลอดขอบ ทำให้ส่วนนี้เจริญเร็วกว่าเซลล์ตอนล่าง ดังนั้นขอบทัลลัสบางชนิดจึงมีรอยพับหรือฉีกขาดอวัยวะสืบพันธุ์เกิดเป็นกลุ่ม ๆ ระหว่างแถวขน บางชนิดมีเยื่อบาง ๆ (indusium) คลุมกลุ่มของอวัยวะสืบพันธุ์



A



B

ภาพที่ 51 *Padina*

[258]

ที่มา : A: <http://the.honoluluadvertiser.com>

Laminaria มีชื่อสามัญคือ “oar weed” ทัลลัสมีส่วนล่างเป็นรากยึดเกาะแข็งแรงมาก แตกแขนงได้ และประกอบด้วยหลายเซลล์เรียก haptera ถัดขึ้นมาเป็น stipe สั้น ๆ ติดกับ blade ซึ่งมีลักษณะเหมือนใบพาย อาจเป็นใบเดี่ยว ๆ หรือแยกเป็นแฉก ๆ หลายแฉก ขอบเรียบหรือหยักเป็นลอน ทัลลัสมีลักษณะยืนต้น ดังนั้นส่วนปลายของ blade มักฉีกขาดหรือเน่าเปื่อยหลุดไปจนถึง stipe *Laminaria* มีชื่อญี่ปุ่นว่า “kombu” ชาวญี่ปุ่นนิยมใช้ประกอบอาหารในรูปแบบต่าง ๆ และใช้สกัด algin สำหรับใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ



A



B

ภาพที่ 52 *Laminaria*

[298]

ที่มา : A: <http://www.dkimages.com>B: <http://www.unav.es>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

Macrocystis มีชื่อสามัญคือ “giant kelp” ทัลลัสมี stipe ยาว และมี blade เกิดบน stipe เป็นระยะ ๆ ไปจนถึงปลาย เนื่องจากทัลลัสลักษณะยืนต้น มีอายุ 3-5 ปี จึงสามารถสร้าง stipe เพิ่มขึ้นได้ ทำให้เกิดเป็นพุ่มใหญ่ blade สามารถแบ่งได้ไม่จำกัดจำนวน blade ลักษณะคล้าย ใบพาย ที่ขอบมีรอยหยักแหลม โคน blade มี pneumatocyst blade แต่ละอันอาจยาวถึง 40 เซนติเมตร ขึ้นเรียงบน stipe ซึ่งยาวหลายสิบเมตร โดยเรียงกันอยู่ด้านเดียวและชูขึ้นสู่ผิวน้ำ มี sieve tube อยู่ระหว่างเนื้อเยื่อของ stipe ทำหน้าที่ถ่ายทอดผลผลิตจากการสังเคราะห์ด้วยแสงจาก blade ส่งไปยังส่วนล่างของทัลลัส ส่วน holdfast สามารถแตกแขนงได้มากจนเป็นพุ่มพันและประสานกันแน่น สำหรับสาหร่ายสกุลนี้เจริญวันละประมาณ 2 ฟุต นิยมนำมาสกัด alginate แหล่งที่มี *Macrocystis* ขึ้นอยู่มากเรียก *Macrocystis bed* อยู่ทางด้านตะวันตกของทวีปอเมริกาเหนือ บริเวณทางใต้ของ California มีการเก็บเกี่ยวนำมาสกัด alginate



ภาพที่ 53 *Macrocystis*

ที่มา : A: <http://faculty.clintoncc.suny.edu> [219]

B: <http://pt-lobos.parks.state.ca.us> [248]

Ascophyllum แก่นหลักแบน และมีส่วนของ air bladder/ vesicle อยู่เดี่ยว ๆ blade แตกแขนงแบบ dichotomous



ภาพที่ 54 *Ascophyllum*

ที่มา : A: <http://www.naturephoto-cz.eu> [324]

B: <http://www.surialink.com> [370]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บทที่ 6 การจัดหาวัตถุดิบและลักษณะของสาหร่ายแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fucus มีชื่อสามัญคือ “rock weed” ทัลลัสแบน ปลายแยกเป็น 2 แฉก มีเส้นกลาง midrib พาดตลอดทัลลัส บางชนิดมีถุงลมเกิดเป็นคู่ขนาน 2 ข้างของเส้นกลางมี 1 หรือหลายคู่ ปลายแขนงมี gametangium ทำให้ปลายแขนงพองออกเรียกส่วนปลายแขนงระยะนี้ว่า receptacle สาหร่ายสกุลนี้มีสาร fucoidin ซึ่งเป็นพวก sulfated polysaccharide สามารถอุ้มน้ำได้ดี จึงทำให้ต้นไม่แห้งในขณะที่ย่ำน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดกรด alginic ออกมาในรูปเกลือ alginate หรือ algin สำหรับใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เป็นสาหร่ายที่พบในเขตอบอุ่น และเขตหนาว ขึ้นบนหินริมทะเลที่น้ำท่วมถึง ต้นมีขนาด 10-30 เซนติเมตร

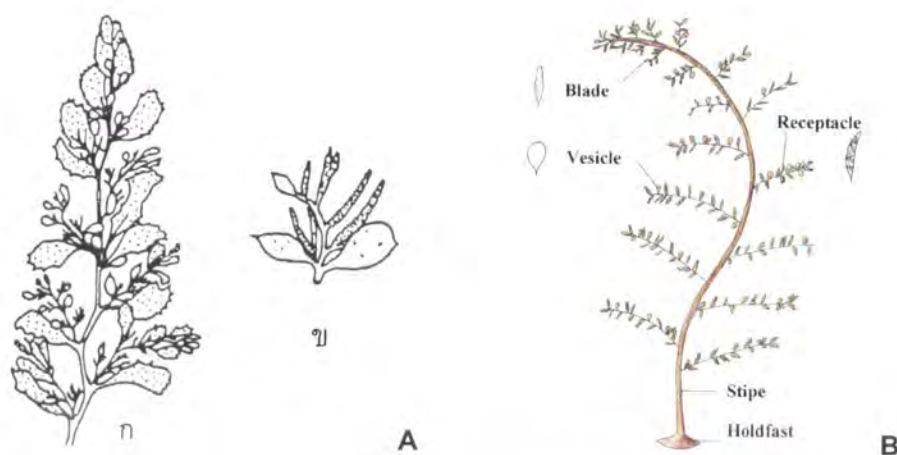


ภาพที่ 55 *Fucus*

ที่มา : A: ภาพจากภาพที่ 2527^[714]

B: <http://wikipedia.com>^[267]

Sargassum มีชื่อสามัญคือ “gulf weed, สาหร่ายใบ หรือสาหร่ายทุ่น” ทัลลัสมีลักษณะเหมือนพืชชั้นสูง มีส่วนคล้ายรากยึดเกาะ ทัลลัสตั้งตรง บางชนิดแตกแขนงได้มากจนเป็นพุ่มแกนของต้นมีลักษณะกลมหรือแบน blade มีลักษณะเหมือนใบไม้ ขอบใบมีจักแหลม และมีแกนกลางใบ โคนใบมีถุงลมเล็ก ๆ ระยะสืบพันธุ์สร้าง receptacle เป็นกระจุกที่ปลายแขนง สาหร่าย *Sargassum* ปกติยึดเกาะกับพื้น บางชนิดอาจขาดลอยเป็นชนิดลอยน้ำ (pelagic form) บริเวณ Sargasso sea คือบริเวณที่มี *Sargassum* ขึ้นอยู่หนาแน่นมากในลักษณะที่ลอยน้ำ อยู่ทางตอนใต้ของหมู่เกาะ Bermuda ใน Atlantic ocean ระหว่างทวีปยุโรปและอเมริกา ลักษณะเป็นวงรี รูปไข่ มีแกนยาวประมาณ 2,000 ไมล์ ซึ่งบริเวณ Sargasso sea เป็นบริเวณที่อาศัยของสัตว์น้ำต่าง ๆ มากมาย และยังเป็นที่ยาวไข่ของปลา *Anguilla* อีกด้วย *Sargassum* ลักษณะเป็นทัลลัสยืนต้น อายุ 2-3 ปี ทัลลัสส่วนบนอาจเน่าเปื่อยหลุดไปเหลือแต่ส่วนโคน สามารถงอกต้นใหม่ได้อีก



ภาพที่ 56 *Sargassum* (A) แสดงลักษณะทาลัส (ก) receptacle (ข)

ที่มา : A: กาญจนภาชนะ (2527)^[714]

B: <http://www.mbari.org>^[320]

Cystoseira ทาลัสมีลักษณะพุ่มคล้าย *Sargassum* ส่วนโคนแบนมีรอยคอดเป็น ตอน ๆ และมีถุงลมฝังอยู่เป็นระยะ ๆ ส่วนบนเป็นรูปสามเหลี่ยม มีรอยหยักตามขอบ การแตกแขนงเกิดตรงรอยคอดหรือตรงขอบของเหลี่ยม ระยะสืบพันธุ์สร้าง receptacle เป็นแท่งยาวรูปสามเหลี่ยมที่ปลายแขนง ขึ้นอยู่ในบริเวณน้ำท่วมตลอด



ภาพที่ 57 *Cystoseira*

ที่มา : A: <http://www.surialink.com>^[371]

B: <http://www.dipbot.unict.it>^[297]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าที่ 6 กรังด์มาวดีหมู่และลักษณะของสำหรับแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durvillaea มีทัลลัสที่แข็งแรง มีส่วนคล้ายรากยึดเกาะขนาดใหญ่ รูปกรวย ผิวเรียบ โครงสร้างของส่วน stipe และส่วน frond มีความแข็งแรง ยึดหยุ่นสูง อาจพบยาวได้ถึง 8 เมตร และอาจมีน้ำหนักได้หลายกิโลกรัมต่อทัลลัส พบตามพื้นหิน บริเวณที่มีคลื่นแรง มักอยู่บริเวณเขตน้ำขึ้น น้ำลง



ภาพที่ 58 *Durvillaea*

ที่มา : A: <http://www.surialink.com> [372]

B: <http://www.aad.gov> [271]

Ecklonia มักมี holdfast ที่มีขนาดเป็นก้อนใหญ่ และยึดยาวออก และกลวง มีแก๊สอยู่ภายใน ในส่วน stipe มีความยาวได้มากถึง 15 เมตร ปลาย stipe มีส่วน bladder ที่มีแก๊สอยู่ภายใน แต่มีลักษณะที่แบน ส่วนคล้ายใบที่เป็นแกนหลัก (primary frond) จะแข็ง และมีส่วนใบที่แตกแขนงออกไปจากใบที่เป็นแกนหลัก (secondary frond) โดยใบส่วนที่แตกแขนงออกมานี้อาจยาวได้ถึง 3 เมตร และเนื่องจากมีส่วน stipe ที่กลวง และมี bladder สกุนนี้จึงมักลอยอยู่ที่ผิวน้ำ พบเกาะตามพื้นหิน ในเขตน้ำลงต่ำสุด



ภาพที่ 59 *Ecklonia*

ที่มา : A: <http://www.surialink.com> [373]

B: <http://www.deepseaimages.com> [296]

Lessonia มีสีเขียวมะกอก หรือเขียวเข้มเกือบดำ ยาวได้ถึง 6 เมตร ส่วน holdfast มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ถึง 50 เซนติเมตร stipe ยาว 2-3 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ถึง 4 เซนติเมตร ส่วนของ stipe แตกแขนงแบบคู่ dichotomous ได้ 2-3 ครั้ง แล้วจึงแผ่แบน มี blade เรียวยาว และมีส่วนขอบของ blade เรียบตรง หรือมีลักษณะเหมือนเป็นฟingers เล็ก ๆ ที่ขอบ ส่วนของ holdfast สานพันกันไปมาจนได้ holdfast ที่มีขนาดใหญ่ ส่วนของ holdfast อาจมีช่องว่างและสามารถใช้เป็นที่ยึดอาศัยของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังต่าง ๆ ได้ พบเกาะตามหินบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง และเขตน้ำลงต่ำสุด



ภาพที่ 60 *Lessonia*

ที่มา : A: <http://www.surialink.com> ^[374]

B: <http://www.victoria.ac.nz> ^[391]

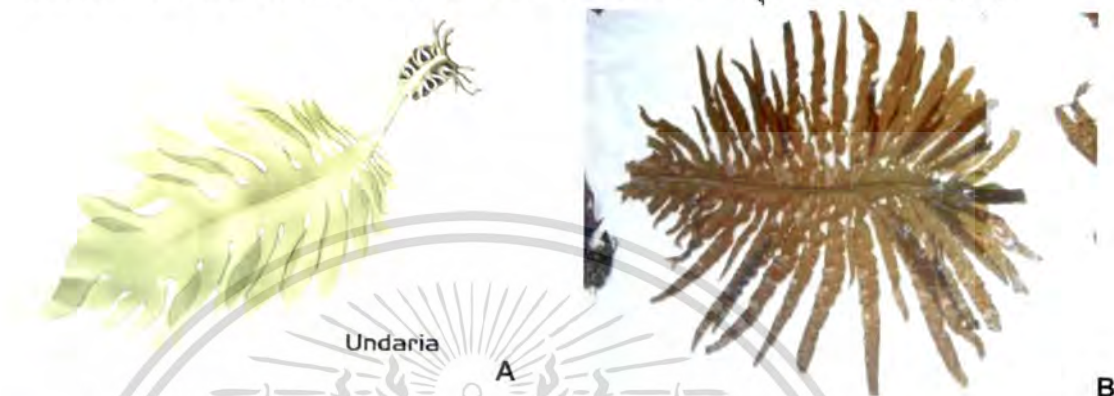
Kjellmaniella มีส่วน holdfast ยึดเกาะกับพื้น และมีส่วน stipe ต่อจาก holdfast ส่วนของ blade ยื่นยาวและไม่เรียบ ส่วน blade มีเส้นแกนกลาง (midrib) ส่วนของ blade มีทั้งยาว แคบ ขอบเรียบแบน บางชนิดอาจกว้าง เรียวแหลม หรือโค้งมนและมีขอบหยัก



ภาพที่ 61 *Kjellmaniella*

ที่มา : <http://www.ne.jp> ^[327]

Undaria ส่วน stipe ยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ส่วนของทลีสก์กว้างและยาว อาจยาวได้ถึง 2 เมตร ส่วนของ blade มีแกนกลาง และมีส่วนกลางแบน ค่อนข้างเรียบ ส่วนขอบจะแยกออกจำนวนมากทั้งสองข้างจากแกนกลางของ blade ลักษณะที่แยกออกจะสมมาตรกัน ทั้งสองด้านของ stipe ส่วนใบอาจยาวได้ถึง 1 เมตร มักขึ้นเป็นกลุ่มแน่นอยู่ตามก้อนหิน หรือพื้นที่แข็งแรง หรือตามแนวปะการัง พบตามเขตน้ำขึ้นน้ำลง น้ำลงต่ำสุด จนถึงลึก 15 เมตร



ภาพที่ 62 *Undaria*

ที่มา : A: <http://www.starfish.govt.nz> [366]

B: <http://www.sciencedaily.com> [354]

Bifurcaria ทลีสก์เป็นพุ่ม สีน้ำตาลอ่อน ส่วนของ blade ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ยาวประมาณ 10-30 เซนติเมตร มีการแตกแขนงแบบคู่ พบตามหาดหิน เขตน้ำขึ้นน้ำลง และน้ำลงต่ำสุด



ภาพที่ 63 *Bifurcaria*

ที่มา : A: <http://www.uniovi.es> [388]

B: <http://www.unige.ch> [387]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิวิชันบาซิลลารีโอไฟตา (Division Bacillariophyta)

ไดอะตอม (diatom)

1. ลักษณะทั่วไป

สาหร่ายในกลุ่มนี้มีรงควัตถุฟูโคแซนทินเหมือนสาหร่ายสีน้ำตาล แต่มีในปริมาณน้อยกว่า ไดอะตอมเป็นกลุ่มที่มีประโยชน์ทางเศรษฐกิจมาก เนื่องจากการตายทับถมกันของพวก ไดอะตอมเป็นเวลานาน จนกลายเป็นไดอะตอมมาเซียส เอิร์ท (diatomaceous earth) ซึ่งมีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น ยาขัดเครื่องเงิน เครื่องทองเหลือง ใช้ในการฟอกสี และเป็นฉนวน

สาหร่ายในกลุ่มไดอะตอมมักเป็นพวกที่อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว อาจพบเป็นกลุ่มเซลล์ หรือเป็นเส้นสาย ไดอะตอมสามารถพบได้ทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม และตามพื้นดินที่ชื้นแฉะ มักพบเป็นพวกที่ลอยลอยอยู่ในน้ำแบบแพลงก์ตอน หรือเกาะตามพืชในน้ำ ไดอะตอมมีคลอโรพลาสต์ สีน้ำตาลทอง สีเขียวปนเหลือง สีน้ำตาล

รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงพวก chlorophyll a, c, β , δ carotene (สีเหลือง) xanthophyll (สีน้ำตาล) xanthophyll: fucoxanthin, diatoxanthin, diadinoxanthin

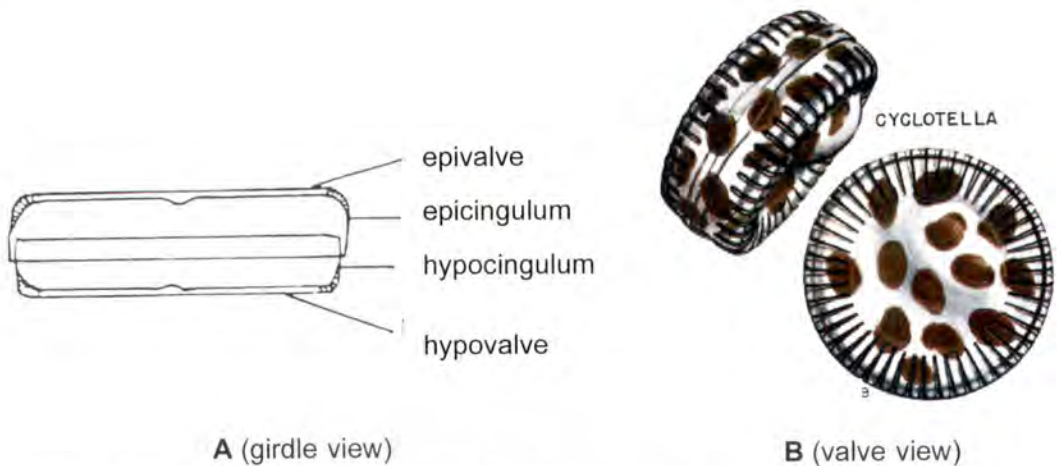
อาหารสะสมเป็นพวก แป้ง chrysolaminaran (liquid-1,3-glucan), ไขมัน (fat)

ผนังเซลล์ เป็น pectin มี silica ผนังท่อน้ำ บนมามีลวดลายต่างกันมากมาย

2. โครงสร้างเซลล์

เซลล์ของไดอะตอมประกอบด้วยเปลือกซึ่งมี silica เป็นองค์ประกอบเรียกส่วนของเซลล์ทั้งหมดว่า frustule ซึ่งใน 1 frustule ประกอบด้วยส่วน epitheca (ฝาเซลล์ด้านบน) กับ hypotheca (ฝาเซลล์ด้านล่าง) มองจากด้านข้างเรียก girdle view มองจากด้านบนเรียก valve view ลายบนฝา มีแบบเป็นเส้นหนา (costae) และเป็นเส้นบาง (striae) บนผิวของฝาแต่ละฟามีร่องเรียก raphe ถ้าเป็น true raphe จะเห็นว่าตรงจุดกึ่งกลางของร่องจะมีตุ่มหนา ถ้าเป็น pseudo raphe จะเห็นเป็นเส้นใสคล้ายร่อง ไม่มีตุ่ม ในกลุ่ม pennate diatom มีผนังเซลล์ชั้นเดียว ส่วนกลุ่ม centric diatom ผนังเซลล์มากกว่า 1 ชั้น ไม่มี raphe ส่วนกลุ่ม benthic diatom เซลล์มีก้าน มักเกาะตามพื้น (ภาพที่ 64, 65)

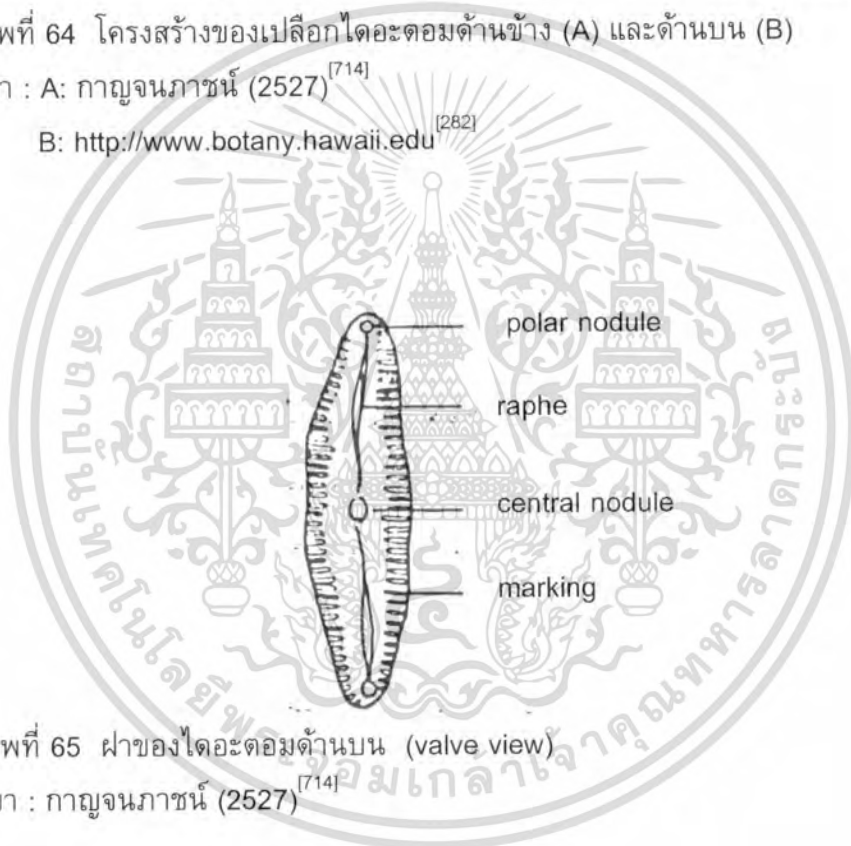
เมื่อไดอะตอมตายเปลือกจะทับถมกันเป็นจำนวนมาก เรียกว่าเป็น diatomaceous earth/ diatomite ซึ่งใช้ประโยชน์ในการกรองน้ำยา ทำฉนวนกันความร้อน และน้ำยาขัดเงา



ภาพที่ 64 โครงสร้างของเปลือกไดอะตอมด้านข้าง (A) และด้านบน (B)

ที่มา : A: กาญจนภาชนะ (2527)^[714]

B: <http://www.botany.hawaii.edu>^[282]



ภาพที่ 65 ฝาของไดอะตอมด้านบน (valve view)

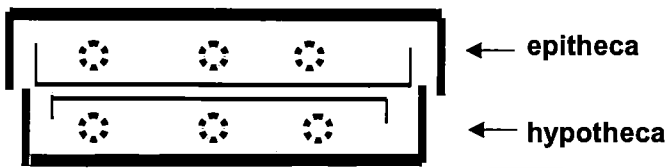
ที่มา : กาญจนภาชนะ (2527)^[714]

3. การสืบพันธุ์ของไดอะตอม

3.1. แบบไม่อาศัยเพศ โดยการแบ่งเซลล์ โดยเริ่มแบ่ง nucleus แบบ mitosis และแต่ละฟอสซิลใหม่ที่มีขนาดเล็กกว่าฟอสซิลเดิมขึ้นมาได้เป็นเซลล์ใหม่ 2 เซลล์ และทำการแบ่งเซลล์แบบนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงขนาดที่เล็กที่สุดของแต่ละชนิดซึ่งเรียกว่าเป็นขนาด critical size จากนั้นจึงทำการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศต่อไป ส่วนใหญ่ในวัฏจักรชีวิตของไดอะตอมจะมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (ภาพที่ 66)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเป็นต้นแบบลอกเลียน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. แบบอาศัยเพศ โดยการสร้าง auxospore หรือสร้างแกมีตเพศผู้กับเพศเมียและมีการรวมตัวกันแบบ oogamy, isogamy



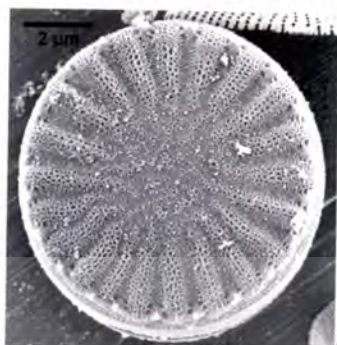
ภาพที่ 66 การแบ่งเซลล์ของไดอะตอม (การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ)
ที่มา : ดัดแปลงจาก Bold and Wynne (1978)^[50]

ตัวอย่างสาหร่ายที่พบในทวีปนี้ ได้แก่ *Melosira*, *Stephanopyxis*, *Paralia*, *Dactyliosolen*, *Corethron*, *Thalassiosira*, *Skeletonema*, *Cyclotella*, *Lauderia*, *Planktoniella*, *Coscinodiscus*, *Palmeria*, *Asterolampra*, *Asteromphalus*, *Aracnoidiscus*, *Odontella*, *Triceratium*, *Auliscus*, *Rhizosolenia*, *Guinardia*, *Ditylum*, *Chaetoceros*, *Bacteriastrum*, *Hemiaulus*, *Eucampia*, *Biddulphia*, *Isthmia*, *Bellerochea*, *Grammatophora*, *Tabellaria*, *Fragilaria*, *Thalassionema*, *Thalassiothrix*, *Asterionella*, *Cocconeis*, *Achnanthes*, *Navicula*, *Gomphonema*, *Amphora*, *Pleurosigma*, *Gyrosigma*, *Bacillaria*, *Nitzschia*, *Diatoma*, *Synedra*, *Eunotia*, *Diploneis*, *Frustulia*, *Pinnularia*, *Entomoneis*, *Amphora*, *Cymbella*, *Epithemia*, *Rhopalodia*, *Surirella*, *Campylodiscus*

4. ไดอะตอมที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างของสาหร่ายในทวีปนี้ที่พบว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักได้แก่สกุล *Cyclotella*, *Thalassiosira*, *Phaeodactylum*, *Haslea*, *Skeletonema* และ *Chaetoceros* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้

Cyclotella เซลล์อยู่เดี่ยว ๆ แต่อาจพบอยู่ต่อกันเป็นสายโซ่ เซลล์รูปกลมเมื่อมองจากด้านเกอเดิลจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งกึ่งกลางฝาจอาจเว้าลึกหรือผิวฝาจเป็นลูกคลื่น ลวดลายฝาจแบ่งออกเป็น 2 วง วงในเป็นเส้นบาง ๆ (striae) เรียงกันเป็นแนวรัศมี วงนอกเป็นซี่ (costae)



A



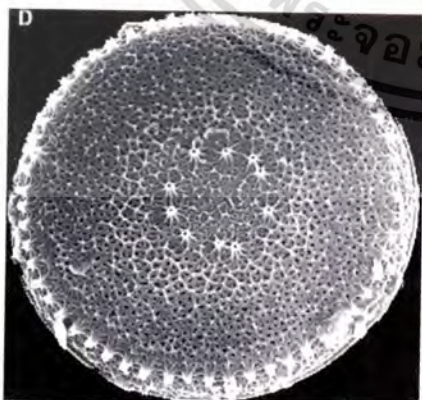
B

ภาพที่ 67 *Cyclotella*

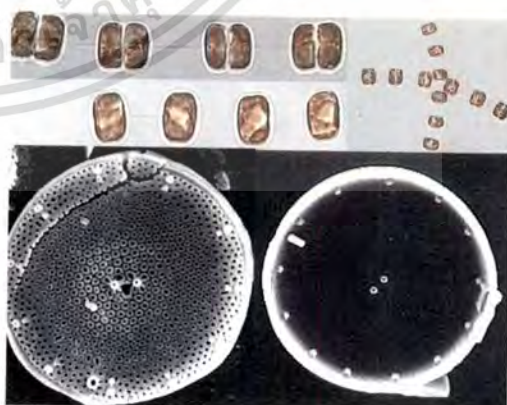
ที่มา : A: <http://silicasecchidisk.conncoll.edu> [252]

B: <http://aslo.org> [198]

Thalassiosira ลักษณะ เซลล์ต่อกันเป็นสายโซ่ด้วยสายใย ๆ ที่ประกอบด้วย chitin หรือฝังอยู่ในสารเมือกเป็นกลุ่มเซลล์ เซลล์รูปร่างกลม ลักษณะคล้ายจานแบน ๆ ลวดลายบนฝาจเป็นรูปเหลี่ยม เช่น สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม ฯลฯ หรืออาจเป็นจุดเล็ก ๆ เรียงกันแบบรัศมี ลวดลายบนฝาจเห็นได้ไม่ชัดเนื่องจากเซลล์มีขนาดเล็กมาก ขอบฝาจมีหนาม จำนวน 1 อัน หรือมากกว่า ถ้ามีมากกว่า 1 จะทำมุมกันซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิด นอกจากหนาม ยังมีวงของท่อขนาดเล็กอยู่ที่ขอบฝาจ ฝาจอาจแบนหรือเว้าบริเวณกึ่งกลางฝาจ คลอโรพลาสต์เป็นแผ่นขนาดเล็กและมีจำนวนมาก



A



B

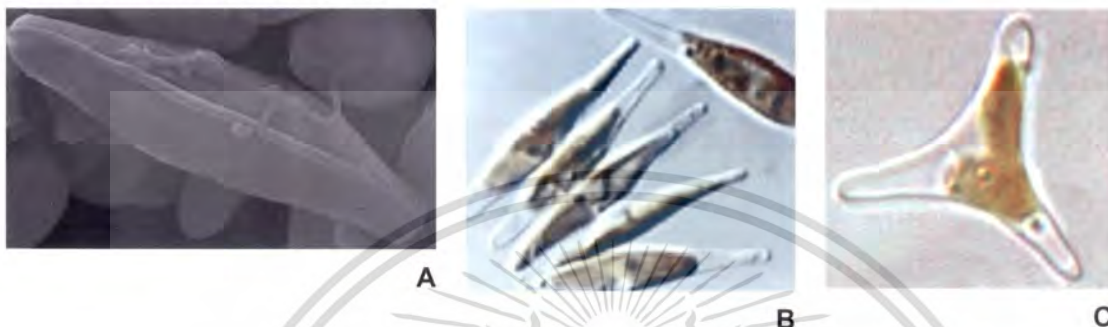
ภาพที่ 68 *Thalassiosira*

ที่มา : A: <http://www.woodrow.org> [393]

B: <http://www.smhi.se> [361]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดก็ตามที่การจัดทำหนังสือและลักษณะของเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phaeodactylum เซลล์อยู่เดี่ยว ๆ หรืออาจต่อกันเป็นสาย มีรูปร่างแตกต่างกัน 3 แบบ คือ รูปไข่ รูปสามเหลี่ยมและรูปกระสวย บนผนังเซลล์มีซิลิกาหน้อยมาก ขณะที่เซลล์มีรูปร่างแบบรูปไข่ เรียกว่า oval phase ซึ่งเซลล์จะมีฝานขนาดเล็ก เพียง 1 ฝานเท่านั้น และเป็นระยะเดียวที่เซลล์เคลื่อนที่ได้ แต่ในขณะที่เซลล์มีรูปร่างแบบรูปสามเหลี่ยม ที่เรียกว่า triradiate phase และรูปกระสวยที่เรียกว่า fusiform phase นั้น เซลล์จะไม่มีฝานเลย มีคลอโรพลาสต์ 2 แผ่น มี 1 ชนิดคือ *P. tricornutum*



ภาพที่ 69 *Phaeodactylum*

ที่มา : A: <http://www.ual.es>^[384]

B: <http://www.cibnor.mx>^[293]

C: <http://genome.jgi-psf.org>^[221]

Haslea ลักษณะเซลล์อยู่เดี่ยว ๆ (หรืออยู่ในท่อเมือก-ชนิดที่อยู่บนพื้นท้องน้ำ) ผนังเซลล์บางมาก เซลล์รูปกระสวย ปลายเซลล์แหลมทั้งด้านเกอเดิลและท้ายวาล์ว ลายบนฝานเป็นเส้นบาง ๆ (striae) ตัดกันและทำมุม 90 องศา จึงเกิดเป็นลายตาหมากรุก กลางราฟีมีรูขนาดเล็ก 2 รู มีคลอโรพลาสต์ 2 แผ่น เต็มรวมอยู่ในสกุล *Navicula* เป็นสกุลที่พบในทะเล



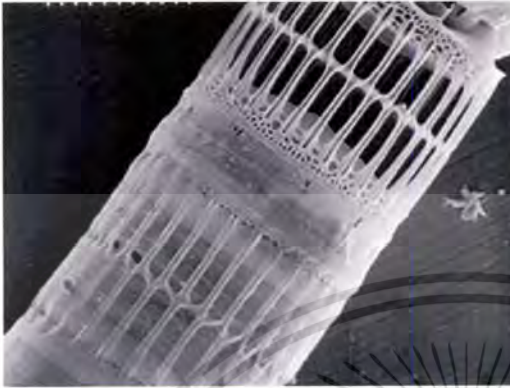
ภาพที่ 70 *Haslea*

ที่มา : A: <http://www.staff.uni-marburg.de>^[365]

B: <http://micro.sakura.ne.jp>^[237]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ใบที่ 6 การจัดหมวดหมู่และลักษณะของสาหร่ายแปดเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Skeletonema ลักษณะเป็นสายโซ่ประกอบด้วยเซลล์รูปกลม รูปเลนซ์หรือรูปทรงกระบอก ลวดลายบนฝาเห็นไม่ชัด มุมฝามีหนามบาง ๆ เรียงเป็นวง หนามของแต่ละเซลล์ประสานกัน บริเวณกึ่งกลางของระยะห่างของเซลล์ ทำให้เซลล์ต่อกันเป็นสายโซ่ คลอโรพลาสต์จำนวน 1-2 อัน มักมีการสร้างออกโซสปอร์



ภาพที่ 71 *Skeletonema*

ที่มา : A: <http://www.ndu.ac.jp> [326]

B: <http://www.dnr.state.md.us> [300]

Chaetoceros เป็นสายโซ่หรือโค้ง เซลล์รูปไข่จนถึงกลมเมื่อมองจากด้านบน เซลล์รูปสี่เหลี่ยมที่มีขอบตรง เว้า หรือนูน เมื่อมองจากด้านเกอเดิล (ด้านกว้าง) ผิวฝาอาจแบนเว้า หรือนูนก็ได้ ส่วนขอบฝาหรือ valve mantle เป็นรูปทรงกระบอกที่มุมฝาในแกนยาว (apical axis) มีซีติ (setae) ลักษณะเป็นหนามยาวมุมละ 1 เส้น ซีติที่มุมแต่ละฝาของเซลล์ที่อยู่ติดกันจะแตะกันที่จุดใกล้กับฐาน ทำให้หลายเซลล์ต่อกันเป็นสาย และเกิดมีช่องว่างระหว่างเซลล์ โคนของซีติขนานกับแกนเพอร์วัลวา หรือ perivalvar axis หรือทางออกในแนวตั้งฉากกับแกนของสาย ความยาวของสาย *Chaetoceros* ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ การสร้างซีติปลายสุดของสายหรือเทอร์มินัลซีติ (terminal) ซึ่งมักจะสั้นกว่าและหนากว่าซีติอื่น ซีติเส้นปลายสุดมักขนานกับแกนของสาย แต่มี *Chaetoceros* บางชนิดที่มีเซลล์เดี่ยว



A



B

ภาพที่ 72 *Chaetoceros*

ที่มา : A: <http://www.vattenkikaren.gu.se> [390]

B: <http://www.smhi.se> [362]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ การจัดทำหนังสือและลักษณะของภาพ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิวิชันไดโนไฟตา (ไพโรไฟตา) (Division Dinophyta/ Pyrrophyta)

ไดโนแฟลเจลเลต (dinoflagellate)

1. ลักษณะทั่วไป

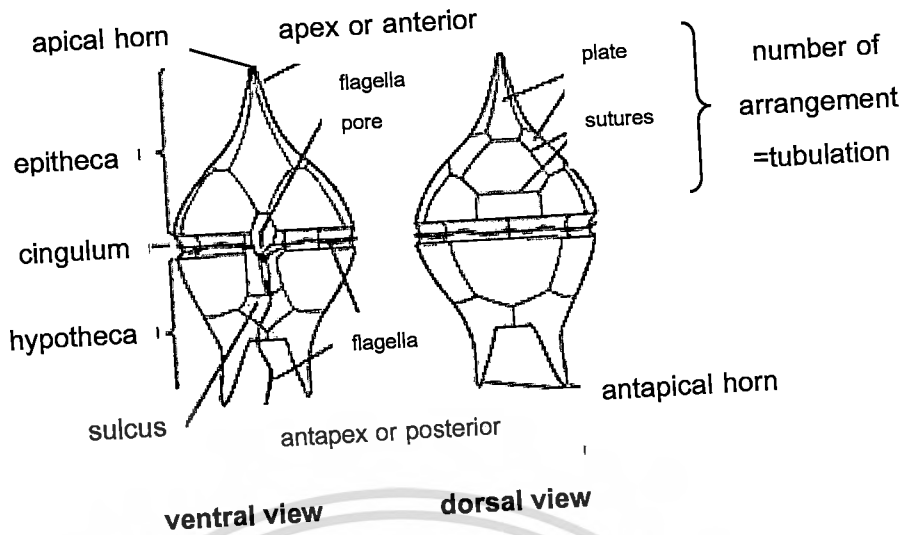
ไดโนแฟลเจลเลตเป็นสาหร่ายที่อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว มีขนาด 2 เส้น พบได้ในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม ดำรงชีวิตเป็นพวกแพลงก์ตอนหรือ parasite บางชนิดมีแสงเรืองในเวลา กลางคืน สาหร่ายในกลุ่มนี้มีสีเหลืองแกมน้ำตาล เหลืองแกมเขียว น้ำตาลอ่อน สาหร่ายกลุ่มนี้บางชนิดจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสี red tide คือสาหร่ายในกลุ่มนี้เจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากผิดปกติ ซึ่งชาวทะเลเรียกว่าซึบลาวาพ โดยจะทำให้แหล่งน้ำเป็นมลพิษ มีผลกระทบต่าง ๆ มาก โดยพิษที่สร้างจากไดโนแฟลเจลเลตเป็นพิษพวก PSP - paralytic shellfish poisoning/ mussel poisoning ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดจากพวก *Gonyaulax* โดยอาการของพิษพวกนี้คือทำให้เป็นอัมพาต หายใจไม่ออก และเสียชีวิตในที่สุด

รงควัตถุประกอบด้วย chlorophyll-a, c, β -carotene, xanthophyll

อาหารสะสมของไดโนแฟลเจลเลต เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว และแป้ง

เซลล์ของไดโนแฟลเจลเลตมี 2 แบบคือ unarmored/ naked dinoflagellate คือมีเยื่อ บาง ๆ หุ้ม protoplast กับแบบ armored/ thecate dinoflagellate คือมีผนังเซลล์ulosหนาคงรูปหุ้มอยู่ และเซลล์ของไดโนแฟลเจลเลตมีลักษณะที่เด่นคือเซลล์แบ่งเป็นสองส่วน คือ epitheca (ส่วนของฝาบน) กับ hypotheca (ส่วนของฝาล่าง) โดยมีร่อง cingulum แบ่งสองส่วนนี้ออกจากกัน และยังมีร่อง sulcus เป็นร่องตามยาวอยู่ในส่วนของฝาล่างทางด้านท้อง (ventral view) หากมองด้านหลัง (dorsal view) จะมองไม่เห็นร่องนี้ โดยในทั้งสองร่องนี้มีขนาดอยู่ร่องละ 1 เส้น เป็นขนาดแบบเรียบ ไม่มีขน ส่วนของเขายี่นแหลมขึ้นไปจากฝาด้านบน เรียก apical horn ส่วนของเขายี่นลงมาจากฝาด้านล่างเรียก antapical horn (ภาพที่ 73)

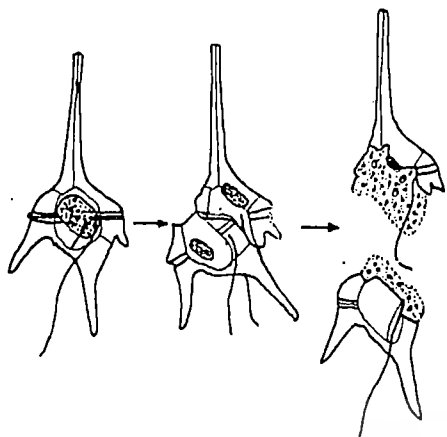
ผนังเซลล์ประกอบด้วย plate เรียงต่อกัน โดยมีรอยต่อระหว่างเพลทคือ sutures ตั้งแต่ 2-100 แผ่น ใช้จำนวนแผ่นและการเรียงตัวของแผ่นในการจำแนกชนิด



ภาพที่ 73 ลักษณะเซลล์ของไดโนแฟลเจลเลต
ที่มา : <http://bp1.blogger.com> [2011]

2. การสืบพันธุ์

2.1. แบบไม่อาศัยเพศ โดยการแบ่งเซลล์และสร้าง zoospore การแบ่งเซลล์อาจแบ่งในแนวตั้ง longitudinal หรือแบ่งในแนวขวาง transverse หรือแบ่งแนวเฉียง oblique เริ่มโดยเซลล์ปกติแบ่งนิวเคลียสเป็นสองส่วน สร้างหนวดใหม่ขึ้น 2 เส้น แล้วแยกจากกันเป็น 2 เซลล์ แต่ละเซลล์ได้ส่วนของเซลล์เดิมไปซีกเดียว และสร้างส่วนที่เหลือขึ้นมาใหม่ พวกที่มีผนังเซลล์หนาจะแบ่งเซลล์โดยให้ protoplasm ไหลออกมานอกผนังเซลล์ก่อน แล้วจึงแบ่งเป็น 2 daughter protoplast และสร้างผนังเซลล์ขึ้นใหม่ได้เป็น 2 daughter cell บางชนิดแบ่ง protoplast ในผนังเซลล์ได้ 2 daughter protoplast และปล่อยออกมาภายนอกเซลล์แล้วสร้างผนังขึ้นใหม่ (ภาพที่ 74)



ภาพที่ 74 การแบ่งเซลล์ของไดโนแฟลเจลเลต
ที่มา : กาญจนภาชนะ (2527)^[714]

2.2. แบบอาศัยเพศ โดยเซลล์สองเซลล์มาอยู่ใกล้กันสร้าง conjugation tube ให้ protoplast ไหลมารวมกันได้ zygote หรือโดยแต่ละเซลล์สร้างแกมีต 4 ตัว แล้วปล่อยออกมาผสมกันแบบ heterothallic การรวมของ gamete อาจเป็นแบบ isogamy, anisogamy แล้วจึงได้ zygote ที่มีผนังหนา

ไดโนแฟลเจลเลตมีความสามารถในการสร้าง cyst ผนังหนาหุ้ม protoplasm โดย cyst มีรูปร่างกลม ผิวขรุขระ มักสร้างในสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม และ cyst นี้จะคงอยู่ได้เป็นเวลานาน และจะงอกเมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม

ตัวอย่างสาหร่ายสกุลที่พบในดิวิชันนี้ได้แก่ สกุล *Prorocentrum*, *Ornithocercus*, *Amphidinium*, *Katodinium*, *Gymnodinium*, *Gyrodinium*, *Noctiluca*, *Peridinium*, *Protoperidinium*, *Pyrophacus*, *Ceratium*, *Nannochloropsis*

3. สาหร่ายในดิวิชันนี้ที่ใช้ดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้ที่พบว่ามีการนำมาใช้บำบัดโลหะหนักได้แก่สมาชิกในคลาส Dinophyceae คือสกุล *Heterocapsa* และสมาชิกในคลาส Eustigmatophyceae คือสกุล *Nannochloropsis* โดยมีลักษณะของแต่ละสกุล ดังนี้

Heterocapsa เซลล์มีผนังหุ้ม (armored form) ขนาดเล็ก (< 20 ไมครอน) ผนังเซลล์บาง เพลทบนเซลล์มีลักษณะคล้ายเกล็ดหุ้มเซลล์ เอพิทีการูปกลมจนถึงรูปกรวย ไฮโปทีการูปกลม จนถึงปลายแหลม ซิงกูลัมเป็นแบบ displaced เล็กน้อยและเป็นแบบ descending มีคลอโรพลาสต์ เป็นสกุลที่ก่อให้เกิดการบลูม

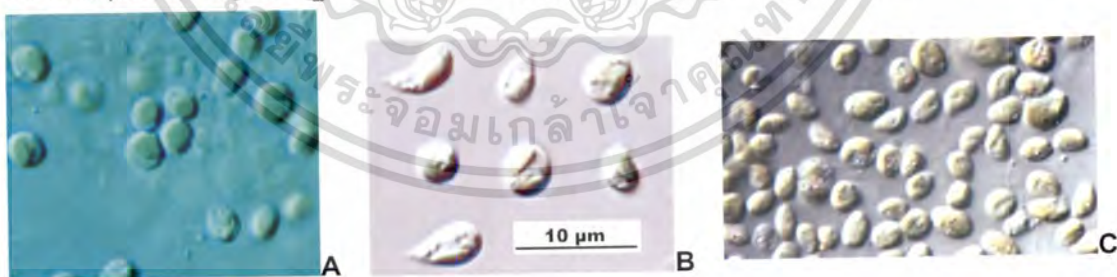


ภาพที่ 75 *Heterocapsa*

ที่มา : A: <http://www.smhi.se> [363]

B: <http://magnolia.s.kanazawa-u.ac.jp> [233]

Nannochloropsis สาหร่ายสกุลนี้มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว เซลล์มีรูปร่างทรงกลม เซลล์ขนาดเล็กสีเขียวอ่อน เซลล์ปกติเคลื่อนที่ไม่ได้ พบในน้ำเค็ม ระหว่างการเจริญเติบโตมีการปล่อยเมือกหนาหลายชั้น เซลล์ปกติไม่มีหนวด คลอโรพลาสต์มีสีเขียวแกมเหลือง ลักษณะเด่นคือ zoospore มี stigma ที่ฐานของโคนหนวด สาหร่ายสกุลนี้นิยมใช้เป็นอาหารสัตว์น้ำ



ภาพที่ 76 *Nannochloropsis*

ที่มา : A: <http://microscope.mbl.edu> [238]

B: <http://www.ndsu.nodak.edu> [325]

C: <http://www.sb-roscoff.fr> [349]

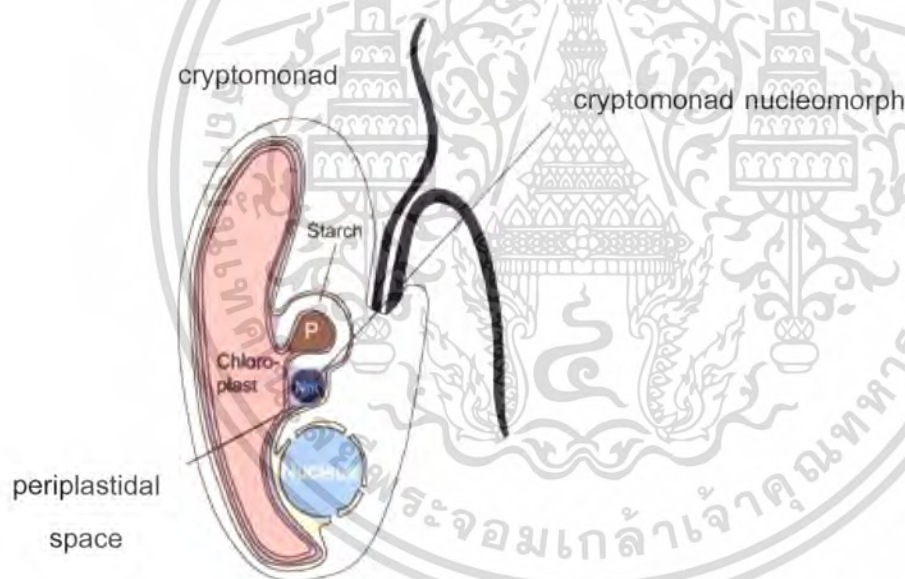
ดิวิชันคริปโตไฟตา Division Cryptophyta

คริปโตโมแนด (cryptomonad)

1. ลักษณะทั่วไป

เซลล์รี ไม่สมมาตร เป็นเซลล์เดี่ยว ๆ มีขนาด 2 เส้น เซลล์แบนจากบนลงล่าง ไม่มีผนัง เซลล์มีเยื่อ periplast มีขนาด 2 เส้น อาจมีหรือไม่มี คลอโรพลาสต์ รูปร่างของสาหร่ายอาจคงที่หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ขนาดมี 2 เส้นยาวเท่ากันหรือไม่เท่ากัน เป็นหน่วยแบบมีรยางค์ทั้งสองข้างของแกนหมวดกับแบบที่มีรยางค์เพียงข้างเดียวของแกนหมวด สีของเซลล์มีสีเขียว เขียวมะกอก ฟ้ำ น้ำตาล แดง พบทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม บางชนิดไม่มีสี (ภาพที่ 77)

สาหร่ายกลุ่มนี้พบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม ปกติจะพบอยู่เป็นเซลล์เดี่ยวแต่อาจสร้างระยะ palmelloid มีเมือกหุ้ม อยู่เป็นอิสระ บางชนิดอาจอาศัยในเนื้อเยื่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง สาหร่ายในกลุ่มนี้มีส่วนทำให้เกิด red tide



ภาพที่ 77 ลักษณะเซลล์ของคริปโตโมแนด

ที่มา : <http://genomebiology.com>^[222]

รงควัตถุมี chlorophyll-a, c, α , β , ϵ -carotene, xanthophyll : diatoxanthin, phycobilin : phycocyanin, phycoerythrin

ผนังเซลล์ มีเยื่อหุ้มเซลล์ เรียก periplast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ 6 การจัดทำคู่มือและลักษณะของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารสะสม เป็นแป้ง true starch แป้งอยู่ติดกับไฟรีนอยด์ มี eyespot พบอยู่กลางเซลล์ในคลอโรพลาสต์ หรืออยู่ใกล้กับนิวเคลียส

2. ลักษณะพิเศษ

เซลล์แบนข้าง หรือแบนลงล่าง ด้านบนสุดของเซลล์จะตัดตรงหรือเฉียง หรือเว้า มี ejectosome ใน gullet หน้าที่จับเหยื่อ ป้องกันตัว ทำร้ายศัตรู ลักษณะเป็นแถบม้วนขดเป็นวง เมื่อเซลล์ถูกรบกวนจะพุ่ง ejectosome ออกมา ทำให้เซลล์เคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม

การสืบพันธุ์ สืบพันธุ์โดยการแบ่งเซลล์ตามยาว ทั้งในระยะที่ว่ายน้ำเป็นอิสระหรือในระยะหยุดนิ่ง

ตัวอย่างของสาหร่ายในดิวิชันนี้แก่สกุล *Cryptomonas*, *Chroomonas*, *Nephroselmis* ยังไม่พบมีรายงานว่ามีการใช้สาหร่ายในดิวิชันนี้ในการกำจัดโลหะหนัก



บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

HEAVY METAL BIOSORPTION MECHANISM

การดูดซับทางชีวภาพ

การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการนำโลหะที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่และสามารถใช้กำจัดโลหะที่เป็นพิษได้ โดยเฉพาะโลหะหนักที่มาจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับทางชีวภาพหรือการใช้เซลล์สิ่งมีชีวิต (organism) นั้น มีทั้งที่เกิดจากการทำงานของเซลล์ที่ไม่มีชีวิตและเซลล์ที่ยังมีชีวิต โดยมีคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เซลล์สิ่งมีชีวิตคือ

biosorption หมายถึง การใช้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว (dead cell) หรือเซลล์ที่กลไกต่าง ๆ ภายในเซลล์ไม่มีการทำงานแล้ว มาทำการดูดซับแยก หรือรวบรวมโลหะหนักจากสารละลายมาไว้ที่เซลล์ (adsorb) เพื่อกำจัดออกจากสารละลายที่มีโลหะหนักเหล่านั้นละลายอยู่ โดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นหลัก โดยขั้นตอนนี้ไม่ต้องใช้พลังงานของเซลล์ (passive) ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นกับลักษณะของผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่ในการจับโลหะหนัก โดยสิ่งมีชีวิตที่มีคุณสมบัตินี้เป็นอย่างที่ดีแก่สาหร่าย แบคทีเรีย และฟังไจ

bioaccumulation หมายถึง การที่สิ่งมีชีวิตดูดซับนำโลหะเข้าไปสะสมภายในเซลล์ (absorb) ในขณะที่เซลล์ยังมีชีวิตอยู่ (living cell) และปริมาณโลหะที่ถูกนำเข้าไปภายในเซลล์มีอัตราที่เร็วกว่าปริมาณที่ถูกขับออกจากเซลล์ ซึ่งขั้นตอนนี้จะต้องขึ้นกับการทำงานและการใช้พลังงานของเซลล์ (active) ซึ่งมีความหมายต่างจาก biosorption เพราะเป็นการใช้เซลล์ที่ยังมีชีวิต^[199, 213, 259]

bioremoval หมายถึง การใช้วัสดุที่มีกำเนิดมาจากสิ่งมีชีวิตมาใช้ในการดูดซับ แยกหรือกำจัดโลหะหนักต่าง ๆ ออกจากสารละลายที่โลหะหนักเหล่านั้นละลายอยู่ หรือออกจากน้ำเสียที่มีโลหะหนักเหล่านั้นปนเปื้อนอยู่

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคำจำกัดความแล้ว คำว่า bioremoval นั้น ใช้ได้ในความหมายที่กว้างมากกว่า เพราะหมายถึงการใช้เซลล์สิ่งมีชีวิต ทั้งในรูปแบบที่ยังมีชีวิตอยู่ หรือในรูปแบบที่เป็นเซลล์ตาย มาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

แต่พบว่าในหนังสือหรือตำราหลาย ๆ เล่มจะใช้คำว่า biosorption ในความหมายรวมที่กล่าวถึงทั้งการใช้เซลล์ที่ยังมีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้วในการกำจัดโลหะหนัก เพราะเนื่องจากว่าการกำจัดโลหะหนักโดยสิ่งมีชีวิตจะเกิดทั้งขั้นตอนการไม่ใช้พลังงานและการใช้พลังงาน แต่ส่วนใหญ่ขั้นตอนการไม่ใช้พลังงาน (biosorption) จะเกิดการดูดซับได้มากกว่าและรวดเร็วกว่าจึงนิยมใช้คำว่า biosorption เป็นตัวแทนของการกำจัดโลหะหนักทั้งหมด^[657]

ในระบบการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยทั่วไปประกอบด้วยสองสิ่งคือ หนึ่ง “ตัวดูดซับ” (adsorbent) คือวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งหากวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับ คือวัสดุที่มาจากสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ จะเรียกว่า “ตัวดูดซับชีวภาพ” (biosorbent) และสองคือ “ตัวถูกดูดซับ” (adsorbate) คือสิ่งต่าง ๆ ที่ถูกดูดซับเอาไว้โดยตัวดูดซับนั่นเอง หรือหมายถึงสิ่งที่เราต้องการกำจัดออกจากสารละลายหรือระบบบำบัด เช่นโลหะหนัก สารสีต่าง ๆ โดยใช้ตัวดูดซับเป็นตัวกำจัดนั่นเอง

การแบ่งกลุ่มการดูดซับทางชีวภาพ

การดูดซับทางชีวภาพโดยเซลล์สิ่งมีชีวิตนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างกันไปในแต่ละชนิด จึงทำให้มีความหลากหลายในการดูดซับ และการศึกษาในปัจจุบันยังไม่สามารถทำความเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ถึงกลไกการดูดซับในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดได้มากนัก การแบ่งกลุ่มการดูดซับทางชีวภาพอาจแบ่งกลุ่มโดยใช้เกณฑ์ต่าง ๆ ได้คือใช้เมแทบอลิซึมของเซลล์เป็นเกณฑ์ และใช้ตำแหน่งที่พบโลหะหนักในตัวดูดซับหลังจากการดูดซับออกจากสารละลายเป็นเกณฑ์

1. ใช้เมแทบอลิซึมของเซลล์เป็นเกณฑ์

ซึ่งเกณฑ์นี้จะแบ่งการดูดซับทางชีวภาพ ได้เป็น 2 แบบคือ

1.1. การดูดซับทางชีวภาพที่ไม่ขึ้นกับเมแทบอลิซึม (non-metabolism dependent) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนแรกหลังตัวดูดซับสัมผัสกับโลหะหนัก โดยเกิดการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ (adsorption/ passive) โดยไม่ใช้พลังงานของเซลล์เข้ามาเกี่ยวข้อง ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากสิ่งมีชีวิตสัมผัสกับโลหะหนัก โลหะหนักจะจับกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ การดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์นี้สามารถเกิดได้ทั้งบนตัวดูดซับที่ยังคงมีชีวิตอยู่และที่ไม่มีชีวิต โดยเป็นกลไกที่ไม่ขึ้นกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์

1.2. การดูดซับทางชีวภาพที่ขึ้นกับเมแทบอลิซึม (metabolism dependent) มักเกิดเป็นขั้นตอนที่สองหลังตัวดูดซับสัมผัสกับโลหะหนัก โดยเกิดการดูดซับโลหะหนักเข้าภายในเซลล์ (absorption/ active/ uptake) ขบวนการนำโลหะเข้าสู่เซลล์ตัวดูดซับนี้ต้องใช้พลังงานขึ้นกับเมแทบอลิซึมของเซลล์ ดังนั้นจะเกิดในตัวดูดซับที่มีชีวิตเท่านั้น [82, 143, 401, 504]

2. ใช้ตำแหน่งที่พบโลหะหนักในตัวดูดซับหลังจากการดูดซับออกจากสารละลายเป็นเกณฑ์

จะแบ่งการดูดซับทางชีวภาพได้เป็น 3 แบบคือ

2.1. การดูดซับทางชีวภาพที่มีการสะสมโลหะหนักไว้ภายนอกเซลล์ตัวดูดซับ หรือการตกตะกอนโลหะหนักไว้ในสารละลาย (extracellular accumulation/ precipitation) ขั้นตอนนี้มีทั้งแบบที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับการใช้พลังงานของเซลล์

2.2. การดูดซับทางชีวภาพที่มีการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ตัวดูดซับ หรือการตกตะกอนโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ (cell surface sorption/ precipitation) ขั้นตอนนี้มีทั้งแบบที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับการใช้พลังงานของเซลล์

2.3. การดูดซับทางชีวภาพที่มีการสะสมโลหะหนักไว้ในเซลล์ตัวดูดซับ (intracellular accumulation) ซึ่งเกิดการแพร่ผ่านของโลหะหนักเข้าเซลล์ตัวดูดซับและไปสะสมในเซลล์ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับการใช้พลังงานของเซลล์ ซึ่งหมายความว่า การดูดซับประเภทนี้จะเกิดในเซลล์ที่ยังมีชีวิตเท่านั้น

กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

จากการแบ่งกลุ่มการดูดซับทางชีวภาพทั้งการใช้เมแทบอลิซึมของเซลล์เป็นเกณฑ์ และการใช้ตำแหน่งที่พบโลหะหนักในตัวดูดซับหลังจากการดูดซับเป็นเกณฑ์ นั้นมีกลไกการทำงานในการดูดซับโลหะหนักที่คล้าย ๆ กัน คือ การดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ การตกตะกอน และการนำเข้าสู่เซลล์

สำหรับการดูดซับโลหะหนักที่ไม่ขึ้นกับการใช้พลังงานของเซลล์ตัวดูดซับนั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นโดยขบวนการอันตรกิริยาทางกายภาพและเคมี (physico-chemical interaction) ระหว่างโลหะหนักและหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏอยู่บนผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ซึ่งกลไกการดูดซับแบบนี้เป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการดูดซับทางเคมี (chemical sorption) ซึ่งทั้งหมดไม่ขึ้นกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ โดยผนังเซลล์ของตัวดูดซับที่เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) โปรตีนและไขมัน ซึ่งล้วนมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับ (binding site) ที่หลากหลายเช่นคาร์บอกซิล (carboxyl), ซัลเฟต (sulphate), ฟอสเฟต (phosphate), และอะมิโน (amino) ซึ่งการดูดซับทางชีวภาพแบบไม่ขึ้นกับการใช้พลังงานของเซลล์นี้จะเกิดได้อย่างรวดเร็วและสามารถผันกลับได้ (reversible) ^[435] ดังนั้นกลไกการกำจัดโลหะหนักทางชีวภาพจึงประกอบด้วย การดูดซับทางกายภาพ การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับทางเคมี การตกตะกอน และการนำเข้าเซลล์

1. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) คือการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ การดูดซับโลหะหนักโดยสิ่งมีชีวิตด้วยวิธีการทางกายภาพนั้นขึ้นอยู่กับแรง van der Waals' forces เช่นการดูดซับยูเรเนียม แคลเดเมียม สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ โดยตัวดูดซับชีวภาพที่ตายแล้วเช่น สาหร่าย ฟังก์ไจ ยีสต์ จะเกิดโดยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic) ระหว่างไอออนของโลหะในสารละลายกับผนังเซลล์ของเซลล์สิ่งมีชีวิต ^[435]

2. การแลกเปลี่ยนประจุ

เป็นการแลกเปลี่ยนประจุของไอออน (ion exchange) ของโลหะหนักในสารละลายกับไอออนของพอลิแซ็กคาไรด์หรือหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ โดยผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น อัลจิเนต (alginate) ของสาหร่ายทะเล โดยในอัลจิเนตนั้นประกอบด้วยเกลือ K^+ , Na^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งไอออนเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักเช่น Co^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} และ Zn^{2+} ได้ จึงทำให้เกิดการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์หรือนำเข้าเซลล์ได้ ^[435] โดยเมื่อมีการแลกเปลี่ยนประจุของไอออนนั้น ประจุที่จับจะมีค่าประจุเท่ากับประจุที่ปล่อย เช่นประจุที่จับเป็น $2+$ ประจุที่ปล่อยก็จะมีค่าเท่ากับ $2+$ เช่นกัน

สำหรับแรงผลักดันของการแลกเปลี่ยนประจุ จะมีค่าเท่ากับแรงจับของตัวดูดซับไปจับกับตัวถูกดูดซับหรือโลหะหนักนั่นเอง โดยโลหะหนักจะจับได้ทั้งในรูปแบบไฟฟ้าสถิตคือใช้ไอออนจับหรือการเกิดสารเชิงซ้อน ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นน้ำและโลหะหนักส่วนใหญ่จะละลายน้ำมีแรงจับตัวกับน้ำต่ำ ดังนั้นจึงถูกตัวดูดซับ ดูดซับเอาไว้ได้ง่าย

สำหรับการ desorption ซึ่งเป็นการทำให้สารที่ถูกดูดซับออกไปจากตัวดูดซับ อาจหมายถึงการเกิดการแลกเปลี่ยนประจุได้เช่นกัน ซึ่งในกรณีนี้โดยส่วนใหญ่เกิดจากการใช้กรดในการ desorption เช่นกรด HCl, H_2SO_4 หรือการใช้เกลือเช่น CaCl ในกรณีการเกิด desorption การทำงานคือประจุบวก (เช่น H^+ , Ca^{2+}) จะไปแย่งกับโลหะหนักที่ถูกจับอยู่ซึ่งมีลักษณะเป็นประจุบวกเช่นเดียวกัน (เช่น Pb^{2+} , Cd^{2+}) และเข้าไปแทนที่โลหะหนักเหล่านั้น

การแทนที่จะเกิดได้ต่อเมื่อสารที่ใช้ในการ desorption มีความเข้มข้นมากหรือมีพลังงานมากพอที่จะไปแย่งโลหะหนักจกจับกับตัวดูดซับได้

3. การตกตะกอน

การตกตะกอนโลหะหนัก (precipitation) มักเกิดขึ้นได้ทั้งการตกตะกอนในสารละลาย และการตกตะกอนบนผนังเซลล์ตัวดูดซับ^[119] โดยการทำให้โลหะหนักตกตะกอนนี้ยังอาจขึ้นกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิตหรือไม่ขึ้นก็ได้

ในกรณีที่ขึ้นกับการทำงานของเซลล์สิ่งมีชีวิต การกำจัดโลหะจากสารละลายมักเกี่ยวข้องกับกลไกหรือระบบการป้องกันตัวของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่งกลไกนี้จะตอบสนองโดยการสร้างสารมาจับกับโลหะหนักที่เป็นพิษให้อยู่ในรูปสารประกอบ ซึ่งช่วยให้เกิดขบวนการตกตะกอน เช่นในกรณีที่โลหะหนักที่เป็นพิษอยู่ในสารละลายหรือในแหล่งน้ำที่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กนั้นอาศัยอยู่ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กนั้นจะสร้างสารประกอบ ที่จะทำหน้าที่ช่วยในขบวนการตกตะกอนโลหะหนัก ส่วนใหญ่จะมีการสร้างทั้ง สารที่เป็นประจุบวกและประจุลบ เช่น sulfate (SO_4^{2-}), sulfide (S^{2-}), oxalate ($\text{COO})_2^{2-}$ ซึ่งสารประกอบนี้อาจถูกปล่อยออกมานอกเซลล์และเมื่อสารประกอบนี้จะละลายอยู่ในน้ำก็จะจับกับโลหะหนัก และจะจับตัวเป็นก้อนที่ไม่ละลายน้ำในรูปเกลือหรือเกิดสารเชิงซ้อน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในแหล่งน้ำ หรืออาจปล่อยสารประกอบออกมาไว้ที่ผิวเซลล์ภายนอกและทำการตกตะกอนโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ภายนอก

ส่วนการตกตะกอนของโลหะหนักที่ไม่ขึ้นกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์นั้น เกิดในกรณีที่การตกตะกอนนั้นเป็นผลต่อเนื่องมาจากการเกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโลหะหนักและผนังเซลล์ของตัวดูดซับ การตกตะกอนอาจเกิดจากการที่โลหะเข้าไปจับกับตำแหน่งยึดจับที่ตัวดูดซับก่อน และหลังจากนั้นจึงเกิดการตกตะกอนขึ้นมา การตกตะกอนไม่ได้ถูกจำกัดโดยตำแหน่งยึดจับเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดเป็นชั้นซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นก็ได้ นอกจากนี้ การที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของสารละลายสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักได้เช่นกัน โดยส่วนใหญ่พีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักได้ แต่ระดับพีเอชที่ทำให้โลหะหนักตกตะกอนจะมีค่าแตกต่างกันไปในโลหะหนักแต่ละชนิด

4. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

การกำจัดโลหะจากสารละลายอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) บนผนังเซลล์ตัวดูดซับหลังจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะและหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์ตัวดูดซับ เช่นพบว่าการดูดซับคอปเปอร์โดยสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กชนิด *Chlorella vulgaris* เกิดโดยขบวนการดูดซับไว้ที่ผนังเซลล์และการรวมตัวระหว่างโลหะหนักกับหมู่อะมิโนหรือหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของพอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่บนผนังเซลล์สิ่งมีชีวิต^[19] ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใบ้การปฏิวัติทั้งสิ้น ลึกทั้งน้ำใจให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

สิ่งมีชีวิตบางชนิดเช่น *Pseudomonas syringae* จะสามารถกำจัดแคลเซียม แมกนีเซียม แคลเมียม สังกะสี คอปเปอร์ และปรอทได้โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เท่านั้น

สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กบางชนิดอาจสามารถสร้างกรดอินทรีย์ (organic acids) เช่นกรดซิตริก (citric), ออกซาลิก (oxalic), กลูโอนิก (gluonic), ฟุมาริก (fumaric), แลคติก (lactic) และ มอลิก (malic) ซึ่งสามารถจับตัวกับโลหะที่เป็นพิษ ทำให้เกิดการสร้างโมเลกุลสารประกอบอินทรีย์ของโลหะ (metallo-organic) ซึ่งกรดอินทรีย์เหล่านี้ยังมีความสามารถช่วยในการละลายของสารประกอบโลหะ (metal compounds) จึงทำให้ช่วยล้างโลหะออกจากผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเองได้ ดังนั้นโลหะหนักจึงอาจถูกดูดซับหรือเกิดสารเชิงซ้อนกับหมู่คาร์บอกซิล ที่พบในพอลิแซ็กคาไรด์ของสิ่งมีชีวิตและพอลิเมอร์ประเภทอื่น ๆ ได้

5. การนำโลหะหนักเข้าภายในเซลล์

การดูดซับโลหะหนักเข้าเซลล์ตัวดูดซับนั้น (uptake/ transport across cell membrane) จะต้องเกี่ยวข้องกับการขนส่งโลหะหนักผ่านผนังเซลล์ ซึ่งโลหะหนักอาจสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ของตัวดูดซับที่มีชีวิตได้ ด้วยวิธีการเดียวกับกลไกในการนำไอออนที่สำคัญสำหรับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิตเข้าสู่เซลล์ เช่นการนำโพแทสเซียม แมกนีเซียมและโซเดียม เข้าสู่เซลล์ ระบบการนำแร่ธาตุหรือโลหะที่เป็นประโยชน์เข้าสู่เซลล์สิ่งมีชีวิตอาจถูกรบกวนหรือถูกแทรกแซงโดยการที่ในแหล่งน้ำมีไอออนของโลหะหนักที่มีประจุหรือรัศมีไอออน (ionic radius) เหมือนกับโลหะที่เป็นประโยชน์ปรากฏอยู่ ซึ่งสิ่งมีชีวิตไม่ได้ตั้งใจที่จะนำโลหะหนักเหล่านั้นเข้าเซลล์แต่เนื่องจากโลหะหนักไปแทนที่แร่ธาตุที่สิ่งมีชีวิตต้องการนำเข้าเซลล์ โลหะหนักจึงถูกนำเข้าเซลล์ไปแทนโลหะที่เป็นประโยชน์

ซึ่งกลไกการดูดซับทางชีวภาพทั้งหมดนี้ ทั้งการดูดซับทางกายภาพ การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอน เกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการนำเข้าภายในเซลล์ กลไกเหล่านี้อาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันได้เมื่อมีการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ตัวดูดซับชีวภาพ

การเข้าใจกลไกหรือการทำงานของกระบวนการดูดซับทางชีวภาพทำให้สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของตัวดูดซับได้ กลไกของการดูดซับทางชีวภาพส่วนใหญ่จะเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นความแรงไอออน (ionic strength) จะมีผลกระทบต่อการดูดซับโลหะหนัก

การเข้าใจกลไกการดูดซับทางชีวภาพ ยังทำให้สามารถเลือกวิธีการทำให้โลหะหนักที่ถูกดูดซับออกไปจากตัวดูดซับ (desorption) ให้เหมาะสมกับกลไกที่เกี่ยวข้องได้ ตัวอย่างเช่นโลหะที่จับกับกลุ่มของกรดได้นั้น จะสามารถทำให้ผันกลับหรือล้างออกจากตัวดูดซับได้ถ้าพีเอชของสารละลายต่ำ ๆ หรืออยู่ในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดนั่นเอง

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางชีวภาพ

การดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับชีวภาพหรือการใช้เซลล์สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในการกำจัดโลหะหนัก จะมีประสิทธิภาพดีหรือไม่นั้น มีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับอยู่หลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนัก ปริมาณตัวดูดซับ^[515] ความแรงของไอออน (ionic strength) ฯลฯ เป็นต้น

1. ค่าพีเอชหรือความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย (pH)

พีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อกลไกและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยตัวดูดซับ พีเอชจะส่งผลต่อปริมาณของไอออนของโลหะหนักในสารละลายหรือรูปแบบ (speciation) ของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายว่าอยู่ในรูปของไอออนหรืออยู่ในรูปสารประกอบ^[10, 515] ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักจะอยู่ในรูปประจุอิสระ (รูปที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้) ที่พีเอชต่ำ และเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นโลหะหนักจะจับตัวกับ OH^- และอาจตกตะกอนได้ โดยระดับพีเอชที่จะทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปไอออนอิสระ หรืออยู่ในรูปตกตะกอน นั้น จะมีค่าระดับพีเอชที่แตกต่างกันไป ในโลหะหนักที่ต่างชนิดกัน

พีเอชยังส่งผลต่อการทำงานของหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับให้อยู่ในรูปที่สามารถจับหรือไม่สามารถจับโลหะหนักได้ โดยปกติแล้วหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับจะสามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้ในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด เพราะหมู่ฟังก์ชันจะเกิดการปล่อยประจุบวกและทำให้หมู่ฟังก์ชันมีประจุลบ จึงจับกับประจุบวกของโลหะหนักได้ เช่น หมู่ COOH เมื่อพีเอชต่ำจะอยู่ในรูป COO^- โดยที่หมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะสามารถอยู่ในรูปของประจุลบได้ที่ค่าพีเอชของสารละลายแตกต่างกัน ขึ้นกับค่า pK_a (acid constant value) ของหมู่ฟังก์ชันนั้น ๆ และพีเอชยังส่งผลต่อการแย่งกับไอออนของโลหะหนักจับกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ^[136, 144] ดังนั้นพีเอชจึงมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยสิ่งมีชีวิต^[665] แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงหรือต่ำมากเกินไปจะทำให้ลายตัวดูดซับได้เช่นกัน

biosorption สามารถใช้ดูดซับโลหะหนักได้ทั้งค่าพีเอชช่วงกว้าง ตั้งแต่ค่าต่ำ ๆ เช่นน้ำจากเหมืองแร่หรือจนถึงพีเอชสูง ๆ เช่นน้ำที่ออกมาจากขบวนการตกตะกอน โดยขบวนการการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าพีเอช ดังนั้นในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับชีวภาพทุกครั้งต้องมีการรายงานค่าพีเอช เพื่อข้อมูลจากการศึกษาจะได้สามารถเปรียบเทียบกันได้

โดยส่วนใหญ่แล้วตัวดูดซับชีวภาพเมื่อดูดซับไอออนของโลหะหนักจากสารละลายแล้วยังทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายเกิดได้มากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น เพราะจะเกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก แต่มีข้อเสียคือถ้าเป็น

การศึกษาถึงความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับโลหะหนักในระดับห้องปฏิบัติการจะทำให้เกิดความยากในการศึกษา เพราะไม่สามารถที่จะแยกปริมาณโลหะหนักที่ตกตะกอนกับ

ไม่มีการเปิดเผยถึงสิ่งใดที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับออกจากกันได้ จึงไม่ทราบความสามารถที่แท้จริงของตัวดูดซับในการจับโลหะหนัก แต่ถ้าเป็นในการบำบัดน้ำเสียจริงในระบบบำบัด การที่พีเอชของสารละลายสูงขึ้นหลังจากที่ตัวดูดซับทำการดูดซับโลหะหนัก จะเป็นการดูดซับที่ดี เพราะทำให้สามารถเพิ่มการกำจัดโลหะออกจากระบบได้ เพราะมีทั้งการดูดซับโดยตัวดูดซับ และการตกตะกอนที่พีเอชสูงเกิดขึ้น แต่ถ้าเป็นการกำจัดโลหะหนักโดยให้น้ำเสียผ่านตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ การตกตะกอนจะส่งผลเสียเพราะจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของคอลัมน์ได้เช่นกัน

2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลเกี่ยวข้องต่อการดูดซับโลหะหนักของสิ่งมีชีวิต โดยความเร็วของปฏิกิริยา หรือ rate of chemical reaction จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น^[437] ส่วนใหญ่แล้วความสามารถในการกำจัดหรือดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ การดูดซับจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น^[677] แต่ทั้งนี้หากเป็นการใช้ตัวดูดซับที่ยังมีชีวิตอยู่ การเพิ่มของอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ค่าการดูดซับลดลง เพราะการทำงานของระบบต่าง ๆ ภายในเซลล์ผิดปกติไป

ค่าการดูดซับของตัวดูดซับชีวภาพแต่ละชนิดจะต่างกันตามสภาวะที่ต่างกัน หากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่สูงกว่ากัน จำเป็นต้องเทียบความสามารถในการดูดซับที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน คืออาจเทียบด้วยการใช้สมการการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งคือการศึกษาการดูดซับที่มีระดับอุณหภูมิเท่า ๆ กัน โดยพบว่าส่วนใหญ่อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ในช่วง 20-35 องศาเซลเซียส จะไม่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่างกันมากนัก^[19]

3. ระยะเวลา

ระยะเวลาในการที่ตัวดูดซับได้สัมผัสกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายมีผลต่อปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับออกจากสารละลาย โดยระยะเวลาที่เหมาะสมคือระยะเวลาที่เป็นจุดสมดุล (equilibrium time) โดยที่จุดนี้ตำแหน่งยึดจับบนเซลล์ของตัวดูดซับสามารถทำงานจับกับไอออนของโลหะหนักได้อย่างเต็มที่แล้ว ไม่สามารถจับเพิ่มได้อีกกว่านี้อีก หรือเป็นจุดที่การจับไอออนและการคายไอออนของโลหะหนักออกจากตำแหน่งยึดจับเกิดขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน จึงดูเหมือนว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับอีก ดังนั้นในกรณีที่ให้ระยะเวลาในการสัมผัสของตัวดูดซับกับโลหะหนักน้อยเกินไป ก็จะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายต่ำกว่าค่าที่ตัวดูดซับควรทำได้ ทำให้ใช้งานตัวดูดซับได้ไม่เต็มที่ แต่หากปล่อยให้ระยะเวลาเกินจุดสมดุลมากเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองระยะเวลาในการกำจัดโลหะหนักมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความเข้มข้นของโลหะหนัก

ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก (heavy metal concentration) มีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับ ปกติแล้วการดูดซับทางชีวภาพสามารถใช้ได้กับความเข้มข้นโลหะหนักในช่วงกว้าง ถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักตั้งต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การที่มีโลหะหนักเข้มข้นมากยังทำให้มีการสะสมโลหะหนักบนผิวเซลล์ตัวดูดซับซึ่งสามารถเกิดเป็นชั้นซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ทำให้การดูดซับสูงขึ้นด้วย

นอกจากนี้ความเข้มข้นโลหะหนักที่สูงในสารละลายนั้นทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น ระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ จึงทำให้มีแรงผลักของประจุโลหะหนักจากสารละลายสู่ผนังเซลล์ตัวดูดซับสูง ทำให้การขนส่งประจุบวกจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายเกิดได้แรงและเร็ว ทำให้ตัวดูดซับสามารถกำจัดโลหะหนักได้เร็วและได้มาก ค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะถูกจำกัดโดยปริมาณตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ โดยถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ ค่าการดูดซับอาจจะต่ำ เป็นเพราะว่าตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับไม่ได้ใช้ทั้งหมด

5. ปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณของตัวดูดซับ (biomass concentration) ในสารละลายมีผลต่อปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ โดยปริมาณตัวดูดซับที่ต่ำจะเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม (มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับ) และเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นนั้นทำให้เกิดการชนกัน หรือขัดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ จึงทำให้ตำแหน่งยึดจับบางส่วนไม่สามารถจับกับโลหะหนักได้^[130, 141] แต่ในบางสมมุติฐานกล่าวว่า การที่ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับลดลงนั้น เนื่องมาจากปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในสารละลายนั้นมีอยู่ในปริมาณจำกัด หรือมีอยู่ในปริมาณน้อย เมื่อใส่ตัวดูดซับลงไป ในจำนวนที่มากเกินไป จึงทำให้มีจำนวนตำแหน่งยึดจับมากเกินไปจนโลหะหนัก เมื่อการดูดซับเสร็จสิ้น จึงยังคงมีตำแหน่งยึดจับบางส่วนที่ว่างอยู่ แต่หากใส่ตัวดูดซับจำนวนน้อยลงในขณะที่มีปริมาณโลหะหนักเท่ากัน จะทำให้ตำแหน่งยึดจับสามารถจับโลหะหนักได้เต็มที่ ดังนั้นเมื่อคำนวณเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันจึงทำให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนน้อยมีการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่า^[130, 141] ซึ่งปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมในการใช้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในการบำบัดโลหะหนัก

6. ตำแหน่งยึดจับ

ตัวดูดซับทางชีวภาพมีลักษณะเซลล์ ประเภทเซลล์ที่แตกต่างกัน มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนสูง มีความแตกต่างของโมเลกุลที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีตำแหน่งยึดจับ (binding site) หรือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประเภทแตกต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้น แม้ตำแหน่งยึดจับจะเป็นหมู่ฟังก์ชันประเภทเดียวกันก็ยังสามารถมีกลไกการจับที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นหมู่คาร์บอกซิลสามารถจับโลหะได้ทั้งการเกิดสารเชิงซ้อนหรือการแลกเปลี่ยนประจุกับประจุบวกก็ได้

สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่เป็นตัวจับกับไอออนของโลหะหนักที่พบในกลุ่มสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กพวกสาหร่ายและ แบคทีเรีย เช่นไฮดรอกซิล (-OH), คาร์บอกซิล (COOH), ซัลฟไฮไดรล (-SH), เอมีน (-NH₂), เอไมด์ (CO-NH), ไธโออีเธอร์ (R-S-R) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ มีความสำคัญกับขบวนการดูดซับทางชีวภาพ กับชนิดโลหะที่แน่นอน พบได้ในชนิดของตัวดูดซับชีวภาพที่แน่นอนด้วย การดูดซับขึ้นกับปริมาณของหมู่ฟังก์ชันหรือตำแหน่งยึดจับที่ทำหน้าที่จับโลหะด้วย สำหรับขบวนการกำจัดโลหะหนักที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิตนั้นตำแหน่งยึดจับต้องอยู่ในรูปที่เป็นประจุจึงจะจับกับไอออนของโลหะหนักได้ หมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่ที่ใช้ในขบวนการดูดซับทางชีวภาพจะอยู่ในรูปกรดทั้งไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล พวกนี้จะอยู่ในรูปกลางเมื่อรับโปรตอน (protonate) และจะอยู่ในรูปประจุลบเมื่อให้โปรตอน (deprotonate) เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมากกว่าค่า pKa กลุ่มเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่จับกับประจุบวกของโลหะหนักได้ สำหรับกลุ่มไอมีน เอมีน เอไมด์ เอมีดาไซด์ จะเป็นกลางเมื่อให้โปรตอน เป็นบวกเมื่อรับโปรตอน ดังนั้นกลุ่มนี้จะทำหน้าที่จับประจุลบเมื่อตัวมันเองรับโปรตอนแล้วให้ประจุบวก

ในสิ่งมีชีวิตแล้วสารที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับมักได้แก่สารชีวโมเลกุล ซึ่งสารชีวโมเลกุล (biomolecules) หมายถึงสารที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ในกระบวนการดำรงชีวิต จำแนกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ลิพิด และกรดนิวคลีอิก สารชีวโมเลกุลที่พบในตัวดูดซับทางชีวภาพและมีความเกี่ยวข้องกับการจับโลหะหนัก ที่พบในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ เช่นกรดแอลจินิก เปปติโดไกลแคน กรด teichoic โคติน โคโคซาน ของฟังก์ไจ โดยสารชีวโมเลกุลเหล่านี้จะมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่ในการจับโลหะหนักอยู่ สารชีวโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชันหลายอย่างที่ใช้ในการจับโลหะหนัก เช่นหมู่ -OH, -SH, -NH₂, -COOH, -CHO เป็นต้น

7. ไอออนประจุบวกและประจุลบอื่น ๆ

น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนอกจากมีไอออนของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่แล้ว ยังมีไอออนของโลหะอื่น ๆ (other cation and anion) ปนอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งโลหะเหล่านี้ทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับลดลงได้^[468]

เมื่อสารละลายมีไอออนของโลหะหนักหรือไอออนประจุบวกอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งชนิด มักส่งผลกระทบต่อการทำงานของโลหะหนักโดยตัวดูดซับชีวภาพได้ เช่น ประจุบวกของ Na⁺, Mg²⁺ ที่

พบในน้ำเสีย โดยเฉพาะน้ำเสียที่ผ่านขบวนการตกตะกอน หรือในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีไอออนโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ปนขึ้นมาได้อีก ซึ่งไอออนต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนมีประจุบวกเช่นเดียวกับโลหะที่เราต้องการกำจัด และไอออนเหล่านี้สามารถไปแย่งจับกับตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับได้ จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักชนิดที่ต้องการกำจัดลดลง ซึ่งการที่โลหะชนิดอื่นมาแย่งโลหะหนักจับกับแขนของตัวดูดซับอาจจะแย่งในรูปของไฟฟ้าสถิตหรือโควาเลนต์ก็ได้

เช่น การที่มี Fe^{2+} และ Zn^{2+} อยู่ในสารละลายจะส่งผลต่อการดูดซับยูเรเนียมโดย *Rhizopus arrhizus*^[640] โดยทำให้การดูดซับยูเรเนียมลดลง และการดูดซับโคบอลต์โดยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจะถูกยับยั้งโดยยูเรเนียม ตะกั่ว พรอท และคอปเปอร์ที่อยู่ในสารละลาย^[575]

แต่ในบางครั้งพบว่าการมีไอออนชนิดอื่นอยู่ไม่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนักบางประเภทเช่น การใช้แบคทีเรีย ฟังก์จีและยีสต์ ในการดูดซับยูเรเนียม ไม่ได้รับผลกระทบจากการที่สารละลายนั้นมี แอมโมเนียส โคบอลต์ คอปเปอร์ แคดเมียม พรอท ตะกั่ว ปรากฏอยู่^[575]

สำหรับประจุลบ (anion) พบว่าส่งผลกระทบต่อการดูดซับโลหะหนักเช่นกัน โดยประจุลบอาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายได้ จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะกระทบมากหรือน้อยแค่ไหนขึ้นกับว่าประจุลบเหล่านั้นมีความชอบหรือความแรงในการแย่งหรือแข่งกับตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับจับกับโลหะหนักได้มากเท่าใด

8. อิเล็กโตรเนกาติวิตี

อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity-EN) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนของธาตุต่าง ๆ ที่มาสร้างพันธะกัน ด้วยพันธะเคมี (chemical bond) ธาตุที่มีค่า EN สูงนั้นมีความสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าธาตุที่มี EN ต่ำ โดยพบว่าโลหะหนักที่มีค่า EN สูง นั้นสามารถดูดซับกับหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับทางชีวภาพได้ดีกว่าโลหะหนักที่มีค่า EN ต่ำ ดังนั้นในกรณีที่มีโลหะหนักอยู่ในน้ำเสียมากกว่าหนึ่งชนิด โลหะหนักที่มีค่า EN สูงกว่าจะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับทางชีวภาพได้มากกว่า

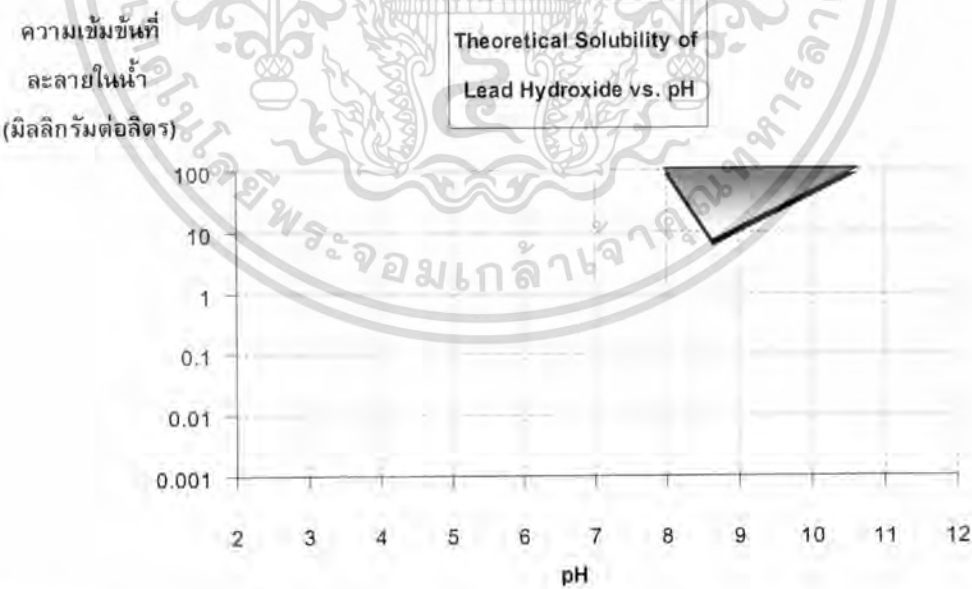
9. รูปแบบทางเคมีของโลหะหนัก

รูปแบบของโลหะหนัก (heavy metal speciation) มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพ เพราะตัวดูดซับทางชีวภาพสามารถดูดซับโลหะหนักที่อยู่ในรูปของไอออนอิสระได้ดี ดังนั้นเมื่อต้องการใช้ตัวดูดซับชีวภาพในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายควรทำให้โลหะหนักนั้นละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของไอออน ซึ่งทั้งนี้รูปแบบของโลหะหนักขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลายนั่นเอง โดยโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่ทำให้โลหะหนักนั้นอยู่ในรูปไอออนหรือตกตะกอนแตกต่างกันไป

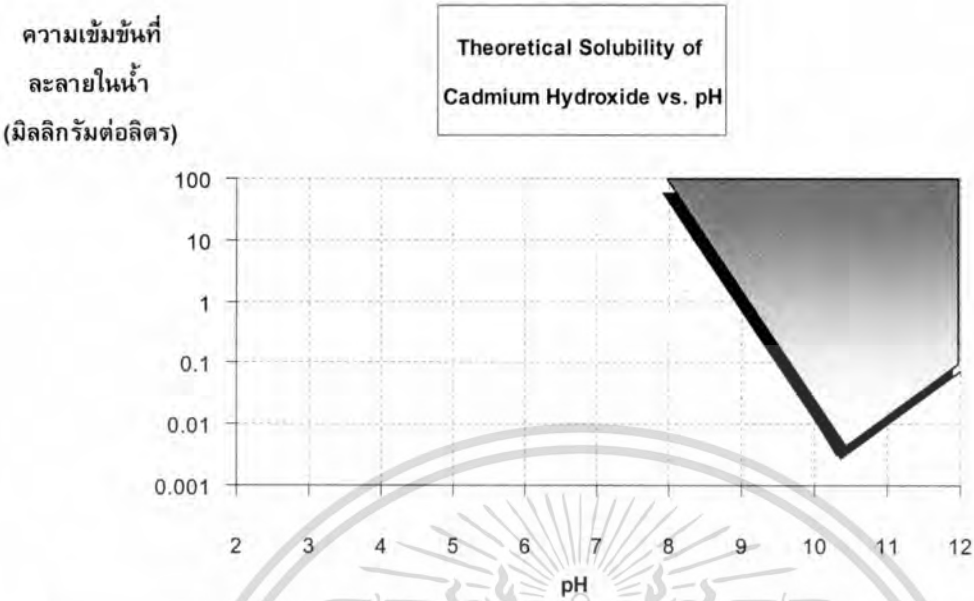
โดยปกติแล้วพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณ OH^- เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้โลหะหนักเกิดการตกตะกอนกับ OH^- จึงทำให้ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับโลหะหนักที่ตกตะกอนนี้ได้ การกำจัดโลหะหนักโดยตัวดูดซับทางชีวภาพจึงมีประสิทธิภาพลดลง

ตัวอย่างไดอะแกรมแสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นของโลหะหนักและพีเอชต่าง ๆ กัน (ภาพที่ 1-7)^[36] โดยแต่ละภาพจะแสดงให้เห็นว่าพีเอชควบคุมการละลายของโลหะหนักโดยตรงได้อย่างไร โดยค่าในแนวตั้งหรือแกนแนว (Y) แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนบนสุดของสเกลแสดงปริมาณโลหะหนักที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนล่างสุดของสเกลคือความเข้มข้น 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร

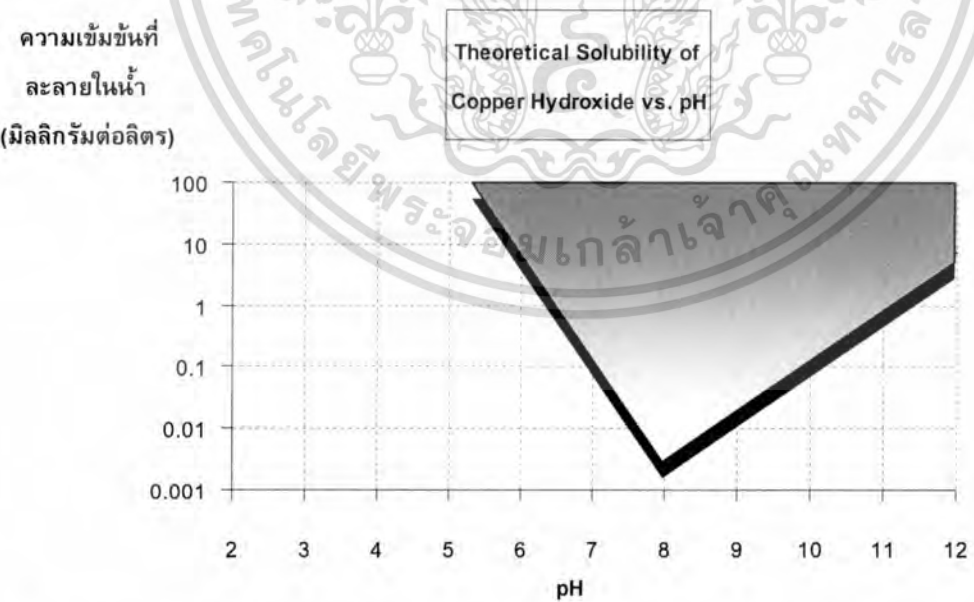
ไดอะแกรมแสดงความสามารถในการละลายนี้จะแสดงพื้นที่บริเวณที่โลหะหนักละลายและไม่ละลาย โดยส่วนที่อยู่เหนือเส้นหนาที่บัสส์หรืออยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีสีทึบแสดงถึงค่าที่โลหะหนักจะตกตะกอนในรูปที่รวมกับ OH^- นั่นคือแสดงบริเวณที่ตกตะกอน ส่วนบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าหรืออยู่นอกเส้นหนาที่บัสส์แสดงถึงโลหะหนักที่ละลายอยู่ในสารละลาย ไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้น หรืออยู่ในรูปที่เป็นประจุบวกนั่นเอง



ภาพที่ 1 ความสามารถในการละลายของตะกั่วที่พีเอชและความเข้มข้นตะกั่วต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

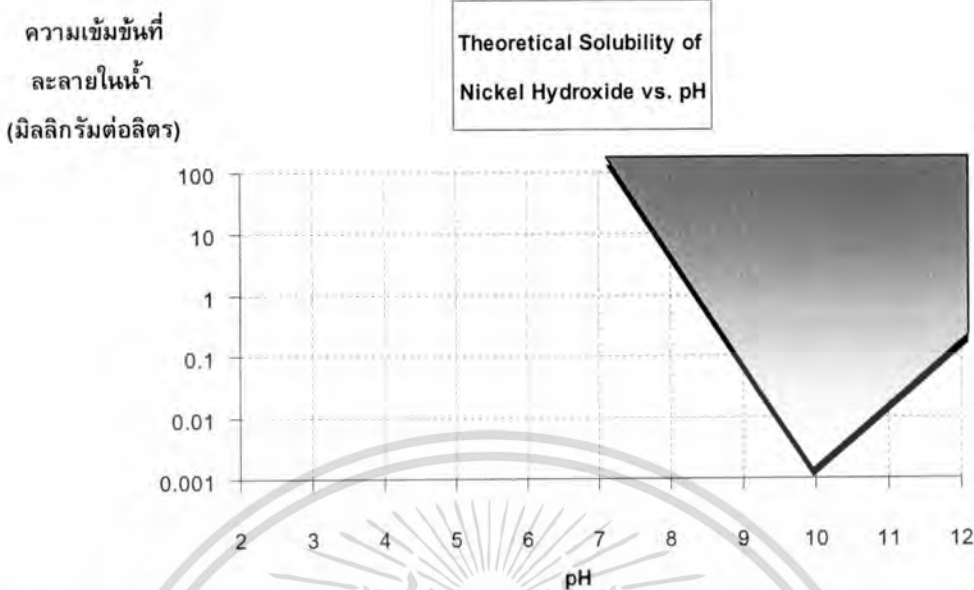


ภาพที่ 2 ความสามารถในการละลายของแคดเมียมที่พีเอชและความเข้มข้นแคดเมียมต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

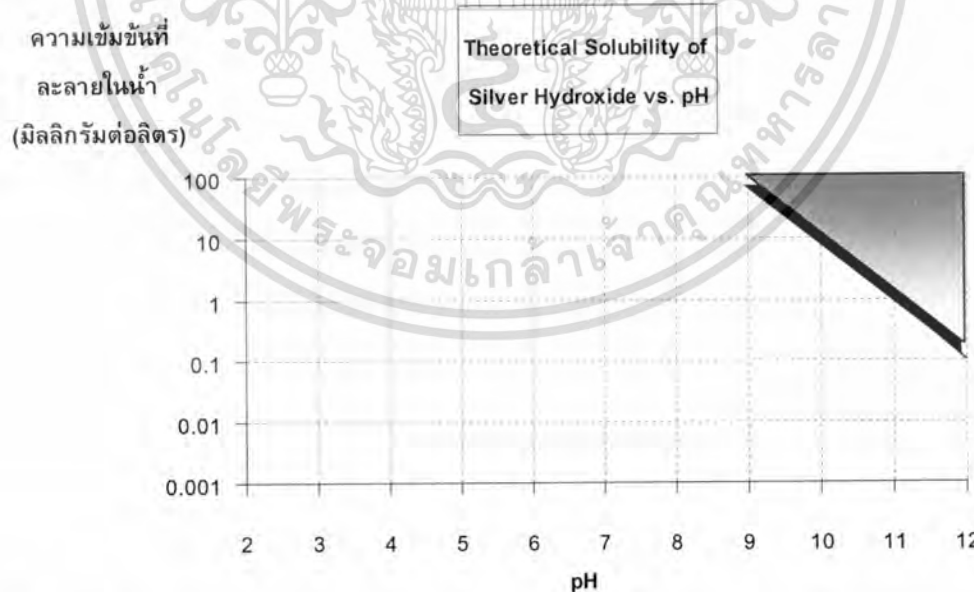


ภาพที่ 3 ความสามารถในการละลายของคอปเปอร์ที่พีเอชและความเข้มข้นคอปเปอร์ต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปเพื่อการอื่นใดทั้งสิ่งใดทั้งนั้นให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก



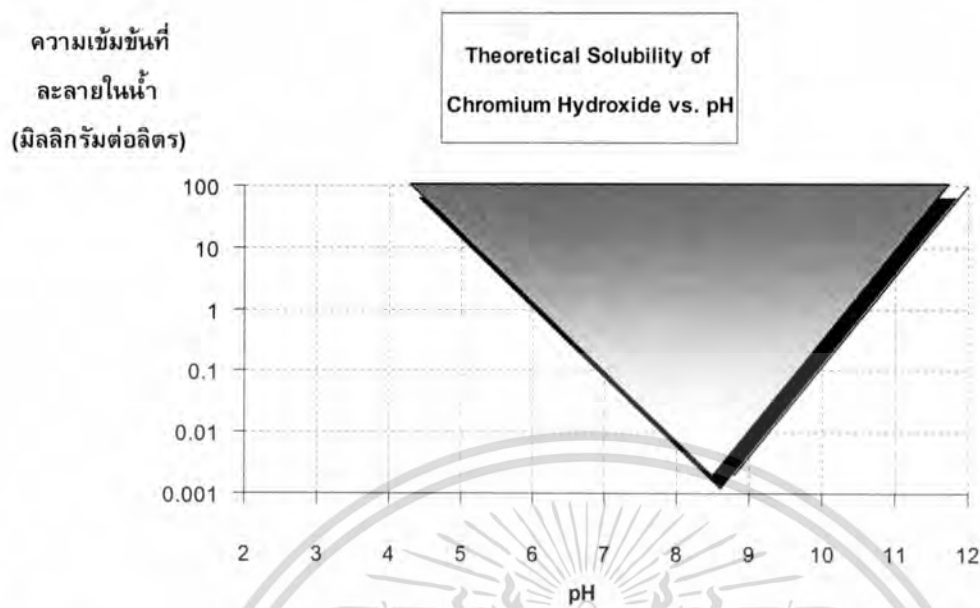
ภาพที่ 4 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลที่พีเอชและความเข้มข้นนิกเกิลต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]



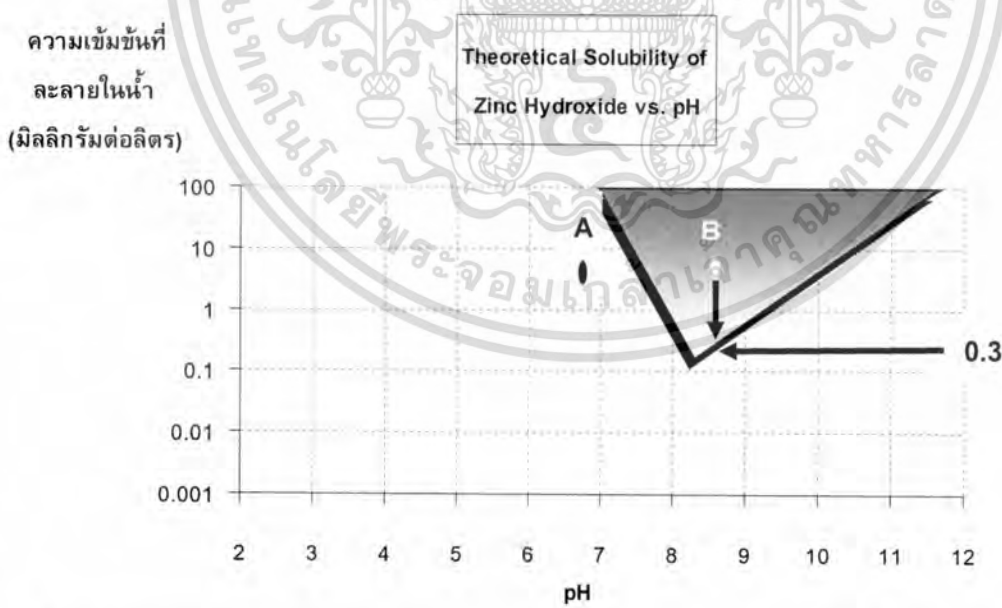
ภาพที่ 5 ความสามารถในการละลายของซิลเวอร์ (เงิน) ที่พีเอชและความเข้มข้นซิลเวอร์ต่าง ๆ กัน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม หากพบการละเมิดลิขสิทธิ์ กรุณาแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6 ความสามารถในการละลายของโครเมียมที่พีเอชและความเข้มข้นโครเมียมต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]



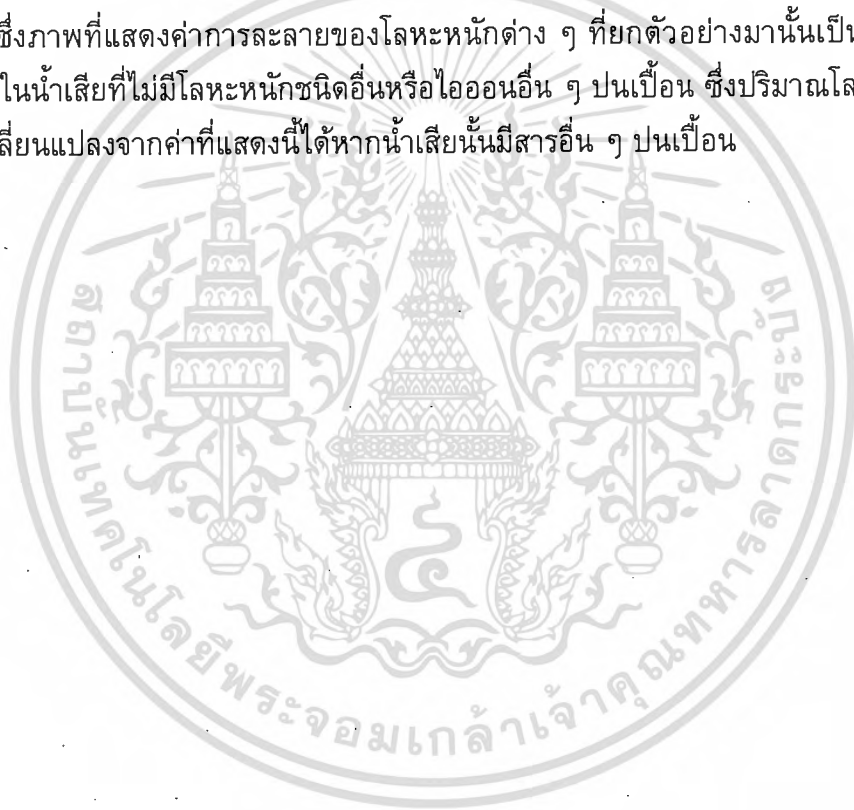
ภาพที่ 7 ความสามารถในการละลายของสังกะสีที่พีเอชและความเข้มข้นสังกะสีต่าง ๆ กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ayres et al. (1994)^[36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่เป็นการเปิดเผยข้อมูลอื่นใดทั้งนี้หากมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 7 กลไกทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก

ตัวอย่างการอ่านผลจากไตอะแกรม เช่นจากภาพที่ 7 ไตอะแกรมการละลายของสังกะสี ภาพนี้สามารถแสดงตัวอย่างผลของพีเอชต่อปริมาณสังกะสี เช่นในน้ำเสียมีสังกะสีละลายอยู่ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6.8 ซึ่งแสดงด้วยจุด A ในไตอะแกรม ซึ่งจุดนี้อยู่ใต้เส้นนาทึบสีดำในกราฟการละลาย ดังนั้นจึงแสดงว่าสังกะสีที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่พีเอช 6.8 นี้จะอยู่ในรูปที่ละลายเท่านั้น

ส่วนจุด B แสดงถึงค่าของสารละลายเมื่อมีพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 6.8 เป็น 8.6 ซึ่งจุดนี้อยู่เหนือเส้นทึบสีดำหรือเส้นการละลาย สังกะสีที่มีอยู่เดิมจะตกตะกอน โดยที่พีเอชนี้ยังคงมีสังกะสีส่วนที่ละลายเหลืออยู่ประมาณ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (จากเดิม 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งแสดงโดยส่วนที่อยู่ใต้เส้นนาทึบสีดำ ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่แท้จริงที่พบในสารละลายเมื่อใส่สังกะสี 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพีเอช 8.6 คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่เหลือจะตกตะกอน

ซึ่งภาพที่แสดงค่าการละลายของโลหะหนักต่าง ๆ ที่ยกตัวอย่างมานั้นเป็นการแสดงการละลายในน้ำเสียที่ไม่มีโลหะหนักชนิดอื่นหรือไอออนอื่น ๆ ปนเปื้อน ซึ่งปริมาณโลหะหนักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่แสดงนี้ได้หากน้ำเสียนั้นมีสารอื่น ๆ ปนเปื้อน



บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

HEAVY METAL BIOSORPTION BY ALGAE

ข้อดีของการใช้สาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก

ขบวนการการดูดซับทางชีวภาพนั้นมีการใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพ (biosorbent) ที่หลากหลายชนิด^[118] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสาหร่ายทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและสาหร่ายขนาดใหญ่ได้รับความนิยมในการใช้ดูดซับโลหะหนัก^[171, 400, 407, 408, 426, 481, 507, 578, 631, 634, 650] ซึ่งพบว่าข้อดีของการใช้สาหร่ายขนาดเล็กในการกำจัดโลหะหนักประกอบด้วย สาหร่ายขนาดเล็กมีราคาถูก ใช้พื้นที่เพียงเล็กน้อยในการเพาะเลี้ยง มีต้นทุนในการเลี้ยงต่ำ โดยการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นตัวดูดซับโลหะหนักสามารถใช้ในรูปที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิตก็ได้ ขึ้นกับวัตถุประสงค์และสถานการณ์ในการใช้ โดยสามารถนำมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ที่มีปริมาณน้ำมากได้ เพราะเซลล์ที่มีขนาดเล็กสามารถกระจายได้ทั่วมวลน้ำจากแรงของคลื่น ลม หรือการใช้ใบพัดเพื่อกวนน้ำในระบบบำบัด

ข้อดีของการใช้สาหร่ายขนาดใหญ่คือสาหร่ายขนาดใหญ่มีอยู่ปริมาณมากในธรรมชาติ และองค์ประกอบของเซลล์และผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ดูดซับโลหะหนัก^[701, 704, 731] โดยสามารถเก็บสาหร่ายขนาดใหญ่จากธรรมชาติมาตากแห้งและนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้ จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตตัวดูดซับต่ำมาก นอกจากนี้สาหร่ายขนาดใหญ่หลายชนิดยังสามารถเพาะเลี้ยงได้ในบ่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงสามารถจัดทำบ่อบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายขนาดใหญ่ที่มีชีวิตได้เช่นกัน

สาหร่ายมีความต้องการสารเคมีหรือธาตุอาหารชนิดอื่นมาเติมในระบบบำบัดน้ำเสียน้อยมาก และมีความสามารถในการลดโลหะหนักในน้ำเสียให้เหลือในระดับความเข้มข้นที่ต่ำ นอกจากนี้ในการนำสาหร่ายมากำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียพบว่าหลังกำจัดโลหะหนักแล้วน้ำเสียดังกล่าวไม่จำเป็นต้องมีขบวนการกำจัดโลหะหนักประเภทอื่นเข้ามาช่วย หรือไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพงมาช่วยในการกำจัดโลหะหนักอีกครั้งหนึ่ง

น้ำเสียโดยทั่วไปมักไม่ได้มีแค่โลหะหนักเพียงอย่างเดียว แต่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์อื่น ๆ อีกมาก เช่นสารอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งหากใช้วิธีตกตะกอนทางเคมีหรือใช้แผ่นเรซินเพื่อกำจัดโลหะหนัก สิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เหล่านี้จะรบกวนเอ็กสตรานเซลล์หรือสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

การทำงานของสารเคมีหรือแผ่นเรซิน แต่หากเป็นสหร่ายที่มีชีวิตจะพบว่าสหร่ายสามารถดูดซับสารอินทรีย์เหล่านี้เข้าเซลล์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและยังคงมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้เช่นเดิม ดังนั้นการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เหล่านี้จึงไม่มีผลกระทบที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของสหร่ายลดลงได้

สหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้อย่างเฉพาะเจาะจงคือสามารถเลือกดูดซับโลหะหนักบางชนิดได้ และสหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักหลาย ๆ ชนิดได้พร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังสามารถล้าง (desorption) โลหะหนักออกมาจากเซลล์สหร่ายได้ ซึ่งการที่สามารถล้างโลหะหนักออกมาได้ทำให้สามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่ และตัวดูดซับหรือสหร่ายก็สามารถนำกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่ได้ การล้างโลหะออกจากตัวดูดซับได้เป็นประโยชน์ที่สูงมากโดยเฉพาะโลหะประเภททอง

การจัดระบบบำบัดหรือทำการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สหร่ายสามารถทำได้ง่ายเพราะสหร่ายสามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่ค่อนข้างกว้าง เช่นในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิหรือมีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง สภาวะที่มีการปนเปื้อนของไอออนโลหะชนิดอื่นอยู่ แม้อยู่ในสภาวะเหล่านี้สหร่ายยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดี ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยเหล่านี้

คุณสมบัติของเซลล์สหร่ายที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก

ได้มีการใช้สิ่งมีชีวิตหลายชนิดเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ โดยสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้แตกต่างกันไป โดยดูดซับได้ตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม จนถึงค่าสูงกว่านี้ มีกลุ่มตัวดูดซับหลัก ๆ ที่นิยมใช้ได้แก่สหร่าย พังไจ แบคทีเรีย การเลือกตัวดูดซับแบบใด ต้องเลือกที่ราคาถูก หาง่าย ดูดซับโลหะหนักได้มาก มีกลไกที่รวดเร็ว และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย^[591]

สหร่ายสามารถพบได้ทั่วไปในทุกแหล่งน้ำ ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม บางชนิดมีการเจริญเติบโตจนเพิ่มปริมาณมากได้ในแหล่งน้ำหรือในทะเล โดยไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ จึงเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถนำมาจากธรรมชาติเพื่อมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง หามาใช้ได้ง่าย สามารถกำจัดได้ง่าย หรือสามารถแยกหัวเชื้อหรือเก็บจากธรรมชาติมาทำการเพาะเลี้ยงเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ได้

โดยทั่วไปผนังเซลล์ของสหร่ายเป็นส่วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง เมื่อสหร่ายสัมผัสกับสารละลายโลหะหนัก ไอออนของโลหะหนักจะเกิดการทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของสหร่ายหรือกับเยื่อหุ้มเซลล์ของสหร่าย^[566] โดยที่ผิวนอกสุดของเซลล์สหร่ายทั้งกลุ่มโปรคาริโอตและยูคาริโอตประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใด ๆ การดูดซับโลหะหนักโดยสหร่าย

(พอลิแซ็กคาไรด์) ซึ่งพวกนี้สามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้ เช่นผนังเซลล์ที่เป็นเซลลูโลสจะพบหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนัก

โดยในส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์จะพบว่าเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในสาหร่ายหลาย ๆ ชนิด ซึ่งพอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่ที่ผนังเซลล์อาจปรากฏในรูปของเกลือของประจุบวกเช่นเกลือของ Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ซึ่งเกลือประจุบวกเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักตัวอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้การกำจัดโลหะหนักยังเกี่ยวข้องกับการทำงานของน้ำตาลที่เป็นกรด (acidic sugar) ที่ผนังเซลล์ด้วย การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ โดยไอออนของโลหะสามารถแทนที่โปรตอนหรือประจุที่เป็นประจุบวก และมาจับกับสาหร่ายโดยสามารถแทนที่ได้ทั้งประจุบวกที่เป็นอิสระอยู่ในน้ำหรือประจุบวกที่จับกับผนังเซลล์ของสาหร่ายเรียบร้อยแล้ว เช่นพบว่า Sr (strontium) สามารถเข้าไปแทนที่ Zn ถึงแม้ว่า Zn จะถูกจับไว้ที่ผนังเซลล์สาหร่ายเรียบร้อยแล้ว แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยด้านแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) เข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการการดูดซับโลหะหนักด้วยเช่นกัน [86, 450]

ส่วนใหญ่ผนังเซลล์ของสาหร่ายมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแตกตัวให้ประจุลบ จึงเกิดการดูดซับกับไอออนของโลหะอื่น ๆ ซึ่งมีประจุบวกได้ ในกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กบางกลุ่มที่ผนังเซลล์ชั้นนอกมี lipopolysaccharide ประกอบอยู่ จึงทำให้ผนังเซลล์มีค่าประจุลบได้มากขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถจับโลหะหนักหรือกำจัดโลหะหนักได้ดี เพราะไอออนของโลหะหนักมักมีประจุเป็นบวก นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตหรือสาหร่ายที่มีเมือก (mucilage, gelatinous sheath) หุ้มเซลล์จะมีการจับโลหะต่าง ๆ ได้ดีมากขึ้นเพราะในเมือกเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบประกอบอยู่

เมื่อสารละลายต่าง ๆ สัมผัสกับผนังเซลล์สาหร่าย หรือเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่าย สาหร่ายจะสามารถสะสมไอออนของโลหะต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลายมาไว้ที่ผิวเซลล์โดยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ที่ผนังเซลล์สาหร่ายเกิดจากการทำงานของหมู่ฟังก์ชันโดยหมู่หลักที่ทำหน้าที่จับโลหะหนักคือหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) ที่ผนังเซลล์สาหร่าย^[657] หรือใช้ประจุลบที่พบที่เมือกหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์เป็นตัวจับโลหะหนัก ซึ่งกลุ่มหลัก ๆ ในพอลิแซ็กคาไรด์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนคือกลุ่ม $-COOH$ ^[532], SO_4^{2-} , $-NH_2$, OH^- และ $-SH$ ^[111]

ในสาหร่ายหมู่คาร์บอกซิลเป็นตัวหลักที่จับโลหะ โดยหมู่คาร์บอกซิลจะพบน้อยใน glucuronic ของสาหร่ายสีเขียวและสีแดง ส่วนกลุ่ม sulfonate จะพบมากในสาหร่ายสีน้ำตาล เพราะมี carrageenan สูง แต่ในสาหร่ายสีเขียวยังพบ amino acid, carboxyl, sulfhydryl, amine, amide, amidazole ด้วย ซึ่งพวกนี้จะประกอบอยู่ที่ผนังเซลล์และทำหน้าที่จับโลหะหนักได้เช่นกัน

เซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตสามารถปล่อยลิแกนด์ (ligand) ซึ่งเป็นไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถจับโลหะต่าง ๆ ในน้ำได้ การออกมาจับกับโลหะหนักนอกเซลล์ทำให้โลหะหนักไม่ถูกดูดซับโดยสาหร่าย

ตกตะกอนหรือเมื่อลิแกนด์จับโลหะหนักแล้วจะนำเข้าสู่เซลล์ โดยปริมาณลิแกนด์ขึ้นกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย สาหร่ายที่เจริญเติบโตมากจะมีลิแกนด์มาก และปริมาณโลหะหนักในเซลล์สาหร่ายก็ขึ้นกับปริมาณลิแกนด์โดยถ้ามีลิแกนด์มากก็就会有การนำโลหะหนักเข้าไปมาก ดังนั้นสาหร่ายที่สร้างลิแกนด์ได้มากจะกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้มาก^[576, 618] การที่โลหะหนักเข้าสู่เซลล์สาหร่ายได้จะผ่านเข้าโดยขบวนการการนำแร่ธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ (nutrient metal uptake system) ซึ่งตัวที่ทำหน้าที่พาแร่ธาตุที่เป็นอาหารเข้าสู่เซลล์ไม่มีความเฉพาะเจาะจงกับแร่ธาตุอาหารมากพอ ดังนั้นตัวพาจึงทำหน้าที่พาโลหะหนักเข้าในเซลล์ได้ด้วย^[654]

กลไกของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก

สาหร่ายทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษออกจากน้ำเสีย สาหร่ายสามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ภายในระยะเวลาสั้น ๆ โดยมีกลไกการกำจัดโลหะหนัก 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรก คือการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ (adsorption) และขั้นที่สองคือการดูดซับโลหะหนักเข้าภายในเซลล์ (absorption) โดยการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์นั้นเกิดอย่างรวดเร็วหลังจากสาหร่ายสัมผัสกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย โดยไอออนของโลหะหนักจะจับกับหมู่ฟังก์ชันที่ผนังเซลล์ของสาหร่าย การดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์นี้สามารถเกิดได้ทั้งบนเซลล์สาหร่ายที่มีและไม่มีชีวิต การดูดซับโลหะหนักโดยการจับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์เป็นคุณสมบัติที่พบได้ในสาหร่ายเกือบทุกชนิด ส่วนขั้นตอนที่สอง ขั้นตอนการนำเข้าสู่เซลล์ ขั้นตอนนี้เกิดอย่างช้า ๆ และเกิดได้ในสาหร่ายที่ยังมีชีวิตเท่านั้น^[618]

การนำโลหะหนักเข้าไปในเซลล์สาหร่ายนี้มี 2 แบบ คือ 1) โลหะหนักถูกจับเข้าไปไว้ในภายในเซลล์ของสาหร่ายและถูกจับไว้บนตำแหน่งยึดจับซึ่งอยู่ที่โครงสร้างภายในเซลล์ โดยแบบแรกนี้ไม่ขึ้นกับขบวนการเมตาบอลิซึมของสาหร่าย โดยเป็นการแพร่ผ่านของโลหะหนักเข้าไปในเซลล์ ตามความแตกต่างของความเข้มข้น เนื่องจากภายนอกเซลล์มีโลหะหนักเข้มข้นมากกว่าในเซลล์จึงไม่ต้องใช้พลังงานในการนำเข้าสู่เซลล์ และ 2) การนำโลหะหนักเข้าสู่เซลล์โดยใช้พลังงานซึ่งขึ้นกับขบวนการการทำงานของเซลล์^[109] โดยนำโลหะหนักผ่านผนังเซลล์เข้าไป และโลหะหนักเหล่านี้จะสะสมภายในเซลล์สาหร่าย

โดยในขั้นตอนการนำโลหะหนักเข้าสู่เซลล์แบบใช้พลังงานยังแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1) โลหะหนักถูกจับอยู่บนผนังเซลล์ด้านนอกของเซลล์สาหร่ายโดยตัวลิแกนด์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์หรืออาจจับอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผนังเซลล์ของสาหร่าย และขั้นตอน 2) โลหะหนักถูกพาผ่านผนังเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ ซึ่งความเร็วของการนำโลหะเข้าไปภายในเซลล์ขึ้นอยู่กับความเร็วของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange reaction) ซึ่งสิ่งที่

กำหนดความเร็วในการนำโลหะหนักเข้าเซลล์สาหร่าย คือความเร็วของปฏิกิริยาระหว่างลิแกนด์กับโลหะ ความเร็วในการปล่อยลิแกนด์ที่ทำหน้าที่จับโลหะหนักออกนอกเซลล์ และความเร็วในการที่ลิแกนด์พาโลหะหนักเข้าไปภายในเซลล์แบบใช้พลังงานในการขนส่ง ส่วนปริมาณโลหะหนักที่พบในเซลล์สาหร่ายนั้น ขึ้นกับความเร็วของการขนส่งโลหะหนักข้ามผ่านผนังเซลล์ ปริมาณของลิแกนด์ที่ทำหน้าที่นำโลหะหนักเข้าเซลล์ที่สาหร่ายนั้นมีอยู่

การสร้างและการปล่อยลิแกนด์ของสาหร่าย มีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย ส่วนความสามารถของสาหร่ายในการเลือกจับกับไอออนของโลหะหนักชนิดที่แน่นอนนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเลือกชนิดโลหะหนักของลิแกนด์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วลิแกนด์มีความสามารถในการเลือกโลหะที่เฉพาะเจาะจงได้

ไอออนของโลหะหนักภายในเซลล์ จะถูกใช้ไปในขบวนการทางชีวเคมีหรือถูกจับและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ เช่นการเกิดการจับโลหะหนักให้อยู่ในรูป metallothionein, phytochelatin ซึ่งเป็นขบวนการการลดพิษของโลหะหนัก ดังนั้นจึงขึ้นกับว่าไอออนของโลหะหนักนั้นถูกนำไปสู่เซลล์ของสาหร่ายเพื่อวัตถุประสงค์ใด หากนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (โลหะหนักบางชนิดจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย) โลหะหนักนั้นจะถูกนำเข้าสู่ขบวนการทางเคมี แต่เมื่อนำเข้าไปแล้วพบว่าโลหะหนักที่เป็นพิษ เซลล์สาหร่ายจะทำให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ และถ้าโลหะหนักที่นำเข้าสู่เซลล์สาหร่ายมีความเข้มข้นสูงมากเกินไปจนสาหร่ายไม่สามารถควบคุมความเป็นพิษได้ พิษเหล่านี้ก็จะส่งผลกระทบต่อเซลล์สาหร่าย

โลหะหนักที่เป็นพิษนั้นถูกนำเข้าสู่ภายในเซลล์สาหร่ายโดยขบวนการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์เหมือนกันกับการนำโลหะอื่น ๆ ที่มีประโยชน์เข้าสู่เซลล์ เนื่องจากตำแหน่งยึดจับบางตำแหน่งที่มีหน้าที่จับและนำธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์นั้นไม่สามารถที่จะเลือกชนิดของโลหะที่จะนำเข้าสู่เซลล์ได้ หรือมีความเฉพาะเจาะจงค่อนข้างน้อย ดังนั้นตัวยึดจับที่ทำหน้าที่นำธาตุอาหาร อาจจับกับโลหะหนักและนำโลหะหนักเข้าเซลล์แทนธาตุอาหาร เพราะตำแหน่งยึดจับที่ทำหน้าที่นำธาตุอาหารเหล่านั้นสามารถถูกแทนที่ได้ด้วยโลหะหนักที่เป็นพิษ เพราะทั้งโลหะหนักที่เป็นพิษและแร่ธาตุอาหารมีประจุบวกเช่นเดียวกัน

โลหะหนักชนิดที่มีพิษนั้น สามารถเป็นพิษกับเซลล์สาหร่ายได้เพราะไปทำให้การนำแร่ธาตุหรือโลหะที่เป็นสารอาหารเข้าเซลล์ถูกยับยั้ง ทำให้สาหร่ายไม่มีธาตุอาหารในการเจริญเติบโต ซึ่งขบวนการเติมหมู่เมทิลหรืออัลคิล (methylation หรือ alkylation) ของไอออนของโลหะจะเพิ่มชีวปริมาณออกฤทธิ์ (bioavailability) ของแร่ธาตุที่เป็นพิษเหล่านี้ได้ เช่น methylation หรือ alkylation ของ $Hg(II)$ จะทำให้มีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น มากกว่า inorganic $Hg(II)$ เพราะจะถูกดูดซับและนำเข้าสู่เซลล์ได้มากกว่า เพราะมีความสามารถในการละลายในไขมันได้ดีกว่า

นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะโคเวเลนต์ก็มีบทบาทที่สำคัญในการนำโลหะหนักเข้าเซลล์ด้วย เมื่ออยู่ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายมีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งพบว่าการจับโลหะหนักบนผนังเซลล์สาหร่ายเกิดขึ้นโดยการทำงานของพอลิแซ็กคาไรด์เหล่านี้ ได้มีการศึกษาการแลกเปลี่ยนหรือการจับโลหะหนักโดยพอลิแซ็กคาไรด์โดยเฉพาะเพกทินซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลที่มีประจุเป็นกลาง (neutral sugar) และน้ำตาลที่มีประจุลบ เช่น galacturonic acid โดยกลุ่มคาร์บอกซิลของเพกทินมีค่า pKa ประมาณ 2.9 ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันนี้จะให้ประจุลบภายใต้สภาวะธรรมชาติทั่วๆ ไปซึ่งมีพีเอชสูงกว่า 2.9 และเนื่องจากกลุ่มของเพกทินนี้มีประจุลบอยู่จึงทำให้สามารถจับกับประจุบวกของโลหะหนักได้จึงสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ดี

สาหร่ายที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก

เนื่องจากข้อดีของสาหร่ายทั้งที่มีมากตามธรรมชาติ เพาะเลี้ยงได้ง่าย และลักษณะองค์ประกอบของเซลล์แสดงคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักได้ดี จึงได้มีการนำสาหร่ายชนิดต่าง ๆ มาศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งคัดเลือกชนิดสาหร่ายให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะหนัก โดยตัวอย่างสาหร่ายที่ได้มีการนำมาดูดซับโลหะหนัก แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สาหร่ายที่นำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
Division Cyanophyta		
<i>Gloeocapsa gelatinosa</i>	Pb	Ruangsomboon et al., 2004a ^[570] , 2004b ^[571] , 2006b ^[573]
<i>Microcystis</i> sp.	Fe, Cu	Singh, 1998 ^[601]
	Ni, Cr	Singh et al., 2001 ^[602]
<i>M. aeruginosa</i>	Ni, Cd, Cu	Parker et al., 1998 ^[522]
	Cd, Pb, Hg	Chen et al., 2005 ^[67]
<i>Gloeotheca magna</i>	Cd, Mn	Mohamed, 2001 ^[482]
<i>Anacystis nidulans</i>	Tl (thallium)	Lustigman, 2000 ^[457]
<i>Synechocystis</i> sp.	Cr, Cu, Ni	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Phormidium</i> sp.	Pb, Cu, Au, Ni, Cd	Wang et al., 1998 ^[665]
<i>P. angustissimum</i>	Cd, Pb	Duangkokkrud, 2002 ^[110]
	Pb, Cd	สุนิรัตน์, 2547ก ^[734]
<i>P. laminosum</i>	Cu, Fe, Ni, Zn	Blanco et al., 1999 ^[48]
<i>Oscillatoria angustissima</i>	Cu	Ahuja et al., 1997 ^[9]
	Co	Ahuja et al., 1999 ^[10]
	Zn	Ahuja et al., 1999 ^[11] , 2001 ^[12]
<i>O. limnetica</i>	Cu, Cd, Pb	Tien, 2002 ^[629]
<i>Spirulina</i> sp.	Cr, Cd, Cu	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>S. platensis</i>	Au	Bedell and Darnell, 1990 ^[43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Spirulina platensis</i>	Cu, Cd	Zhou et al., 1998 ^[709]
	Hg	Lu, 2000 ^[455]
	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
	Cd	Rangsayatorn et al., 2002 ^[552]
<i>S. maxima</i>	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
<i>Calothrix parietina</i>	Cd, Pb, Hg	Inthorn et al., 2001 ^[405]
<i>C. marchica</i>	Pb	Ruangsomboon et al., 2004a ^[570] , 2006a ^[572]
<i>Nostoc</i> sp.	Cd	Fernandez, 1997 ^[124]
	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]
<i>N. paludosum</i>	Cd, Pb	Duangkokkrud, 2002 ^[110]
<i>N. spongiaeforme</i>	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]
<i>Tolypothrix tenuis</i>	Cd, Zn, Cu, Pb	Nagase et al., 2005 ^[497]
	Cd, Pb, Hg	Inthorn, 2001 ^[405]
<i>Lyngbya taylorii</i>	Cd, Pb, Ni, Zn	Klimmek and Stan, 2001 ^[426]
<i>Scytonema schmidlei</i>	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]
<i>Anabaena cylindrica</i>	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]
<i>A. spiroides</i>	Cu, Cd, Pb	Tien, 2002 ^[629]
<i>A. torulosa</i>	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Mastigocladus</i> sp.	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]
<i>M. laminosus</i>	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
<i>Stigonema</i> sp.	Cd	Inthorn et al., 2002b ^[408]

Division Rhodophyta

<i>Gelidium</i> sp.	Pb	Vilar et al., 2005 ^[653]
<i>Gracilaria</i> sp.	Pb, Cu, Cd, Zn, Ni	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>G. changii</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>G. edulis</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>G. salicornia</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>G. blodgettii</i>	Cd, Cr, Se, Zn	Wang et al., 2006 ^[667]
<i>G. corticata</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>G. canaliculata</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Polysiphonia violacea</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]

Division Chlorophyta

<i>Chlorococcum</i> sp.	Cd, Cu, Pb, Zn	Gin et al., 2002 ^[157]
<i>Chlorella</i> sp.	Cd, Zn	Fukami et al., 1988 ^[140]
	Cd	Matsunaga et al., 1999 ^[470]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Chlorella</i> sp.	Cu, Pb, Zn	Franklin et al., 2001 ^[133]
	Cr	Rehman and Shakoori, 2001 ^[559]
<i>C. miniata</i>	Ni	Wong et al., 2000 ^[681]
<i>C. pyrenoidosa</i>	Au	Bedell and Darnell, 1990 ^[43]
	Cd	Khoshmanesh et al., 1996 ^[422]
	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
<i>C. vulgaris</i>	Au	Hosea et al., 1986 ^[189]
	Au	Gee and Dudeney, 1988 ^[151]
	Pb	Golab and Smith, 1992 ^[158]
	Cd	Khoshmanesh et al., 1996 ^[422]
	Cd	Carr et al., 1998 ^[64]
	Cr, Cu, Ni	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cu, Cd	Miskelly and Scragg, 1996 ^[481]
	Cd, Zn, Cr	Travieso et al., 1999 ^[637]
	Cu, Pb, Cd, Zn	Bajguz, 2000 ^[38]
	Fe, Cr	Aksu and Acikel, 2000 ^[16]
	Mn, Cr, Ni, Zn, Cu	Lopez-Suarez et al., 2000 ^[453]
	Ni	Wong et al., 2000 ^[681]
	Hg, Cd, Pb	Inthorn et al., 2001 ^[405]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Chlorella vulgaris</i>	Ni, Cu	Mehta and Gaur, 2001 ^[474]
	Cu, Cd, Pb	Tien, 2002 ^[629]
	Pb, Cd	สุนิรัตน์, 2547 ก ^[734]
	Hg	Tajes-Martinez et al., 2006 ^[623]
<i>C. salina</i>	Cd, Pb, Ni, Zn	Klimmek and Stan, 2001 ^[426]
<i>C. sorokiniana</i>	Cd	Akhtar et al., 2003 ^[14]
	Cu	Munoz et al., 2006 ^[492]
<i>C. homosphaera</i>	Cd, Zn	Costa and Leite, 1990 ^[82]
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Pb	Golab and Smith, 1992 ^[158]
<i>C. reinhardtii</i>	Cd	Khoshmanesh et al., 1996 ^[422]
	Hg, Cd, Pb	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Hg, Cd, Pb	Bayramoglu et al., 2006 ^[42]
<i>Dunaliella salina</i>	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>D. tertiolecta</i>	Pb	Santana-Casiano et al., 1995 ^[580]
	Zn, Cd	Hirata et al., 2001 ^[185]
<i>Oocystis</i> sp.	Cd, Cu, Pb, Zn	Gin et al., 2002 ^[157]
<i>Eudorina elegans</i>	Cu, Cd, Pb	Tien, 2002 ^[629]
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Cd, Pb	สุนิรัตน์, 2547 ข ^[735]
<i>S. abundans</i>	Cd, Cu	Terry and Stone, 2002 ^[625]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Scenedesmus acutus</i>	Cd, Zn, Cr	Travieso et al., 1999 ^[637]
	Hg, Cd, Pb	Inthorn et al., 2001 ^[405]
<i>S. bijugatus</i>	Cu	Nagalakshmi and Prasad, 1998 ^[496]
<i>S. incrassatulus</i>	Cr, Cd, Cu	Pena-Castro et al., 2004a ^[529]
<i>S. obliquus</i>	Cu	Mattuschka et al., 1993 ^[471]
	Cr, Cu, Ni	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Zn	Omar, 2002 ^[509]
<i>S. quadricauda</i>	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
	Zn	Omar, 2002 ^[509]
<i>S. subspicatus</i>	Al, Zn, Hg, Pb, Cu,	Schmitt et al., 2001 ^[588]
	Cd	
<i>Spirogyra</i> sp.	Cr	Gupta et al., 2001 ^[168]
	Cu	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Oedogonium foveolatum</i>	Al, Hg, Zn, Cd, Cr	Radway et al., 2001 ^[547]
<i>Ulothrix zonata</i>	Cu	Nuhoglu et al., 2002 ^[505]
<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	Cr, Cd, Pb, Cu	Rai and Chandra, 1992 ^[549]
<i>Chaetophora elegans</i>	Cd, Pb, Zn, Ni	Andrade et al., 2005 ^[25]
<i>Ulva</i> sp.	Pb, Cu, Cd, Zn, Ni	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>U. lactuca</i>	Cd, Cr, Se, Zn	Wang et al., (2006) ^[667]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Ulva lactuca</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>U. reticulata</i>	Cu, Co, Ni	Vijayaraghavan et al., 2005 ^[652]
<i>Chaetomorpha linum</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>Cladophora glomerata</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>C. fascicularis</i>	Pb	Deng et al., 2006 ^[99]
<i>C. crispate</i>	Pb, Cr	Ozer et al., 1994 ^[516]
<i>Caulerpa taxifolia</i>	Zn, Ag, Cd, Cs	Warnau et al., 1996 ^[669]
<i>C. lentillifera</i>	Cu, Cd, Pb, Zn	Pavasant et al., 2006 ^[525]
	Cu, Cd, Pb	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
<i>Schizomeris leibleinii</i>	Fe, Pb, Cd	Ozer et al., 1999 ^[515]
Division Prasinophyta		
<i>Tetraselmis</i> sp.	Cu, Pb, Zn	Franklin et al., 2001 ^[133]
<i>T. chui</i>	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>T. suecica</i>	Cd	Nassiri et al., 1997 ^[499]
	Cd	Perez-Rama et al., 2002 ^[533]
<i>Platymonas cordifolia</i>	Cu, Cd	Zhou et al., 1998 ^[709]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
Division Euglenophyta		
<i>Euglena gracilis</i>	Zn	Fukami et al., 1988 ^[140]
	Cd, Pb, Hg	Devars et al., 1998 ^[102]
Division Phaeophyta		
<i>Padina</i> sp.	Cu	Kaewsarn, 2002 ^[417]
	Pb, Cu, Cd, Zn, Ni	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>P. tetrastomatica</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>P. pavonia</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Laminaria hyperborea</i>	Pb	Malik et al., 2002 ^[459]
<i>L. japonica</i>	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cr, Pb, Cu, Cd	Lee et al., 2004 ^[440]
	Zn, Al	
<i>L. hyperborea</i>	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>Macrocystis pyrifera</i>	Cd, Pb	Seki and Suzuki, 1998 ^[592]
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Zn, Cu, Ni	Bakkaloglu et al., 1998 ^[39]
	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	Chu, 2004 ^[74]
<i>Fucus</i> sp.	Cd	Herrero et al., 2006 ^[179]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Fucus vesiculosus</i>	Zn, Cu, Ni	Bakkaloglu et al., 1998 ^[39]
<i>Sargassum</i> sp.	Cd	Leusch and Volesky, 1995 ^[446]
	Zn, Cd, Mn	Costa et al., 1996 ^[83]
	Cu, Zn	Valdman et al., 2001 ^[646]
	Pb, Cu, Cd, Zn, Ni	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd	Cruz et al., 2004 ^[88]
<i>S. baccularia</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>S. siliquosum</i>	Cd	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>S. hystrix</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>S. natans</i>	Pb	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>S. polycystum</i>	Cd	Srikrajib et al., 1999 ^[610]
<i>Cystoseira baccata</i>	Hg	Herrero et al., 2005 ^[180]
<i>Durvillaea potatorum</i>	Pb, Cu	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	Matheickal et al., 1999 ^[469]
	Pb	Malik et al., 2002 ^[459]
<i>Ecklonia radiata</i>	Pb, Cd, Cu	Matheickal and Yu, 1996 ^[467]
	Pb, Cu	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Ecklonia maxima</i>	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu, Pb, Cd	Feng and Aldrich, 2004 ^[123]
<i>Lessonia flavicans</i>	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>L. nigresense</i>	Cd, Cu, Pb	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>Kjellmaniella crassifolia</i>	Cd, Pb	Seki and Suzuki, 1998 ^[592]
<i>Undaria pinnatifida</i>	Cd, Pb	Seki and Suzuki, 1998 ^[592]
	Ni, Cu	Chen et al., 2005 ^[67]
Division Bacillariophyta		
<i>Cyclotella cryptica</i>	Al, Zn, Hg, Pb, Cu, Cd	Schmitt et al., 2001 ^[588]
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	Cd, Se, Zn	Wang and Dei, 2001 ^[666]
	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Cu, Cd	Zhou et al., 1998 ^[709]
	Cd	Bertrand et al., 2001 ^[46]
	Al, Zn, Hg, Pb, Cu, Cd	Schmitt et al., 2001 ^[588]
	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>Haslea ostrearia</i>	Cu	Joux-Arab et al., 2000 ^[415]

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เอกสารอ้างอิง
<i>Skeletonema costatum</i>	Cd, Cu	Nassiri et al., 1997 ^[500]
	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>Chaetoceros minutissimus</i>	Cu, Cd	Zhou et al., 1998 ^[709]
<i>C. gracilis</i>	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
Division Dinophyta		
<i>Heterocapsa</i> sp.	Cd, Cu	Moreno-Garrido et al., 2005 ^[487]
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Cu, Cd	Zhou et al., 1998 ^[709]

จากตารางแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายในหลายกลุ่มทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้รับความสนใจในการนำมาดูดซับโลหะหนัก ทั้งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สาหร่ายสีแดง สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีน้ำตาล รวมทั้งในกลุ่มยูกลีโนยด์ ไดอะตอม และไดโนแฟลเจลเลต

การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายที่มีชีวิต

การใช้สาหร่ายในการกำจัดโลหะหนักโดยการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย สามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของสาหร่ายที่ไม่มีชีวิตและสาหร่ายที่มีชีวิต โดยทั้งสองแบบจะมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป

1. ข้อดีและข้อเสียของสาหร่ายที่ไม่มีชีวิต^[458]

1.1. สาหร่ายที่ไม่มีชีวิตหรือเซลล์ตายแล้ว (non-living/ dead cell) มีข้อดีคือ

- คือสาหร่ายแห้งเหล่านี้มีการจัดการที่ง่าย สามารถเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังจากทำการล้างโลหะหนักออกไปโดยใช้ตัวล้างโลหะหนักที่เหมาะสม โดยผนังเซลล์ไม่ถูกทำลายเมื่อมีการล้างโลหะหนักออกมา
- ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการทิ้งโลหะหนักที่เกาะบนตัวดูดซับหรือตัวสาหร่าย โดยสามารถทิ้งในพื้นที่ฝังกลบได้
- ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายจะไม่ถูกจำกัดด้วยความเป็นพิษของโลหะหนักเนื่องจากสาหร่ายตายแล้ว
- ไม่มีข้อจำกัดทางสรีรวิทยาในขบวนการดูดซับ
- ไม่มีความต้องการสารหรือธาตุอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโต
- ชีวมวลหรือ biomass ของสาหร่ายสามารถนำไปปรับสภาพก่อนนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักซึ่งการปรับสภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยพบรายงานว่าสาหร่ายที่ปรับสภาพด้วยความร้อนสามารถรวบรวมไอออนของโลหะหนักได้เท่ากับหรือได้มากกว่าสาหร่ายที่มีชีวิต แสดงว่าได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์สาหร่ายหลังจากที่เซลล์ถูกทำให้ตายด้วยความร้อน ส่วนใหญ่การปรับสภาพมีผลด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ
- สาหร่ายที่ตายแล้วสามารถดูดซับโลหะหนักได้รวดเร็ว ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงได้เทียบเท่ากับแผ่นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin)

1.2. ข้อเสียของการใช้สาหร่ายที่ไม่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนักคือ

- การถึงจุดสมดุลจะเกิดอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องนำตัวดูดซับเหล่านี้มาล้างโลหะหนักออกก่อน เพื่อนำกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่
- มีข้อจำกัดเรื่องศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไอออน ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้อย หรือมีศักยภาพในการทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้น้อย
- สาหร่ายที่ตายแล้วไม่สามารถที่จะลดสารอินทรีย์ หรือสารโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มศักยภาพการดูดซับจะลดลงหรือถูกจำกัด

เนื่องจากเซลล์สาหร่ายไม่มีขบวนการเมแทบอลิซึมอีก เนื่องจากเซลล์ตาย และไม่สามารถสร้างตัวดูดซับใหม่ ๆ ขึ้นมาได้

2. ข้อดีและข้อเสียของการใช้สาหร่ายที่มีชีวิต

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนักหรือกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย คือต้องการทำให้ระบบกำจัดน้ำเสียโดยใช้เซลล์ที่มีชีวิตมีความเป็นไปได้ในการใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม เพราะโดยปกติน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปไม่ได้มีแค่โลหะหนักในน้ำเสียเพียงอย่างเดียว ยังมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์อื่น ๆ ด้วย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถเป็นธาตุอาหารในการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ โดยสาหร่ายที่มีชีวิตโดยทั่วไปมีความสามารถในการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในอาหารพื้นฐาน หรือสารอาหารง่าย ๆ เพียงมีสารอาหารเล็กน้อย และใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน จึงเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้สาหร่ายทำหน้าที่บำบัดแบบระบบที่มีชีวิต (living system) ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย

2.1. ข้อดีของสาหร่ายที่มีชีวิตข้ออื่น ๆ คือ

- สาหร่ายที่มีชีวิตแต่ละเซลล์จะถึงจุดอิ่มตัวในการดูดซับโลหะหนักได้ แต่ทั้งระบบจะไม่ถึงจุดอิ่มตัวเพราะสาหร่ายมีการเจริญเติบโตจึงสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมาดูดซับได้ตลอด
- สาหร่ายที่มีชีวิตสามารถปรับตัวให้มีความทนทานต่อพิษของโลหะหนักได้ โดยสามารถเพิ่มความทนทานหรือการปรับตัวโดยทำการเลี้ยงในโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่ำ และค่อย ๆ ย้ายไปสู่โลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามลำดับทำให้สามารถพัฒนาให้สาหร่ายทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้สูงขึ้นโดยสาหร่ายไม่ตาย
- กิจกรรมต่าง ๆ ภายในเซลล์สาหร่ายยังคงมีประโยชน์ โดยสามารถเปลี่ยนสภาพหรือรูปของโลหะหนักหรือสามารถลดพิษของโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (organo metallic compound)
- ผลผลิตจากขบวนการเมแทบอลิซึม (metabolic product) หรือสารที่สร้างโดยเซลล์สาหร่ายจากขบวนการเจริญเติบโต สามารถไปจับกับโลหะหนักแล้วทำให้โลหะหนักเหล่านั้นตกตะกอนจึงช่วยลดความเป็นพิษและลดปริมาณโลหะหนักที่ละลายในน้ำได้
- การใช้สาหร่ายในบางครั้งอาจใช้มากกว่า 1 ชนิดร่วมกันเพื่อให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น หรืออาจใช้สาหร่ายร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เพื่อให้สามารถทำงานเสริมกัน เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีกว่าการใช้สาหร่ายชนิดเดียว

2.2. ข้อเสียของการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนัก

- ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูงมากเกินไปย่อมเป็นพิษต่อสาหร่าย
- สาหร่ายต้องการธาตุอาหารในการเจริญเติบโต
- โลหะหนักที่มีการสะสมภายในเซลล์ของสาหร่ายที่มีชีวิตจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ก็ต่อเมื่อเซลล์สาหร่ายถูกทำลายเท่านั้น
- แม้ผลผลิตจากขบวนการเมแทบอลิซึม หรือสารที่สร้างโดยสาหร่ายจากขบวนการเจริญเติบโตนั้นไปช่วยจับกับโลหะหนักแล้วทำให้โลหะหนักเหล่านั้นตกตะกอน แต่มีข้อเสียคือโลหะหนักนั้นยังคงค้างอยู่ในแหล่งน้ำ หากมีการกำจัดสาหร่ายออกจากระบบบำบัดนั้น ก็ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกไปได้หมด เพราะโลหะหนักตกตะกอนอยู่
- เป็นการยากที่จะทำนายการดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายที่มีชีวิต หรือยากที่จะคาดการณ์ปริมาณโลหะหนักที่จะถูกดูดซับออกไปจากระบบของสาหร่ายที่มีชีวิต จึงคาดการณ์ปริมาณโลหะหนักที่คงเหลือ หรือระยะเวลาการบำบัดก่อนการปล่อยน้ำออกจากบ่อบำบัดได้ยาก

ซึ่งเห็นได้ชัดว่าข้อดีของการใช้เซลล์ที่มีชีวิตคือสาหร่ายสามารถสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมาได้ เซลล์ใหม่จะทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักต่อไป นอกจากนี้เซลล์ที่มีชีวิตยังใช้พลังงานในการนำโลหะหนักเข้าไปสู่ในเซลล์ได้ ซึ่งทำให้กำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเซลล์ตาย และอาจมีการหลั่งสารบางอย่างออกจากเซลล์ ซึ่งสามารถช่วยกำจัดโลหะหนักได้ด้วย^[117] การใช้ในรูปเซลล์ที่มีชีวิตจะนิยมใช้ในสาหร่ายขนาดเล็ก เพราะใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อย และจัดระบบการเพาะเลี้ยงได้ง่าย

สำหรับการใช้สาหร่ายตายจะไม่มีปัญหาเรื่องความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่าย โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้กันมาก เพราะสะดวกในการดูแล เก็บรักษาสาหร่าย และยิ่งหากเป็นสาหร่ายทะเลขนาดใหญ่แล้วยังนิยมใช้เซลล์ตาย เนื่องจากสามารถเก็บมาจากธรรมชาติและมาทำให้แห้งไว้เป็นปริมาณมาก และเก็บไว้ใช้ได้ตลอดเวลาที่ต้องการ ไม่ต้องเสียค่าดูแลรักษาหรือเพาะเลี้ยง

กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิต

การดูดซับชีวภาพ (biosorption) เกี่ยวข้องกับขบวนการสองขั้นตอนคือ

1. ขบวนการที่ไม่ใช้พลังงาน (passive/ physical adsorption/ adsorption)
2. ขบวนการที่ใช้พลังงาน (active/ absorption)

โดย biosorption จะเริ่มด้วยขบวนการขนส่งแบบ passive หรือ adsorption หรือการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแพร่ของไอออนของโลหะหนักไปยังผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เมื่อโลหะหนักแพร่มาถึงผนังเซลล์สิ่งมีชีวิต โลหะหนักจะจับกับตำแหน่งยึดจับ (binding site) ที่อยู่บนผนังเซลล์ ซึ่งตำแหน่งยึดจับบนผนังเซลล์จะมีความชอบต่อโลหะหนักที่ต่างชนิดกันไป ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะเกี่ยวข้องกับการ passive และอาจจะเกี่ยวข้องกับการ adsorption, ion exchange, coordination, complexation, chelation, microprecipitation และอาจเกี่ยวข้องกับการอื่น ๆ อีก โดยทั่วไปแล้วการเกิดการดูดซับของโลหะหนักที่ผิวเซลล์มักเกิดอย่างรวดเร็วโดยอาจเกิดขึ้นและถึงจุดสมดุลภายในช่วงเวลา 5-10 นาที ขบวนการนี้ไม่ขึ้นกับกลไกการทำงานของเซลล์สิ่งมีชีวิต สามารถผันกลับได้ และขบวนการนี้แม้เซลล์ถูกทำลายหรือทำให้ผนังเซลล์แตกก็ยังไม่ขัดขวางการทำงานของขบวนการนี้

ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสาหร่ายหรือต่อหน่วยของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย คือถ้าสารละลายเข้มข้นมากโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนสาหร่ายก็จะมีมาก โดยปกติแล้วขบวนการ adsorption จะได้รับผลกระทบจากค่าพีเอชของสารละลาย และการที่มีโลหะหนักอื่น ๆ หรือไอออนของแร่ธาตุอื่น ๆ อยู่ในสารละลายซึ่งไอออนต่าง ๆ เหล่านี้อาจทำให้โลหะหนักตกตะกอนเป็นรูปเกลือที่ไม่ละลาย ทำให้โลหะหนักไม่สามารถจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผนังเซลล์ได้ และพบว่าการมีแสงหรือไม่มีแสงจะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ในขบวนการ adsorption นี้

หลังจากเสร็จสิ้นขบวนการ adsorption มักตามด้วยขบวนการ active uptake หรือ absorption หรืออาจเรียกว่า bioaccumulation คือการที่โลหะหนักเคลื่อนที่เข้าไปภายในเซลล์อย่างช้า ๆ ขบวนการนี้มักไม่ผันกลับและขึ้นกับกลไกการทำงานของเซลล์ กิจกรรมของเซลล์หรือเมแทบอลิซึมของเซลล์ รวมทั้งขึ้นกับพันธะโคเวเลนต์ ขึ้นกับการตกตะกอนที่ผิวเซลล์ (surface precipitation) การเกิด redox reaction, crystallization บนผนังเซลล์ และขึ้นกับการแพร่ผ่านเข้าไปภายในเซลล์

ไอออนของโลหะหนักจะถูกขนส่งข้ามผนังเซลล์เข้าไปในไซโทพลาซึม และจับอยู่กับโปรตีนหรือตำแหน่งยึดจับภายในเซลล์อื่น ๆ ที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก การขนส่งโลหะหนักเข้าไปภายในเซลล์ อาจเกี่ยวข้องกับการบริโภคไอออนของแร่ธาตุอื่น ๆ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของสาหร่าย และอาจเกี่ยวข้องกับการสะสมโลหะหนักไว้ภายในเซลล์ คือโลหะหนักอาจตกตะกอนด้วยสารที่ถูกหลั่งออกมาจากเซลล์ซึ่งเป็นสารประกอบทุติยภูมิ (secondary metabolites) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

metabolite) ของสาหร่ายก็ได้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะขึ้นกับการทำงานภายในเซลล์ ขึ้นกับการใช้พลังงาน^[70, 664] และจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น พีเอช อุณหภูมิ แสง ขบวนการนำโลหะหนักเข้าภายในเซลล์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าขบวนการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ในกรณีที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักมีปริมาณน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งขบวนการนำเข้าไปภายในเซลล์นี้จะเกิดในเซลล์ที่มีชีวิตเท่านั้น

โดยปกติแล้วทั้งขบวนการ adsorption และ absorption สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ภายในเซลล์สาหร่าย แต่ส่วนใหญ่แล้วหากเป็นการสัมผัสโลหะหนักในระยะเวลาที่สั้น ๆ โลหะหนักจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์มากกว่าถูกนำเข้าไปในเซลล์ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่ไม่เป็นที่ต้องการของเซลล์สาหร่ายในการนำเข้าไปในเซลล์และมีผลเสียต่อการเจริญเติบโต แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่าโลหะหนักยังคงเข้าไปภายในเซลล์ของสาหร่ายได้โดยโลหะหนักมักจะไปแทนที่สารอาหารที่จำเป็นโดยไปจับกับตัวพา หรือตำแหน่งยึดจับที่ทำหน้าที่จับสารอาหารและพาเข้าไปภายในเซลล์แทนสารอาหารเหล่านั้น โดยตำแหน่งยึดจับที่โลหะหนักมาจับและเข้าเซลล์อาจเป็นพวกริโบโซม และเนื่องจากตัวที่ทำหน้าที่พาสารอาหารเข้าเซลล์ไม่ได้มีความจำเพาะเจาะจงกับสารอาหารเพียงอย่างเดียว ดังนั้นโลหะหนักจึงไปแย่งจับกับตัวพาเหล่านั้น ทำให้สารอาหารไม่ถูกพาเข้าเซลล์แต่โลหะหนักถูกพาเข้าไปแทน

1. ข้อดีของการใช้สาหร่ายที่มีชีวิต (living/ growing cell) ในการดูดซับโลหะหนัก

การดูดซับหรือการกำจัดโลหะหนักแบบระบบที่มีชีวิต (living system) คือการใช้สาหร่ายที่ยังคงมีชีวิตอยู่ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นสาหร่ายที่ยังคงมีขบวนการการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ อยู่อย่างปกติ-โดยใช้ในรูปแบบของ growing cell คือให้เซลล์สาหร่ายนั้นเจริญเติบโตอยู่ในระบบบำบัด และนิยมใช้บำบัดในขั้นตอนที่สาม หรือ tertiary treatment คือในขั้นตอนสุดท้ายที่มีโลหะหนักเข้มข้นไม่สูง ส่วนใหญ่คือไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่อยู่ในน้ำที่มีปริมาณมาก ซึ่งสาหร่ายที่มีชีวิตมีการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสาหร่ายไม่มีชีวิต นั่นคือมีขั้นตอนการนำโลหะหนักเข้าภายในเซลล์ โดยพบรายงานว่าการเลี้ยงสาหร่ายในสารละลายแคดเมียม พบว่าปริมาณแคดเมียมในเซลล์สาหร่ายมีมากกว่าที่ถูกดูดซับภายนอกเซลล์สาหร่าย^[470, 533]

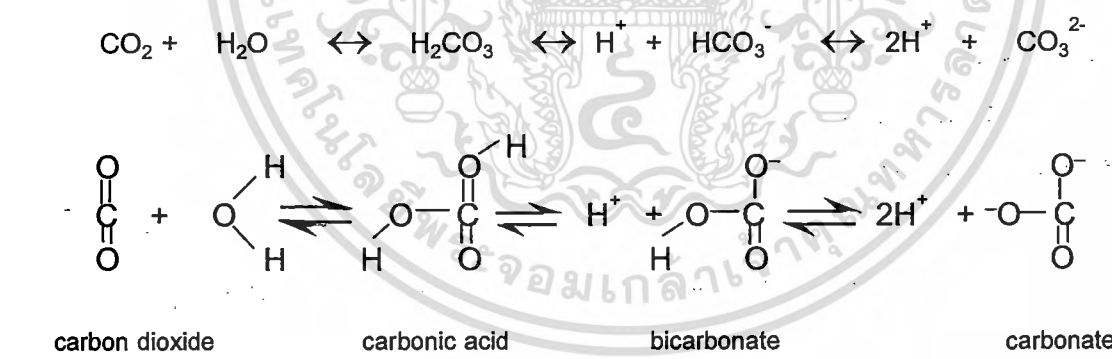
หากเป็นการใช้สาหร่ายที่ไม่มีชีวิตหรือเซลล์ตาย (dead/ pretreated biomass) ซึ่งอาจเป็นรูปสาหร่ายแห้งหรือผ่านขบวนการดัดแปลงบางอย่างก่อนนำมาใช้ โลหะหนักจะไม่ถูกนำเข้าไปในเซลล์สาหร่าย จะถูกจับไว้ที่ผิวเซลล์เท่านั้น^[633] ถึงแม้ว่าจะมีหลายรายงานที่กล่าวว่า การใช้เซลล์ตายของสาหร่ายจะมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้สูง แต่การศึกษาเหล่านี้ทำในน้ำเสียสังเคราะห์^[474] แต่เมื่อนำไปใช้ในน้ำเสียจริงที่ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กลับ

พบว่าสาหร่ายนี้มีประสิทธิภาพต่ำลงมาก ซึ่งเป็นเพราะในน้ำเสียจริงจะมีแร่ธาตุอื่น ๆ ปนเปื้อนอยู่ด้วย^[458] ดังนั้นการใช้เซลล์สาหร่ายที่ตาย มีข้อจำกัดคือต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ค่อนข้างจำกัดให้คงที่ เช่นระดับพีเอช การไม่มีไอออนอื่นปนเปื้อนในน้ำ ถึงแม้สาหร่ายที่ตายจะมีข้อดีคือสามารถใช้สารเคมีล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายและนำสาหร่ายกลับมาใช้กำจัดโลหะหนักใหม่ได้ แต่ก็ใช้ได้เพียง 5-10 ครั้ง เท่านั้น จึงยากที่จะทำระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง^[458]

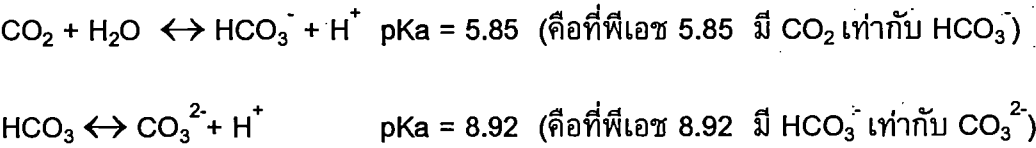
ซึ่งขบวนการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายที่ตายเพียงอย่างเดียวยังไม่มีประสิทธิภาพดีพอในการบำบัด การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตมีข้อดีกว่าเนื่องจากในระบบบำบัดสามารถทำให้เกิดเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตขึ้นมาใหม่ได้ และหลังจากเสร็จสิ้นการดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์ ยังมีการดูดซับเข้าภายในเซลล์อย่างต่อเนื่อง และบางครั้งยังมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของผนังเซลล์ให้ดูดซับโลหะหนักได้มากยิ่งขึ้นด้วย^[146, 578, 677]

นอกจากนี้ยังพบว่าขณะที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระบบบำบัดน้ำเสียนั้น สาหร่ายจะมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้โลหะหนักหลายชนิดตกตะกอน ซึ่งช่วยลดปริมาณโลหะหนักที่เป็นพิษที่ละลายในน้ำได้ด้วยเช่นกัน^[424, 436]

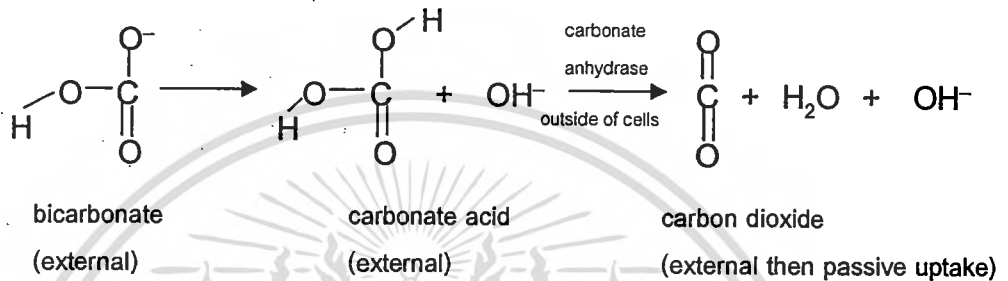
ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียอธิบายได้โดย เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์รวมกับน้ำจะได้กรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) และคาร์บอเนต (CO₃²⁻) ดังสมการ



โดยมีค่า pKa ของสมการคือ



ซึ่งสาหร่ายสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปใช้ได้โดยตรง หรือสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อย OH^- ออกมา ซึ่งทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูงขึ้นและเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักในน้ำเสีย โดยมีลักษณะการดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากไบคาร์บอเนตคือ^[249]



นอกจากนี้ในระหว่างที่สาหร่ายเจริญเติบโตในน้ำเสีย สาหร่ายยังมีการปล่อยสารพอลิแซ็กคาไรด์ออกนอกเซลล์ ซึ่งมีพอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ พอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถช่วยจับโลหะหนักทำให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรือทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้

การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตยังสามารถลดขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงก่อนเก็บเกี่ยวมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เพราะสามารถเลี้ยงสาหร่ายที่มีชีวิตให้เจริญเติบโตในระบบบำบัดได้เลย โดยไม่ต้องมีระบบเพาะเลี้ยง ไม่ต้องเก็บเกี่ยวสาหร่ายจากบ่อเพาะเลี้ยงเพื่อนำมาใส่ในระบบบำบัด ไม่จำเป็นต้องนำสาหร่ายไปอบแห้งก่อนนำมาใช้ ไม่จำเป็นต้องผ่านขบวนการในการบรรจุเก็บรักษาสาหร่ายก่อนนำมาใช้ นอกจากนี้สาหร่ายที่มีชีวิตยังมีข้อดีเหนือวิธีบำบัดเก่า ๆ ที่เป็นแบบเคมีกายภาพ เพราะสาหร่ายที่มีชีวิตยังสามารถพัฒนาให้สามารถกำจัดโลหะหนักและของเสียอื่น ๆ ที่ปรากฏอยู่ในน้ำเสียได้ภายในขั้นตอนเดียว เนื่องจากเซลล์สาหร่ายที่กำลังเติบโตมีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ลดสารประกอบอินทรีย์ได้ และสามารถนำสารอนินทรีย์ไอออน เช่นแอมโมเนีย ไนเตรท ฟอสเฟต เข้าเซลล์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้โลหะหรือแร่ธาตุสารอาหารต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ หรือกระจายเป็นตะกอนเล็ก ๆ อยู่ในน้ำ ยังสามารถถูกกำจัดโดยการถูกยึดไว้ด้วยเซลล์สาหร่ายได้^[458, 657]

การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตในระบบบำบัดน้ำเสียได้ด้วยการเติมแร่ธาตุสารอาหารเพียงเล็กน้อย และใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน^[681] ซึ่งจุดนี้จึงทำให้มีประโยชน์ในการนำระบบนี้ไปใช้จริงเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ยิ่งไปกว่านั้นโดยทั่วไปน้ำเสียส่วนใหญ่ก็มีสารอินทรีย์ อนินทรีย์ หรือแร่ธาตุอื่น ๆ ปนเปื้อนมาด้วย ซึ่งยิ่งทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตและกำจัดโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น เพราะใช้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ในระบบ living system จะมีการเจริญเติบโต สร้างเซลล์สาหร่ายใหม่ขึ้นตลอด ซึ่งทำให้ระบบมีตัวบำบัดใหม่อยู่ตลอดเช่นกัน จึงทำให้บำบัดน้ำเสียได้ต่อเนื่องตลอดเวลา นอกจากนี้สาหร่ายเหล่านี้สามารถทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเป็นเวลานาน^[677] และหากน้ำเสียที่ต้องการบำบัดไม่มีสารอาหารสำหรับสาหร่ายก็สามารถเติมสารอาหารบางส่วนลงไปเพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้

และยังพบว่าสาหร่ายมีกลไกในการป้องกันตัวเมื่อระดับโลหะหนักที่เข้าเซลล์เริ่มเป็นพิษกับเซลล์ โดยใช้สารประกอบภายในเซลล์จับกับโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งพบว่าสาหร่ายหลายชนิดสามารถสร้าง phytochelatin เพื่อลดพิษของโลหะหนักได้ หรืออาจทำให้โลหะหนักตกตะกอนภายในเซลล์ โดยสาหร่ายบางชนิดเมื่อตกตะกอนโลหะหนักแล้วก็สามารถส่งตะกอนออกมาเก็บไว้ที่เมือกหุ้มเซลล์ได้ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของผนังเซลล์สาหร่ายนั้น ๆ ด้วย^[657] หรือสาหร่ายอาจจับโลหะหนักไว้กับโปรตีนในเซลล์และส่งไปไว้ที่แวคิวโอล (vacuole) ภายในเซลล์ หรือทิ้งไว้ในเซลล์ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ขบวนการเหล่านี้ไม่มีการผันกลับ^[154] แต่กลไกนี้จะทำงานได้ต่อเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงเกินความสามารถในการกำจัดของเซลล์

สาหร่ายที่มีชีวิตมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ หรือลักษณะผนังเซลล์ของสาหร่าย โดยพบว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายกับเซลล์แต่ไม่ทำให้สาหร่ายตาย (sub lethal) จะทำให้สาหร่ายเพิ่มปริมาณความหนาของเมือกที่คลุมเซลล์และเยื่อหุ้มไซโทพลาซึม ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนองค์ประกอบไปด้วย เช่นการสร้างกรดขึ้นมาที่ผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงเช่นสาร antibiotic จะทำให้มีการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลที่เป็นอิสระ และกลุ่มเอมีน และยังมีปัจจัยเรื่องสภาวะของการเลี้ยง เช่นการจำกัดปริมาณฟอสเฟต การจำกัดสารอาหาร การเปลี่ยนค่าพีเอช การได้รับรังสี การได้รับยาฆ่าเชื้อรา หรือปัจจัยเรื่องแสง อุณหภูมิ แหล่งสารอาหาร เป็นต้น^[657] ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับสภาวะในการเลี้ยงจะส่งผลถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของเซลล์สาหร่ายได้เช่นกัน

2. ข้อจำกัดในการใช้เซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตดูดซับโลหะหนัก

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายที่เป็นแบบ living system คือในระบบบำบัดต้องมีเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตและสามารถทำให้สาหร่ายเจริญเติบโต (growing cell) อยู่ในบ่อบำบัด และปล่อยให้น้ำเสียไหลผ่านบ่อบำบัดที่มีสาหร่ายอยู่ โดยสาหร่ายจะทำหน้าที่ในการลดปริมาณโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสีย

แต่การใช้ระบบ living system หรือใช้ growing cell ในการดูดซับโลหะหนักมีข้อจำกัดคือ หากความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสียมีมากเกินไปจะเป็นพิษกับเซลล์ทำให้สาหร่ายตายได้ นอกจากนี้สาหร่ายยังต้องการธาตุอาหารในการเจริญเติบโตหากน้ำเสียไม่มีธาตุอาหารอยู่เลย สาหร่ายก็ตายได้ และยากที่จะทำนายปริมาณการกำจัดโลหะหนักที่แน่นอนได้เพราะไม่ทราบข้อมูลการเจริญเติบโต หรือการเพิ่มเซลล์ใหม่ของสาหร่ายที่แน่นอน เพราะข้อมูลเหล่านี้ผันแปรตามสภาวะแวดล้อมของระบบบำบัด ปริมาณสารอาหารในระบบบำบัด รวมทั้งปริมาณโลหะหนักในระบบบำบัดด้วย^[68]

นอกจากนี้การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักยังมีข้อจำกัดคือเรื่องพีเอช เพราะโลหะหนักหลายชนิดแตกตัวอยู่ในรูปไอออนอิสระซึ่งเป็นรูปที่สาหร่ายสามารถกำจัดได้ ที่ระดับพีเอชต่ำ ซึ่งพีเอชระดับนี้มักเป็นอันตรายต่อเซลล์ของสาหร่าย

ซึ่งแม้มีเกณฑ์ข้อจำกัดดังกล่าว ก็ยังพบว่าสาหร่ายยังคงเป็นตัวเลือกที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้ดี เพราะพบมีรายงานว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดเช่น *Gloeocapsa gelatinosa* สามารถเจริญเติบโตได้ในอาหารที่มีพีเอชเท่ากับ 4^[56] และมีรายงานว่าสาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlorella* มีกลไกในการทนต่อสารละลายที่เป็นกรดได้ โดยมีกลไกการปรับ pH ในเซลล์ของสาหร่ายมีสถานะเป็นกรด^[120] โดยกลไกต่าง ๆ เช่นการลดปริมาณ H^+ ภายในเซลล์ และลดการนำเข้าประจุบวกเป็นต้น

ดังนั้นข้อจำกัดโดยรวมของการนำสาหร่ายที่มีชีวิตไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักนอกห้องปฏิบัติการ คือเซลล์สาหร่ายไม่สามารถทนต่อพีเอชต่ำ ไม่สามารถทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูง หรือต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มได้น้อย และสาหร่ายยังต้องการพลังงานจากภายนอกเช่นพลังงานแสง และสารอาหาร^[109]

แต่อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้สาหร่ายบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่กับของเสียประเภทสารอินทรีย์ (organic waste) จะได้ผลดี เพราะมีสารอินทรีย์ช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโต นอกจากนี้ต้องทำการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายที่ทนต่อความเป็นกรด ทนต่อพิษของโลหะหนักได้สูงและเลือกสายพันธุ์ที่สามารถใช้สารอินทรีย์จากของเสียเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต การเลือกสาหร่ายสายพันธุ์ที่ทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้สูงเป็นเกณฑ์ที่สำคัญมากที่จะทำให้ระบบบำบัดโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายที่มีชีวิตสามารถปฏิบัติได้จริง

ซึ่งเป็นธรรมชาติที่สาหร่ายที่ทนต่อโลหะหนักได้สูงนั้นจะสามารถจับกับโลหะหนักได้มากกว่าสาหร่ายปกติทั่วไป แต่คุณสมบัติบางประการอาจลดลงเพราะเซลล์สาหร่ายจำเป็นต้องมีกระบวนการในการลดพิษของโลหะหนักในเซลล์ ซึ่งคุณสมบัติอื่น ๆ ที่อาจหายไปได้แก่กิจกรรมของเซลล์ในการทำให้โลหะหนักตกตะกอน การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ และการพัฒนาผิวเซลล์ให้จับโลหะหนักได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ควรมีในเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตที่จะนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

ดังนั้นแทนที่จะใช้สาหร่ายเพียงชนิดเดียวในการกำจัดโลหะหนัก ควรจะมีการออกแบบระบบให้มีสาหร่ายหลาย ๆ ชนิดอยู่ร่วมกันได้ โดยให้มีสาหร่ายที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้สูง สามารถสะสมโลหะหนักในเซลล์ได้มาก และสามารถทำให้โลหะหนักตกตะกอนด้วยวิธีการทางชีวภาพ (bioprecipitation) ได้^[542]

การใช้สาหร่ายหลายชนิดร่วมกันจะทำให้มีข้อดีโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีค่าของพีเอชต่ำ หรือค่าของโลหะหนักเข้มข้นสูง สาหร่ายที่สามารถปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์ได้มาก^[399] จะทำให้เซลล์สาหร่ายต่าง ๆ สามารถเกาะรวมตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ (biofilms) ซึ่งทำให้สามารถจับได้ทั้งไอออนของโลหะที่ละลายน้ำและจับกับโลหะที่จับตัวเป็นก้อนเล็ก ๆ และกระจายอยู่ในน้ำ นอกจากนี้สาหร่ายเหล่านี้ยังมีผลต่อสิ่งแวดล้อมเช่นผลต่อค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งล้วนส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักได้ นอกจากนี้การที่มีสาหร่ายหลายชนิดอยู่ร่วมกันยังสามารถช่วยทำให้สาหร่ายชนิดที่มีความทนทานต่อโลหะหนักได้ต่ำนั้นสามารถมีชีวิตรอดอยู่รอดได้^[56] แต่อย่างไรก็ตาม ในการนำสาหร่ายที่มีชีวิตไปใช้กำจัดโลหะหนักที่มีพิษสูงนั้นจำเป็นต้องแน่ใจว่าเซลล์สาหร่ายสามารถคงความสามารถในการเจริญเติบโตและกำจัดโลหะหนักได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นคงที่^[458]

3. การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

การนำสาหร่ายที่มีชีวิตมาบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมมีรายงานไว้ไม่มากนัก เช่น การทดลองนำสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Nostoc linckia* และ *Nostoc rivularis* มาบำบัดน้ำเสียซึ่งนำมาจากบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแอมโมเนียและสังกะสีปนเปื้อน โดยนำน้ำเสียมาเจือจางลง พบว่าน้ำเสียที่เจือจางลงที่ระดับ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ นั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยมีจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ และปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่วัฏจักร หรือระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตสั้นลง โดยสาหร่าย *N. linckia* จะสะสมสังกะสีไว้ในเซลล์ได้สูงกว่าในน้ำภายนอกถึง 30 เท่า และสะสมแอมโมเนียไว้ในเซลล์ได้สูงกว่าในน้ำภายนอกถึง 10 เท่า^[115]

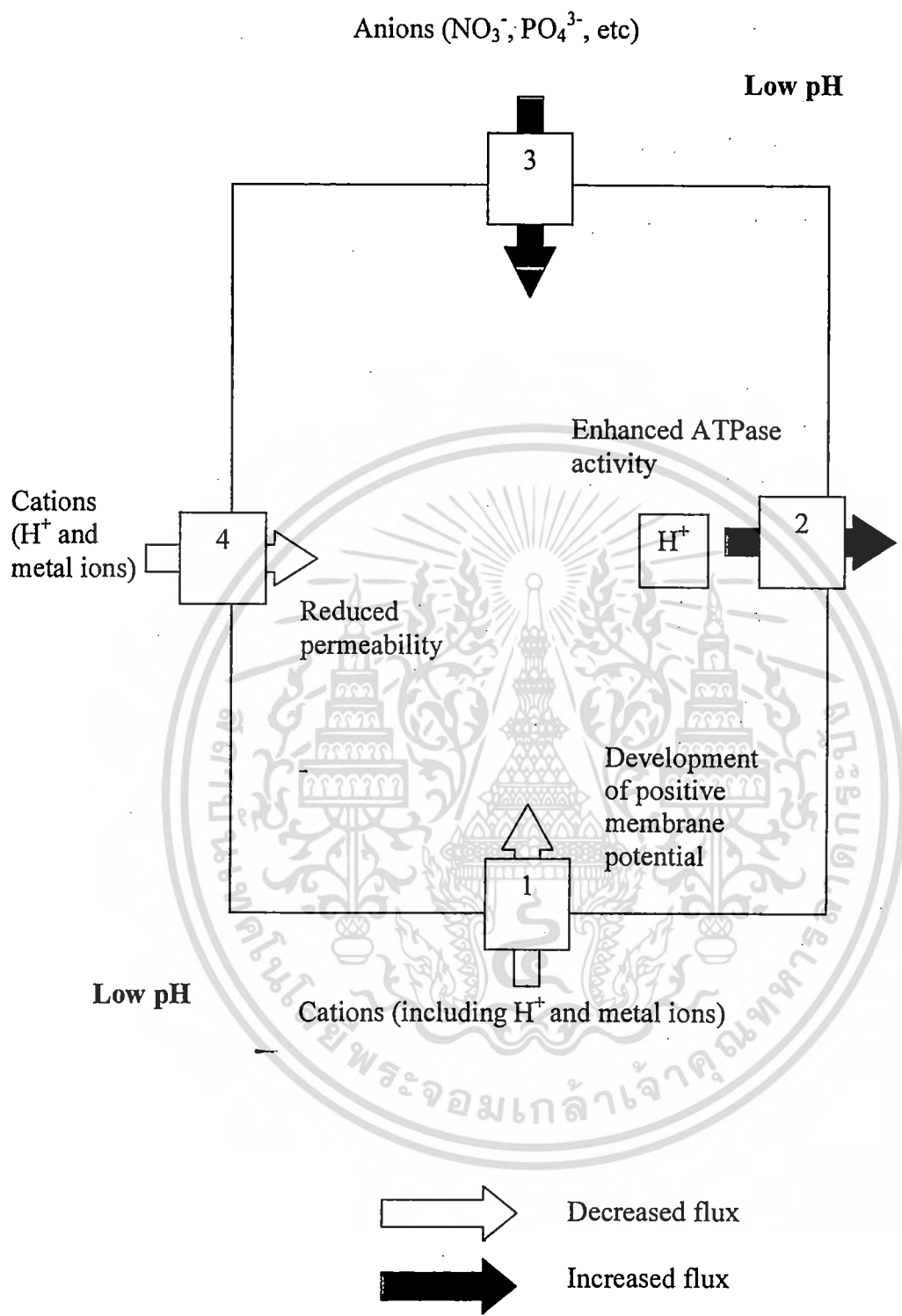
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อการค้า หรือทำกำไรได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

กลไกการปรับตัวของสาหร่ายในน้ำที่พีเอชต่ำ

ในการทดลองนำสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีความสามารถในการทนต่อพีเอชต่ำ มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ และได้ศึกษากลไกในการทนกรดของสาหร่ายชนิดนี้ พบว่ามีกลไกในการทำให้เซลล์สามารถทนต่อพีเอชที่ต่ำได้ เมื่อพีเอชของสารละลายที่อยู่รอบเซลล์สาหร่ายต่ำ นั่นคือมีประจุบวกโดยเฉพาะ H^+ มาก ซึ่งจะทำให้ H^+ นี้แพร่เข้าเซลล์ได้ สาหร่ายจะปรับตัวโดย (ภาพที่ 1)

- เซลล์ของสาหร่ายเร่งการนำประจุลบเข้าสู่เซลล์เพื่อทำให้พีเอชภายในเซลล์มีค่าเป็นกลาง (หมายเลข 3)
- สาหร่ายเพิ่มปริมาณของ ATPase เพื่อใช้ในการขับ H^+ ออกจากเซลล์ (หมายเลข 2)
- เซลล์สาหร่ายขับประจุบวก ซึ่งรวมทั้ง H^+ และไอออนของโลหะอื่น ๆ ออกจากเซลล์ (หมายเลข 2)
- สาหร่ายลดการแพร่ผ่านเยื่อเซลล์โดยการเพิ่มการผลิตไขมัน (lipid) ซึ่งทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุบวกเข้าสู่เซลล์ (หมายเลข 4)
- สาหร่ายปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อเซลล์ให้เป็นบวกซึ่งจะทำให้ประจุบวกแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้ยากมากขึ้น (หมายเลข 1)

ซึ่งกลไกทั้งหมดนี้สาหร่ายพัฒนาขึ้นเพื่อความอยู่รอดของเซลล์สาหร่ายเอง และยังเป็นไปได้ว่าสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อยู่ในธรรมชาติ สามารถเกิดกลไกในการป้องกันตัวให้มีชีวิตรอดแบบนี้เช่นกัน หากแหล่งอาศัยที่สิ่งมีชีวิตนั้นอาศัยอยู่เกิดภาวะเครียดที่มีทั้งกรดและโลหะหนักเข้ามาในแหล่งที่มันอาศัย ^[548, 656, 660]



ภาพที่ 1 รูปแบบของกลไกในการทนต่อความเป็นกรดและความเป็นพิษของโลหะหนักในสาหร่าย *Chlorella vulgaris*

ที่มา: ตัดแปลงจาก Raj et al. (1996)^[548] ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

พิษของโลหะหนักต่อสาหร่ายที่มีชีวิต

1. การจำแนกแร่ธาตุตามความเป็นพิษ

1.1. การจำแนกแร่ธาตุตามความเป็นพิษและตามโอกาสที่จะพบเป็นพิษได้ (availability) เป็น 3 กลุ่ม คือ^[664, 683]

1.1.1. กลุ่มที่ไม่เป็นพิษรุนแรง เช่น C, N, P, O, Na, Mg, Fe, K, Ca, Si

1.1.2. กลุ่มที่เป็นพิษ แต่มักไม่ละลายหรือพบได้น้อย เช่น Ti, Ga, Yr, W, Ta, Ru, Re

1.1.3. กลุ่มที่เป็นพิษสูง และพบได้บ่อย ส่วนใหญ่คือพวกโลหะหนัก เช่น Be, As, Co, Se, Hg, Ni, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb, Cd

แต่ในกลุ่มที่ 3 นี้ บางชนิดก็มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เช่น Cu, Zn, Co โดยพบว่าเป็น trace metal หรือแร่ธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการใช้ในการเจริญเติบโต แต่ต้องการในปริมาณน้อย ซึ่งหากความเข้มข้นต่ำเกินไป อาจทำให้สาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดี และหากความเข้มข้นสูงเกินไป ก็จะเป็นพิษ ซึ่งค่าที่เหมาะสมกับสาหร่ายนั้นมีค่าอยู่เพียงในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น

1.2. การจำแนกแร่ธาตุออกเป็นกลุ่มตามระดับของความเข้มข้นที่เป็นพิษ^[54] ได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1.2.1. กลุ่มที่เป็นพิษสูงมาก โดยที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ส่งผลเป็นพิษ เช่น กลุ่มประจุบวก Ag^+ , Be^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Sn^{2+} และอาจรวม Co^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{VI}

1.2.2. กลุ่มที่เป็นพิษปานกลาง โดยความเข้มข้นที่ส่งผลเป็นพิษอยู่ระหว่าง 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่น F^- , S^{2-} , As^{III} , As^V , B, Br^V , Cl^V , Mn^{VII} , Mo^{VI} , Sb^{III} , Sb^V , Se^{IV} , Se^{VI} , Te^V , Te^{VI} , V^V , W^{VI} , Al^{3+} , Ba^{2+} , Bi^{3+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ti^+ , Zn^{2+} , Zr^{4+}

1.2.3. กลุ่มที่เป็นพิษน้อยมาก หรือแทบไม่เป็นพิษ กลุ่มนี้มักไม่พบว่าเป็นพิษ ยกเว้นเมื่อมีการขาดของสารอาหารที่จำเป็นในสาหร่าย หรือที่แรงดันออสโมติกเกิน 1 บรรยากาศ เช่น Br^- , Cl^- , I^- , Ge, N, P, S^{VI} , Si, Ti, Ca^{2+} , Cs^+ , K^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Rb^+ และ Sr^{2+}

2. พืชของโลหะหนักต่อสาหร่าย^[32, 41, 47, 76, 77, 85, 106, 125, 126, 132, 140, 155, 156, 159, 173, 174, 181, 418, 464, 473, 499, 500, 530, 543, 544, 545, 546, 596, 597, 598, 608, 615, 617, 676, 684, 698]

โลหะหนักมีผลกระทบต่อสาหร่ายในหลายด้าน ได้แก่

- 2.1. ทำลายความสามารถของผนังเซลล์ในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน ทำให้เซลล์สูญเสียแร่ธาตุในเซลล์ เช่น K หรือสารอินทรีย์ภายในเซลล์ และทำให้เซลล์เปลี่ยนแปลงปริมาตรไป
- 2.2. ลดการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้การสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง
- 2.3. ยับยั้งการสร้างและปล่อยออกซิเจนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
- 2.4. ยับยั้งการบริโภคออกซิเจนในกระบวนการหายใจ
- 2.5. ทำลายกระบวนการนำธาตุอาหารเข้าเซลล์
- 2.6. ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากโลหะหนักเข้าไปแทนที่แร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์
- 2.7. ยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน
- 2.8. ไปจับตัวกับผลผลิตจากกระบวนการเมแทบอลิซึมที่มีความจำเป็นและทำให้เกิดตะกอน เช่น Fe จับกับ ATP และไปขัดขวางกระบวนการเมแทบอลิซึม
- 2.9. ทำให้มีการพัฒนาของรูปร่างเซลล์ที่ผิดปกติ
- 2.10. ทำลายการเคลื่อนที่และทำให้แฟลเจลลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่สูญหายไป
- 2.11. ลดปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมทั้งลดการเจริญเติบโตหรือหากรุนแรงก็อาจทำให้เซลล์ตายได้

ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพวกที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้ โลหะหนักอาจลดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ nitrogenase รวมทั้งทำลาย heterocyst ทำให้เซลล์แตก และในบางกรณีจะเพิ่มปริมาณ heterocyst ในเส้นสายให้ดีขึ้น

ความสามารถของสาหร่ายแต่ละชนิดในการทนต่อโลหะหนักนั้นไม่เท่ากัน ขึ้นกับลักษณะการทำงานของเซลล์สาหร่ายแต่ละชนิด และขึ้นกับชนิดของโลหะหนักด้วยเช่นกัน

3. ตัวอย่างความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่ายที่มีชีวิต

โลหะหนักที่ความเข้มข้นแตกต่างกันจะมีความเป็นพิษต่อสาหร่ายในระดับที่ต่างกัน สาหร่ายบางชนิดสามารถทนพิษโลหะหนักได้สูง แต่สาหร่ายบางชนิดทนได้ต่ำ และพิษของโลหะหนักแต่ละชนิดก็มีความรุนแรงหรือมีความเป็นพิษต่อสาหร่ายไม่เท่ากัน รวมทั้งผลของความเป็นพิษที่มีต่อสาหร่ายก็ส่งผลที่ต่างกัน เช่น

- การเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella* จะลดลง เมื่อได้รับนิกเกิล แต่สาหร่ายยังคงสามารถแบ่งเซลล์ได้^[681]
- ไดอะตอมสกุล *Haslea* ที่ได้รับคอปเปอร์ 0.47 ไมโครโมล จะทำให้การแบ่งเซลล์ลดลง แต่ปริมาณไขมันในเซลล์เพิ่มขึ้น^[415]
- ไดอะตอมชนิด *Phaeodactylum tricornutum* ที่ได้รับแคดเมียมจะทำให้การสังเคราะห์แซนโทฟิลล์ถูกยับยั้ง^[46] สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ที่ได้รับแคดเมียม 12.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง^[64]
- พรอท แคดเมียม และตะกั่ว มีผลต่อการเจริญเติบโต การหายใจ ปริมาณและการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์-เอ และบี ในยูกลีโนยด์สกุล *Euglena*^[102]
- สาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus abundans* ที่ได้รับ แคดเมียมและคอปเปอร์ที่ระดับ 15-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง^[625]
- กลุ่มไดอะตอมที่ได้รับ แคดเมียม 15 ไมโครกรัมต่อลิตร และสังกะสี 800 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีผลทำให้มีปริมาณไดอะตอมลดลง และองค์ประกอบชนิดของไดอะตอมเปลี่ยนแปลงไป^[159]
- สาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella* ที่ได้รับสังกะสีที่ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้รูปร่างผิดปกติ และผนังเซลล์เปลี่ยนแปลงไป^[637]

กลไกของสารร้ายในการทนต่อพิษของโลหะหนัก

ความสามารถของสารร้ายที่จะมีชีวิตหรือสืบพันธุ์ในสภาวะแวดล้อมที่มีพิษของโลหะหนัก อาจขึ้นอยู่กับ การปรับตัวทางพันธุกรรม เช่น เกิดการกลายพันธุ์ (mutation) การเปลี่ยนแปลงของยีน การคัดเลือกพันธุ์ หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางสรีรวิทยา ซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสกับโลหะหนัก คำว่า “tolerance” และคำว่า “resistance” ส่วนใหญ่จะใช้สองคำนี้ในความหมายคล้ายกันและใช้สลับกันได้ ซึ่งทั้งสองคำมีความหมายคือ “ทน” แต่คำว่า “resistance” ในบางครั้งจะหมายถึงการทน การตอบสนองโดยตรงต่อการสัมผัสกับโลหะหนัก ในขณะที่คำว่า “tolerance” จะหมายถึง การทนที่อาจขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต หรือลักษณะทางกายภาพ หรือทางเคมีของสิ่งแวดล้อม

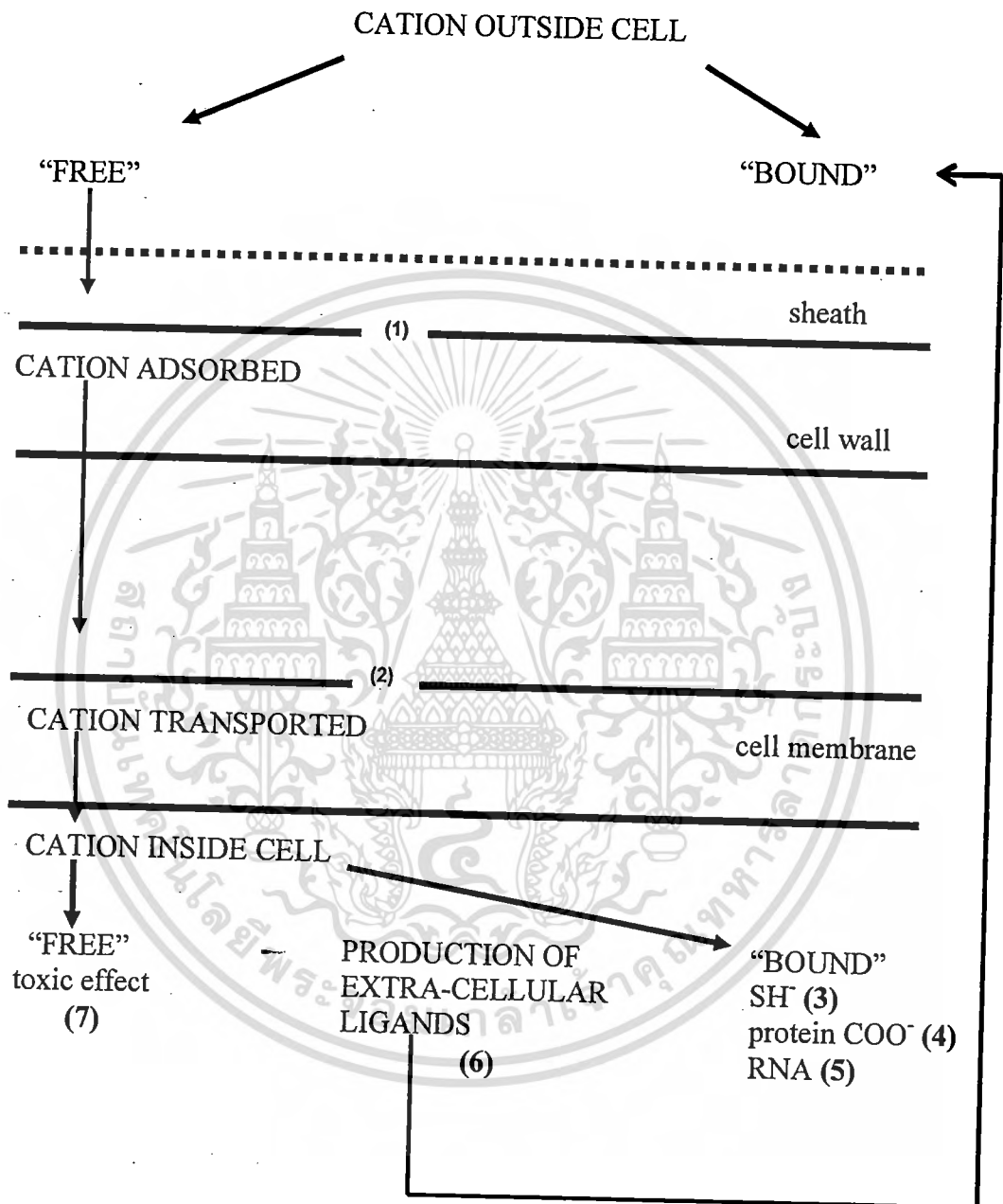
โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักจะลดความหลากหลายหรือลดชนิด และลดปริมาณของสารร้าย ซึ่งสารร้ายสีเขียวแกมน้ำเงินและไดอะตอมเป็นกลุ่มที่มีความทนต่อโลหะหนักได้น้อยกว่าสารร้ายสีเขียว^[558]

จากการศึกษาความเป็นพิษของโลหะหนักต่อเซลล์สารร้ายได้สรุปการนำโลหะหนักหรือแร่ธาตุเข้าเซลล์สารร้าย และกลไกของสารร้ายในการทนต่อพิษของโลหะที่เป็นไปได้อยู่ 7 วิธี^[664]

โดยปกติโลหะหนักที่จะนำเข้าสู่เซลล์ได้ต้องอยู่ในรูปของไอออนหรือรูปอิสระ จากนั้นไอออนของโลหะจะผ่านเข้าผนังเซลล์หรือถูกดูดซับโดยผนังเซลล์สารร้าย ซึ่งขั้นตอนการกันไม่ให้โลหะหนักเข้าเซลล์สามารถทำได้ ณ จุดนี้ (ภาพที่ 2) ซึ่งถ้าผนังเซลล์หรือเมือกของสารร้ายสามารถจับไอออนของโลหะหนักได้และป้องกันไม่ให้ผ่านเข้าเยื่อหุ้มเซลล์มาได้ ขั้นตอนการกันโลหะหนักก็จะเกิดขึ้นได้ (หมายเลข 1)

ที่เยื่อหุ้มเซลล์ อาจสามารถควบคุมการแพร่ผ่านได้ ซึ่งจะทำให้ไอออนไม่สามารถผ่านเข้าในเซลล์ได้ง่าย หรือผ่านเข้าได้อย่างช้ามาก (หมายเลข 2)

นอกจากนี้ กลไกอื่น ๆ ที่พบคือการจับประจุบวกของไอออนไว้ที่ตำแหน่งยึดจับที่ไม่เป็นอันตรายภายในเซลล์ (หมายเลข 3, 4, 5) และกลไกการสร้างลิแกนด์ (หมายเลข 6) เพื่อให้ลิแกนด์นำโลหะออกนอกเซลล์หรือปล่อยลิแกนด์ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อให้จับกับโลหะที่อยู่ภายนอกเซลล์ซึ่งทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โลหะเหล่านั้นเข้ามาในเซลล์ได้ ซึ่งกลไกการสร้างลิแกนด์นี้ปกติจะเกิดขึ้นเมื่อต้องการตอบสนองต่อโลหะที่เป็นพิษ และกลไกอื่นที่สร้างขึ้นเช่น ขบวนการทางชีวเคมี (หมายเลข 7)



ภาพที่ 2 การนำแคทไอออน (ประจุบวก) ที่เป็นพิษเข้าเซลล์สำหรับ

ที่มา : Stokes (1983)^[664]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

1. กลไกการทนพิษโลหะหนักของสาหร่าย

สาหร่ายหลายชนิดมีความสามารถในการทนต่อพิษของโลหะหนักได้สูง ซึ่งกลไกของสาหร่ายในการทนต่อพิษของโลหะหนัก (mechanisms of heavy metal tolerance in algae) สรุปได้คือ

1.1. การปล่อยสารออกมาจับโลหะหนักภายนอกเซลล์และการตกตะกอน (extracellular binding and precipitation) การปล่อยสารพอลิเพปไทด์ (polypeptide) ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อลดพิษของโลหะหนัก โดยพบรายงานถึงกลไกนี้ครั้งแรกในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anabaena cylindrica* หลังจากนั้นมียางานถึงลิแกนด์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายพวงอุคาเรียอื่น ๆ ซึ่งสารที่ปล่อยออกมาเป็นพวกกรดอินทรีย์และพอลิเพปไทด์ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่สูงสามารถลดความเป็นพิษของโลหะได้

สาหร่ายสามารถสร้างสารตัวจับโลหะในรูปของเหล็ก-ไซเดอโรฟอร์ (Fe-chelating siderophore) ที่ทำหน้าที่ในการจับคอปเปอร์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษได้ และสาหร่ายยังสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักขึ้นที่ผิวเซลล์ภายนอก ทำให้โลหะหนักไม่สามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ สาหร่ายบางชนิดปล่อยพอลิเมอร์ออกมาภายนอกเซลล์ ทำให้มีการรวมตัวกันของโลหะหนักและตกตะกอนอยู่ภายนอกเซลล์ ซึ่งพอลิเมอร์นี้ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีคุณสมบัติเป็นประจุลบและมีศักยภาพในการจับกับประจุบวกของโลหะหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายบางชนิดใช้โปรตีนที่ผนังเซลล์ในการจับโลหะหนัก

1.2. การไม่ยอมให้โลหะหนักผ่านและการจำกัดการเข้าเซลล์ (impermeability and exclusion) โดยลดการนำเข้าโลหะหนัก ลดการสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ และขัดขวางการนำโลหะหนักเข้าเซลล์ สาหร่ายชนิดใดที่มีกลไกในการขัดขวางการนำโลหะหนักเข้าเซลล์ได้ สาหร่ายนั้นจะสามารถลดปริมาณโลหะหนักที่สะสมในเซลล์ ทำให้ไม่เป็นอันตราย

1.3. การลดพิษภายในเซลล์ (internal detoxification) โดยพบว่าสาหร่ายสามารถลดพิษโลหะหนักที่อยู่ภายในเซลล์โดยการพาโลหะหนักเข้าไปสะสมไว้ในออร์แกเนลล์ (organelle) อื่น ๆ อีกหลายส่วนของเซลล์สาหร่าย เช่น ไมโทคอนเดรีย แวกคิวโอล คลอโรพลาสต์ ผนังเซลล์ nuclei, polyphosphate bodies และแม้แต่ใน eyespot โดยพบว่าการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากผนังเซลล์ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และเข้าไปในแวกคิวโอลหรือไซโทพลาสซึม ซึ่งบางครั้งโลหะหนักอาจแสดงพิษต่อเซลล์โดยไม่มีการพาไปสะสมยังออร์แกเนลล์อื่น ๆ^[413]

โดยปกติแล้วโลหะหนักมีผลในการทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์หรือทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ทำงานผิดปกติ ทำให้เกิดการบวมหรือการขยายขนาดของออร์แกเนลล์ต่าง ๆ หรือทำลายระบบควบคุมสมดุลไอออนของเซลล์ ซึ่งการแพร่กระจายโลหะหนักไปในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ที่แตกต่างกันนั้น มีผลสำคัญเพราะว่าทำให้สามารถช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนักได้ เพราะ

ไม่ว่ากรณีใดทั้งนี้ สิ่งทั้งมวลจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

หากมีการสะสมที่ออร์แกเนลล์ส่วนหนึ่งส่วนใดมากเกินไป ออร์แกเนลล์นั้น ๆ จะถูกทำลายได้ และหากไลโซโซมมีการจับกับโปรตีน และลิพิดโปรตีน (lipoprotein) ในเซลล์ก็จะทำให้ไลโซโซมเหล่านั้นไม่เป็นพิษกับเซลล์ หรือเป็นวิธีการลดความเป็นพิษของเซลล์ด้วยเช่นกัน

พอลิฟอสเฟต (polyphosphate) สามารถแยกไลโซโซมออกได้ เพราะ polyphosphate มีส่วนประกอบที่เป็น P, Mg, lipoprotein และ RNA ซึ่งส่วนประกอบนี้สามารถจับกับไลโซโซมได้ เนื่องจาก polyphosphate มีผิวเป็นประจุลบ จึงจับกับประจุบวกได้ ส่วน lipid สามารถจับกับไลโซโซมได้ แต่ได้ในปริมาณที่น้อย และส่วนโปรตีนซึ่งปกติเป็นส่วนประกอบของเซลล์อยู่แล้ว และมีคุณสมบัติที่จับไลโซโซมได้ จึงสามารถทำหน้าที่ในการจับหรือแยกไลโซโซมให้กับเซลล์ได้

โดยพบว่ามีไลโซโซมหลายชนิดที่ถูกจับแยกไว้โดย polyphosphate ในสาหร่ายเช่น ไลโซโซมชนิด

- Ti ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anacystis nidulans*^[85]
- Pb ในไดอะตอม *Diatoma tenue*^[596], *Fragilaria capucina*^[597]
- Mg, Ba, Mn, Cd, Co, Cu, Hg, Pb, Zn ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Plectonema boryanum*^[41]
- Pb, Zn ในสาหร่ายสีเขียว *Chlorella saccharophila*, ไดอะตอม *Navicula incerta* และ *Nitzschia closterium*^[413]

ซึ่งความสามารถในการแยกไลโซโซมของ polyphosphate นี้ อาจมีไว้เพื่อใช้เป็นตำแหน่งยึดจับที่ทำหน้าที่ในการจับธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับเซลล์สาหร่าย หรือเพื่อลดพิษของไลโซโซมก็ได้

ความเข้มข้นของไลโซโซมที่จะเป็นพิษต่อเซลล์ และความรุนแรงของพิษไลโซโซมต่อเซลล์สาหร่าย จะขึ้นกับปริมาณสารอาหารประเภทฟอสเฟตของเซลล์ โดยเซลล์สาหร่ายที่ขาดฟอสเฟตหรือมีฟอสเฟตน้อยจะได้รับผลกระทบหรือรับพิษของไลโซโซมได้มากกว่าเซลล์ที่มีฟอสเฟตมาก^[672] ซึ่งโดยรวมแล้วความรุนแรงของพิษไลโซโซมที่ต่างชนิดกันต่อสาหร่ายจะมีลำดับความรุนแรงคือ $Hg > Cu > Cd > Ag > Pb > Zn$ ^[558] แต่อย่างไรก็ตาม ยังขึ้นกับชนิดของสาหร่ายและสภาวะแวดล้อมของสาหร่ายด้วย

2. การสะสมโลหะหนัก

ความสามารถในการนำโลหะหนักเข้าเซลล์จนทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในเซลล์สูงกว่าสิ่งแวดล้อมภายนอกนั้น พบได้ในสิ่งมีชีวิตในน้ำหลายชนิด โดยการที่จะเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมโลหะหนัก (accumulation of heavy metal) ระหว่างสาหร่ายหรือสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างกันได้นั้น จะใช้ concentration factor ในการพิจารณาซึ่ง concentration factor จะมีความหมายเช่นเดียวกับ concentration coefficient หรือ accumulation factor หรือ bioaccumulation factor ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของความเข้มข้นของแร่ธาตุที่พบในน้ำหนักแห้งของสิ่งมีชีวิตนั้น ต่อความเข้มข้นของแร่ธาตุนั้นในน้ำ

การสะสมโลหะหนักโดยสาหร่ายจะได้รับผลจากปัจจัยต่าง ๆ ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกันและกันเอง หรือเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิต และปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้การสะสมโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตมีความซับซ้อน ซึ่งการพิจารณาผลของการสะสมโลหะหนักในสาหร่ายจะพิจารณาด้านผลกระทบต่อเมแทบอลิซึม โครงสร้างเซลล์ การเจริญเติบโต และการสืบพันธุ์

2.1. ปัจจัยไม่มีชีวิตที่มีความเกี่ยวข้องกับการสะสมโลหะหนักคือ ลักษณะเฉพาะของโลหะหนักแต่ละชนิด (ความชอบในการจับกับตำแหน่งยึดจับ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี) ความเข้มข้นของโลหะหนัก ระยะเวลาในการสัมผัสกับโลหะหนัก ความเข้มข้นของแร่ธาตุอื่น ๆ (เช่น Ca, Mg, P หรือโลหะหนักอื่น ๆ) พีเอช สารประกอบเชิงซ้อนและ สารตัวจับโลหะ (chelating agent) ค่าสภาวะรีดอกซ์ อุณหภูมิ แสง และ กระแสน้ำ

2.2. ปัจจัยที่มีชีวิตที่มีความเกี่ยวข้องกับการสะสมโลหะหนักคือ ลักษณะเฉพาะตัวของชนิดสาหร่าย (ผนังเซลล์ เมือก องค์ประกอบภายในเซลล์) ปริมาณสาหร่าย ผลผลิตที่ปล่อยออกนอกเซลล์ ระยะของวงจรเจริญเติบโต การทำงานของเซลล์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อ

- การเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ โครงสร้างภายในเซลล์ เมแทบอลิซึมของสาหร่าย
- การลดพิษของสาหร่าย โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อ ผนังเซลล์ เมือก polyphosphate การนำสารในรูปของเหลวผ่านเซลล์ (pinocytosis) การสร้างเมทัลโลไทโอนีน (metallothionein)
- ความเฉพาะเจาะจง โดยส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของโลหะหนักในการส่งผลกระทบต่อเซลล์ คือจะทำให้โลหะหนักแต่ละชนิดมีผลกระทบต่อเซลล์สาหร่ายชนิดนั้น ในลักษณะที่เฉพาะเจาะจง คือทำลายออร์แกเนลล์ส่วนใด หรือไม่ทำลายส่วนใด

โดยมีรายงานว่าเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตสามารถกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าเซลล์ที่ไม่มีชีวิต เนื่องด้วยมีขบวนการการนำเข้าสู่เซลล์ เช่น โดอะตอม *Synedra ulna* ดูดซับปรอทไว้ที่ผิวเซลล์ ได้ 20 เปอร์เซ็นต์ และนำเข้าสู่เซลล์ได้ 80 เปอร์เซ็นต์^[138] ส่วนการกำจัดแคดเมียมโดยสาหร่ายสีเขียว *Eremosphaera viridis* ก็ให้ผลในทางเดียวกัน แต่ในทางตรงข้าม *Ankistrodesmus braunii* กับ *Chlorella vulgaris* จะกำจัดโลหะหนักไว้ที่นอกเซลล์ได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์^[153] และการใช้ *Mougeotia*, *Microspora* และ *Phormidium* ดูดซับคอปเปอร์ พบว่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของคอปเปอร์ถูกดูดซับไว้ภายนอกเซลล์^[132]

ส่วนการนำแคดเมียมเข้าสู่เซลล์แบบใช้พลังงานของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella pyrenoidosa* พบว่าจะถูกยับยั้งเมื่ออยู่ในที่มืดหรือที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แต่ในสภาวะที่ปกติประจำวันอื่น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อกรนำแคดเมียมเข้าสู่เซลล์^[173] ซึ่งการสะสมแคดเมียมโดยสาหร่ายชนิดนี้ขึ้นกับแสงและอุณหภูมิ จึงชี้ให้เห็นชัดเจนว่าเป็นการนำแคดเมียมเข้าสู่เซลล์แบบการใช้พลังงาน^[174]

การสะสมแคดเมียมในสาหร่ายสีแดง *Porphyra umbilicalis* ขึ้นกับแสงเช่นกัน และจะถูกยับยั้งโดยสาร cycloheximide ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการสร้างโปรตีน^[473]

การดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Gloeocapsa* sp. พบว่าภายใต้สภาวะการมีแสงการดูดซับจะถึงจุดสมดุลช้ากว่าในที่มืด ซึ่งอาจเป็นเพราะภายใต้สภาวะมีแสง เซลล์สาหร่ายสามารถสร้างพลังงานในการต่อต้านการนำตะกั่วเข้าสู่เซลล์หรือต่อต้านการดูดซับตะกั่ว ทำให้อัตราการดูดซับก่อนถึงจุดสมดุลเกิดได้ช้ามาก^[548] ซึ่งในสภาวะไม่มีแสง เซลล์สาหร่ายไม่สามารถเกิดกลไกนี้ได้เพราะไม่มีพลังงานเพียงพอ

กลไกของสิ่งมีชีวิตในการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก

ในร่างกายสัตว์ชั้นสูงหรือมนุษย์มีกลไกการลดพิษของโลหะหนักได้ โดยใช้การทำงานของเมทัลโลไทโอนีน (metallothionein/ MTs) โดยในร่างกายมนุษย์นั้น metallothionein เป็นโปรตีนตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งโลหะหนักในร่างกาย ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการกำจัดพิษของโลหะหนัก โดยไปขัดขวางพิษของสังกะสี แคดเมียม คอปเปอร์ (ทองแดง) ปรอท และซิลเวอร์ (เงิน)^[215]

ซึ่ง metallothionein คือโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มี cysteine เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก และสามารถเกาะกับโลหะหนักได้ สำหรับ cysteine นั้นคือกรดอะมิโนชนิดที่ร่างกายไม่จำเป็นต้องมี แต่ใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนได้ โดย cysteine มีบทบาทในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์กลูตาไธโอน (glutathione) ซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดีในทุกเซลล์ของร่างกายและทำให้โปรตีนต่าง ๆ กลับเข้าสู่โครงสร้างที่ถูกต้อง^[68]

ในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำได้มีการพัฒนากลไกเพื่อรักษาสมดุลของเซลล์ เพื่อควบคุมโลหะหนักที่มีในเซลล์กับที่มีในสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยเซลล์จะต้อง 1) เลือกชนิดโลหะหนักที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต และกำจัดโลหะหนักที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต และ 2) เซลล์ต้องคอยรักษาปริมาณไอออนที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตให้มีอยู่ในเซลล์ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม^[78]

สาหร่ายมีกลไกการทำงานของโมเลกุลภายในเซลล์ที่ทำให้สามารถแยกโลหะหนักที่ไม่จำเป็นต่อเซลล์ออกจากโลหะที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตได้ ซึ่งสาหร่ายในกลุ่มยูคาริโอต (eukaryote) และโปรคาริโอต (prokaryote) มีกลไกหรือขบวนการลดพิษที่แตกต่างกัน โดยสาหร่ายกลุ่มยูคาริโอตมีศักยภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยการสร้างเปปไทด์ (peptide) ที่จับโลหะหนัก โดยเป็นพวกลสารประกอบเชิงซ้อนโลหะอินทรีย์ (organometallic complex) และนำไปอยู่ในช่องว่างในเซลล์ เพื่อควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในไซโทพลาซึมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ดังนั้นขั้นตอนนี้เซลล์จึงสามารถป้องกันอันตรายหรือลดความเป็นพิษ เพราะเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ส่วนสาหร่ายในกลุ่มโปรคาริโอตพบว่าการใช้ ATP ในการขับโลหะหนักออกมาภายนอกเซลล์ หรือใช้เอนไซม์ในการเปลี่ยนรูปของโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ

โดยทั่วไปเปปไทด์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการลดพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต แบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ

1. phytochelatin หรือ Class III metallothioneins (ไฟโตคีเลติน หรือ คลาส III เมทัลโลไทโอนีน) ซึ่งสามารถพบในพืชชั้นสูง สาหร่าย ฟังไก้ ไซยาโนแบคทีเรีย เป็นพอลิเปปไทด์สายสั้น ๆ (short-chain polypeptide) สังเคราะห์ขึ้นโดยการทำงานของเอนไซม์
2. Class II metallothioneins พบในไซยาโนแบคทีเรีย สาหร่ายพวงยูคาริโอตและพืชชั้นสูง และ Class I metallothioneins พบในสัตว์มีกระดูกสันหลัง ไม่พบในสาหร่าย โดยเปปไทด์ในกลุ่มที่ 2 นี้เป็นพวกที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการทำงานของยีน

ในส่วนของพอลิเปปไทด์สายสั้นนั้น มีชื่อเรียกว่า phytochelatin (PCs) เพราะมีการพบครั้งแรกในพืชชั้นสูง (phyto) และพบว่าพอลิเปปไทด์นี้มีศักยภาพในการจับกับไอออนของแคดเมียมได้ดี^[164, 165, 613] และเนื่องจาก Class II metallothioneins นั้นเกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชเมื่อได้รับความเครียดจากโลหะหนัก ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์บางท่านจึงได้มีการเปลี่ยนชื่อของ phytochelatin ให้เข้าไปอยู่ในกลุ่มเดียวกับ metallothionein จึงเปลี่ยนจาก phytochelatin เป็น Class III metallothioneins^[555] แต่ยังคงพบว่าคำว่า phytochelatin ยังคงได้รับความนิยมในการใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน^[184, 503, 527, 528, 643] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ้ากล่าวถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

phytochelatin จะหมายถึงเพปไทด์ในพืชชั้นสูงที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ 2-11 glutathione (γ -glutamyl-cysteinyl-glycine) ซึ่งทำหน้าที่จับกับโลหะหนัก^[289]

1. ลักษณะโดยทั่วไปของ phytochelatin (PCs)

กลไกการสังเคราะห์ phytochelatin หรือ ClassIII metallothioneins (MtIII) จะเกี่ยวข้องกับ glutathione ซึ่ง glutathione นี้สามารถพบในร่างกายมนุษย์ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะและหน้าที่ดังนี้

glutathione (GSH/ กลูตาไธโอน) เป็นสารประเภท tripeptide ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิด ได้แก่ cysteine, glycine และ glutamic acid หน้าที่หลักของสาร glutathione ที่มีความสำคัญมีอยู่ 3 ประการ คือ

1) detoxification คือช่วยในการลดพิษ โดย glutathione ช่วยสร้างเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ ในร่างกายโดยเฉพาะ glutathione-S-transferase ที่ช่วยในการกำจัดพิษออกจากร่างกาย

2) antioxidant พบว่า glutathione มีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) ที่มีความสำคัญตัวหนึ่งในร่างกาย และหากขาดไป วิตามินซีและอี อาจจะทำงานได้ไม่เต็มที่

3) immune enhancer ช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกันในร่างกายโดยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดเพื่อให้ร่างกายต่อต้านสิ่งแปลกปลอมรวมถึงเชื้อแบคทีเรียและไวรัส นอกจากนี้ glutathione ยังช่วยสร้างและซ่อมแซม DNA สร้างโปรตีนและ prostaglandin^[243] ซึ่ง prostaglandin เป็นสารกลุ่มหนึ่งในร่างกายซึ่งมีหน้าที่ที่สำคัญคือควบคุมการหดและขยายตัวของเส้นเลือด สมดุลการอักเสบ และควบคุมสารเคมีเกี่ยวกับความรู้สึกเจ็บปวด ดังนั้นถ้าสมดุลอันนี้เสียไปก็ส่งผลให้เกิดอาการปวดหลาย ๆ อย่างขึ้น^[231]

2. โครงสร้างโดยทั่วไปของ phytochelatin

โครงสร้างโดยทั่วไปของ phytochelatin คือ $(\gamma\text{-Glu-Cys})_n\text{-Gly}$ (γ -glutamyl-cysteinyl)_n-glycine) (ภาพที่ 3)^[184] ซึ่งความยาวของสายหรือ “n” มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 11 หน่วย^[78, 555, 613] น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 10,000 ดาลตัน^[149, 613]

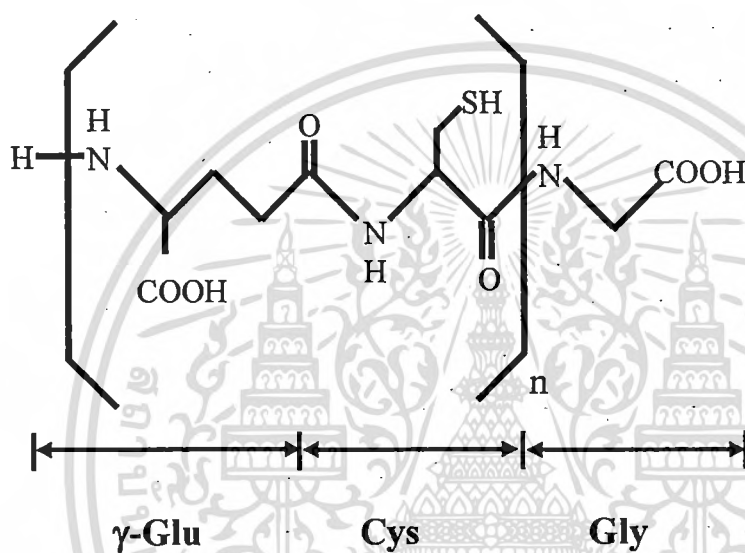
จุดสำคัญที่ต้องสังเกตคือ glutamic acid (glu) จะไม่จับกับ cysteine (cys) โดยตำแหน่ง α -carboxyl group เหมือนการสังเคราะห์กรดอะมิโนทั่วไป แต่จับด้วย γ -carboxyl group และโครงสร้างจะผันแปรได้หลายรูปแบบเช่น $(\gamma\text{EC})_n\text{-}\beta\text{Ala}$, $(\gamma\text{EC})_n\text{-Ser}$ และ $(\gamma\text{EC})_n\text{-Glu}$ ซึ่งรูปแบบเหล่านี้พบได้ในพืชอื่น ๆ เช่นกัน^[78, 149]

phytochelatin ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยเอนไซม์ phytochelatin synthase (PCS) ชนิด γ -glutamylcysteine (γEC) (E.C. 2.3.2.15)^[651] โดยเอนไซม์นี้จะทำการกระตุ้นการสร้างเพปไทด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ การคัดลอกเนื้อหาโดยสุ่มหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ γ -Glu-Cys ซึ่งเป็นส่วนของ glutathione (γ ECG) เพื่อสร้าง phytochelatin หรือไปกระตุ้นโมเลกุลของ phytochelatin ให้มีการสร้างสายที่ยาวขึ้น หรือเพิ่ม n ขึ้นอีก 1 ^[78, 613]

ซึ่งกลไกการสร้าง phytochelatin โดยทั่วไปเขียนได้คือ



ภาพที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของ phytochelatin
ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirata et al. (2005) ^[184]

3. การสังเคราะห์ phytochelatin ทางชีวภาพและกฎเกณฑ์ในการสังเคราะห์

การสังเคราะห์ phytochelatin สามารถชักนำให้เกิดการสังเคราะห์ได้ด้วยเกลือของโลหะบางประเภท โดยพบว่าหากเป็นแคดเมียม จะสามารถกระตุ้นให้มีการสร้าง phytochelatin ได้สูงที่สุด รองลงมาคือตะกั่ว สังกะสี คอปเปอร์ และโลหะหนักอื่น ๆ ^[165] แต่พบว่าปัจจัยอื่น ๆ เช่นความร้อน ความเย็น รังสียูวี ฮอโมน การขาดออกซิเจน หรือ oxidative stress กลับไม่สามารถชักนำให้เกิดการสร้าง phytochelatin ได้ ^[613] (oxidative stress คือภาวะที่มีอนุมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

อิสระมากเกินไป จนสารต้านอนุมูลอิสระมีไม่เพียงพอ และส่งผลให้เกิดการทำลายดีเอ็นเอ โปรตีน ไขมัน และโมเลกุลขนาดเล็กอื่น ๆ)

phytochelatin synthase หรือ PCS เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์ phytochelatin เอนไซม์นี้ถูกกระตุ้นได้โดยโลหะหนัก และได้มีการทดสอบว่าเอนไซม์นี้จะใช้สารตั้งต้นตัวใดได้ดี พบว่าจะใช้ glutathione ที่ถูกบล็อกไธออล (thiol, กลุ่ม $-SH$) ได้ดีกว่า glutathione ปกติ

เอนไซม์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ glutathione คือ γ -glutamylcysteine synthetase (YECS) และ glutathione synthetase (GS) โดยพบว่าถ้ามี glutathione ต่ำ พืชจะได้รับพิษจากแคดเมียมได้มาก^[699] ซึ่งแสดงว่า glutathione เป็นเปปไทด์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจับโลหะหนัก^[191, 651] และเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ phytochelatin^[163, 190]

4. ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) และหน้าที่ของไฟโตคีเลติน

cysteine เป็นส่วนหนึ่งของแกนของ phytochelatin และเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของ PCS^[514] ดังนั้นการสังเคราะห์ cysteine จึงมีความสำคัญกับการผลิต phytochelatin ด้วย และบางที cysteine อาจเป็นปัจจัยที่จำกัด ที่จะทำให้เกิดการสร้างสารตัวใหม่ ๆ ที่เหมาะสมต่อการลดพิษของโลหะหนักในพืชก็ได้

โดยพบว่าในพืชบางชนิดมีการเพิ่มปริมาณของเอนไซม์ O-acetylserine (thiol) lyase เป็นปริมาณมาก ซึ่งเอนไซม์นี้ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ cysteine โดยพบว่าพืชที่มีเอนไซม์ชนิดนี้มาก สามารถเจริญเติบโตในที่ที่มีแคดเมียมเข้มข้นสูงได้มากกว่าปกติ และจะสะสมแคดเมียมไว้ในใบได้มากกว่าปกติด้วย^[107]

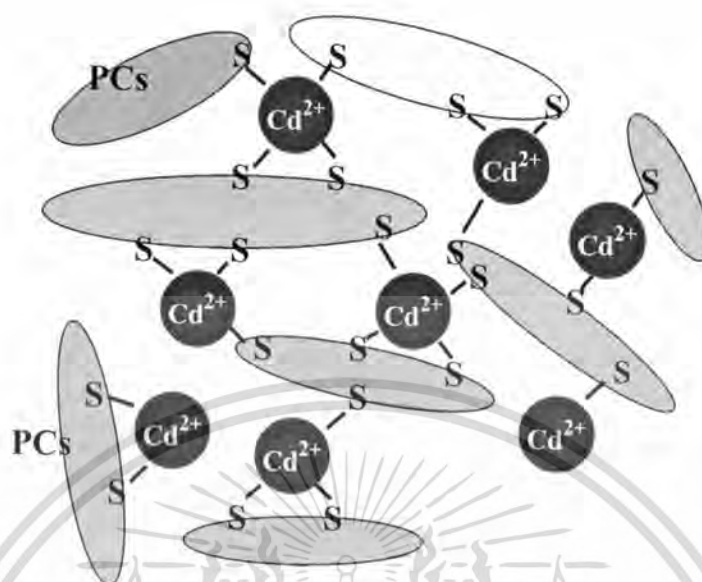
ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) จะพบในการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง phytochelatin กับโลหะ^[613] โดยซัลไฟด์ไอออนจะช่วยทำให้ phytochelatin จับตัวกับโลหะหนักได้เสถียรมากยิ่งขึ้น^[429] ซึ่งจะทำให้เพิ่มความสามารถในการลดพิษได้มากยิ่งขึ้นด้วย^[89]

การที่มีซัลไฟด์ไอออนอยู่ใน phytochelatin ทำให้สามารถแยกการจับของ phytochelatin กับโลหะหนักได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (ภาพที่ 4)

1) น้ำหนักโมเลกุลน้อย (low molecular weight/ LMW) โดยโลหะจับกับหมู่ไธออล ($-SH$)

2) น้ำหนักโมเลกุลมาก (high molecular weight/ HMW) โดยโลหะจับกับหมู่ธionatothiolate ของซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) และทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนและเกิดเป็นอนุภาค (particle) ขนาดเล็ก ๆ ขึ้นมา (ขนาดนาโนเมตร)^[429, 585]

ซึ่งแหล่งที่มาของซัลเฟอร์ไอออนยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่ามาจากที่ใด โดยอาจมีที่มาจาก sulfide oxidoreductase ซึ่งเป็นโปรตีนที่พบในพืชชนิดหนึ่งที่ได้รับแคดเมียม โดยจะทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณซัลไฟด์ให้มีมากพอในระหว่างที่ได้รับพิษจากโลหะหนัก^[649]



ภาพที่ 4 การจับตัวของ phytochelatin (PCs) กับ แคดเมียม (Cd^{2+}) โดยแคดเมียมมาจับกับอะตอมของซัลเฟอร์ (S) ได้ตั้งแต่ 1, 2, 3 หรือสูงสุดคือ 4 อะตอมจาก PCs โมเลกุลเดียว หรือหลายโมเลกุลก็ได้ ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนรูปร่างไม่แน่นอน

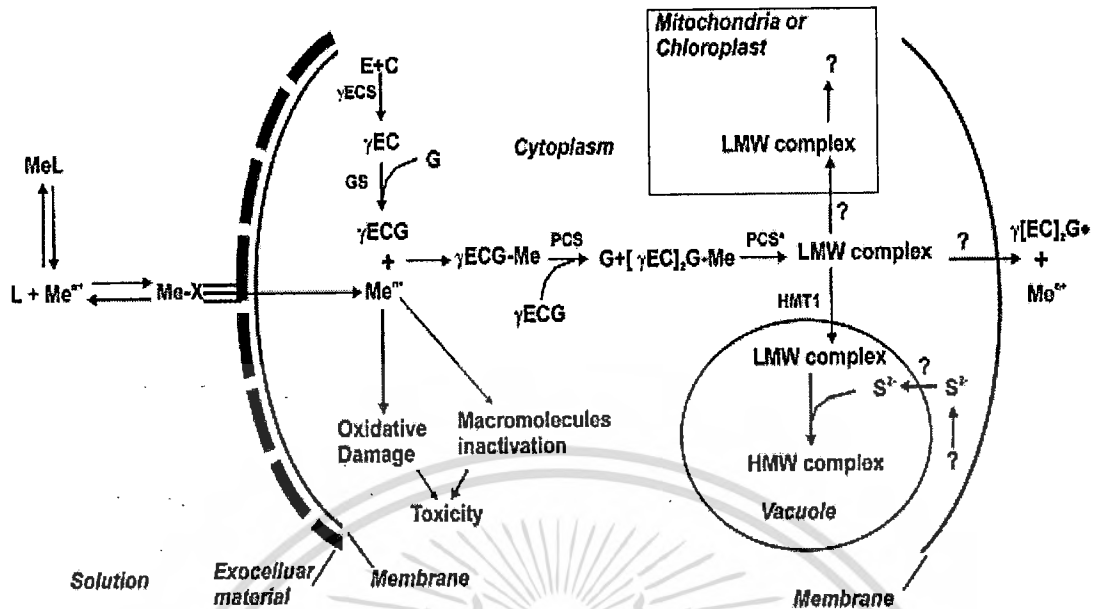
ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirata et al. (2005)^[184]

5. การแยกโลหะหนักและการนำไปยังแควคิวโอลในเซลล์

เมื่อ phytochelatin จับตัวกับโลหะหนักแล้ว จะนำไปไว้ยังแควคิวโอลในเซลล์เป็นตำแหน่งสุดท้าย ซึ่งได้มีการพบกลไกนี้ในสาหร่ายสีเขียว *Dunaliella bioculata*^[182] มานานแล้ว

โดยในยีสต์บางชนิดที่ไม่มีการสร้าง phytochelatin ที่จับกับโลหะหนักแบบที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (HMW) จะพบว่ามียีน *hmt1* ทำหน้าที่เป็นตัวพา phytochelatin ที่จับกับโลหะหนักแบบที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (LMW) ไปยังแควคิวโอลในเซลล์^[511]

ซึ่งกลไกการจับและการแยกโลหะหนักทั้งหมดแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กลไกการลดพิษของโลหะหนักในสาหร่ายโดย phytochelatin (PCs) หรือ class III metallothioneins (MtIII) ในสาหร่ายขนาดเล็ก โดย MeL คือโลหะเชิงซ้อนในสารละลาย (metal complex), Me^{n+} คือ ไอออนของโลหะหนัก, X คือ ลิแกนด์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิต, E คือ glutamic acid, C คือ cysteine, G คือ glycine, γEC คือ gamma glutamylcysteine, γECG คือ glutathione, $[\gamma EC]_2G$ คือ metallothionein $n = 2$, LMW คือ low molecular weight, HMW คือ high molecular weight, γECS คือ gamma glutamylcysteine synthetase, GS คือ glutathione synthetase, PCS คือ phytochelatin synthase, (HMT1) คือตัวขนส่งไปแวคิวโอลในเซลล์ vacuolar transporter, * คือเมื่อขั้นตอนนี้เกิดซ้ำจะทำให้สายของ phytochelatin ยาวขึ้น, • คือ phytochelatin ถูกแยกออกเมื่อถูกปล่อยออกสู่อาหารหรือน้ำที่ล้อมรอบเซลล์, ? คือ ยังไม่ทราบชัดเจน

ที่มา : Perales-Vela et al. (2006)^[531]

Phytochelatin ในสาหร่าย

1. การสังเคราะห์

ในสาหร่ายส่วนใหญ่จะพบว่าการสังเคราะห์ phytochelatin ที่มีค่า $n = 2$ ^[154] โดยในสาหร่ายนั้นสามารถกระตุ้นให้มีการสร้าง phytochelatin ได้โดยใช้ Cd^{2+} , Ag^+ , Bi^{3+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} และ Au^{2+} ^[564] โดยตัวอย่างพบว่าการสังเคราะห์ phytochelatin ใน *Scenedesmus acutiformis* ^[616] *Thalassiosira weissflogii* ^[7] *Scenedesmus subspicatus* ^[428]

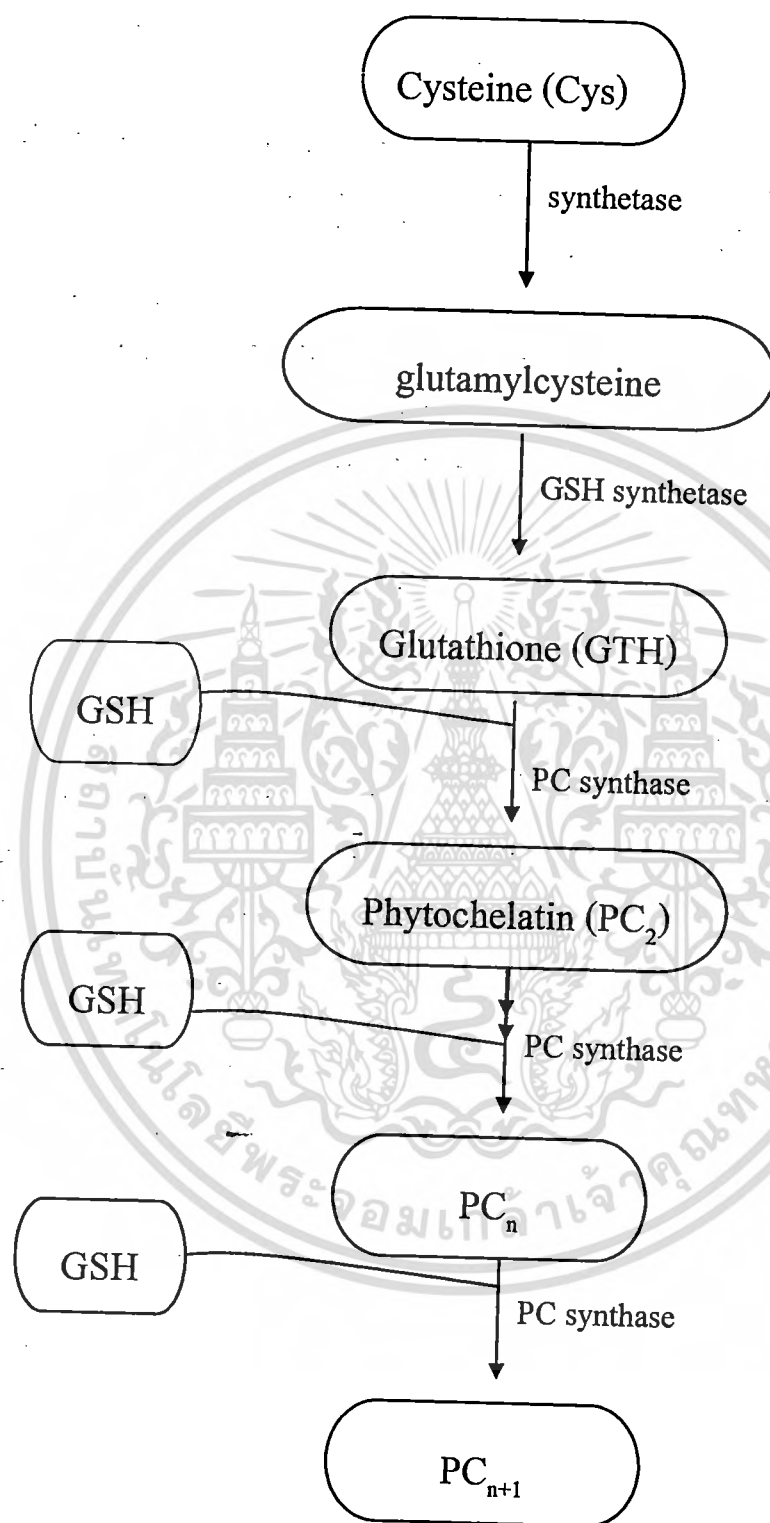
การสังเคราะห์ phytochelatin แบบง่าย ๆ คือ PC_2 (phytochelatin ที่มี $n=2$) สังเคราะห์โดย PC synthase (phytochelatin synthase) จากสองโมเลกุลของ glutathione (GSH) ซึ่ง GSH สร้างมาจาก cysteine (Cys) ผ่าน γ -glutamylcysteine (γ EC) การทำให้สายยาวขึ้นคือการทำซ้ำตามขั้นตอนเดิม (ภาพที่ 6)

2. หน้าที่ทางสรีรวิทยาของ phytochelatin

ในสาหร่ายบางชนิดพบว่าสามารถดำรงชีวิตหรืออาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงซึ่งอยู่ในระดับความเข้มข้นที่สามารถทำลายสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ ได้ แต่สาหร่ายนั้นกลับไม่เป็นอันตราย ซึ่งพบว่าสาหร่ายที่สามารถอยู่ในแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักเข้มข้นสูงได้นั้นเนื่องจากมี phytochelatin ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการลดพิษของโลหะหนัก ซึ่งตัวอย่างพบ phytochelatin ในสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กชนิด *Chlamydomonas reinhardtii* สามารถแยกแคะเมียมออกจากส่วนไซโทพลาซึมของเซลล์ได้มากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ^[191]

โดยในแหล่งน้ำธรรมชาติพบว่าปริมาณ phytochelatin ในแพลงก์ตอนพืชจะขึ้นกับแหล่งที่อยู่อาศัย โดยพวกที่อาศัยบริเวณชายฝั่งจะพบ phytochelatin ในเซลล์มากกว่าพวกที่อยู่ห่างจากฝั่ง เพราะบริเวณชายฝั่งเป็นบริเวณที่ได้รับโลหะหนักจากแผ่นดินมากกว่านั่นเอง ^[8]

และจากการทดลองนำสาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus acutus* 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ธรรมชาติ กับสายพันธุ์ที่ถูกปรับให้มีความทนต่อโครเมียม (Cr^{6+}) โดยเมื่อทั้ง 2 สายพันธุ์ได้รับพิษจากโลหะหนักที่ต่างชนิดไปคือแคะเมียม พบว่าในสายพันธุ์ที่มีความทนทานต่อโครเมียมจะสร้างปริมาณ cysteine เพิ่มขึ้นมากกว่าสายพันธุ์ปกติ และมีปริมาณ glutathione และ phytochelatin ลดลงมากกว่าสายพันธุ์ปกติ แสดงว่ามีการนำไปใช้ในการจับกับแคะเมียมเพื่อนำเข้าสู่แวคิวโอลในเซลล์ ^[635]



ภาพที่ 6 การสังเคราะห์ phytochelatin ทางชีวภาพ

ที่มา : Hirata et al. (2001)^[184]

นอกจากนี้ phytochelatin ในสาหร่ายขนาดเล็กยังอาจมีบทบาทที่สำคัญในการลด oxidative stress^[642] เช่นในสาหร่าย *Phaeodactylum tricornutum* ที่ได้รับพิษจากคอปเปอร์ พบว่าเมื่อสกัดเซลล์ออกมา ยังคงพบว่ามีไอออนอิสระของคอปเปอร์ที่ไม่ถูกจับด้วย phytochelatin อยู่ในเซลล์ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่ามี phytochelatin ในรูปออกซิไดซ์เกิดขึ้น ที่ได้เข้าไปทำหน้าที่ในการจับอนุพันธ์ออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยาได้ว่องไว (reactive oxygen species/ ROS) ออกจากเซลล์^[485, 486]

สำหรับที่มาของ ROS นั้น เกิดจากการใช้ออกซิเจนในขบวนการการสร้างพลังงาน ภายในเซลล์ ก่อให้เกิด ROS ซึ่ง ROS นี้สามารถทำลายเซลล์ได้ โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยา ลูกโซ่ทางเคมีที่อันตราย เช่น lipid peroxidation หรือ การออกซิไดซ์ DNA หรือโปรตีนของเซลล์ การทำลาย DNA สามารถทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของเซลล์

ในสาหร่ายสีเขียว *Dunaliella tertiolecta* ที่นำไปสัมผัสกับสังกะสีก่อนเพื่อกระตุ้นให้เกิดความทนทานต่อโลหะหนัก จากนั้นจึงได้รับพิษของแคดเมียม โปรท คอปเปอร์ ตะกั่ว และอาร์เซนิก พบว่าเซลล์ของสาหร่ายนั้นมีการสร้าง phytochelatin แต่ phytochelatin นี้ทำหน้าที่กำจัด ROS ซึ่งกำจัดได้มีประสิทธิภาพสูงกว่า glutathione^[642]

ในสาหร่าย สีเขียว *Dunaliella tertiolecta* พบว่าสังกะสีสามารถชักนำให้เกิดการสร้าง phytochelatin ได้ดีกว่าแคดเมียม โดยแคดเมียมจะกระตุ้น phytochelatin synthase ได้ดีกว่าสังกะสี แต่สังกะสีจะกระตุ้น γ -glutamylcysteine synthetase และ glutathione synthetase ได้ดีกว่าแคดเมียม โดยพบว่าสังกะสีจะทำให้เกิด ROS ในเซลล์ได้มากกว่าแคดเมียม จึงกระตุ้นให้สร้าง γ -glutamylcysteine synthetase และ glutathione synthetase จึงทำให้มีการสังเคราะห์ glutathione ได้มากขึ้นนั่นเอง^[641]

นอกจากนี้ phytochelatin ยังมีหน้าที่ในการรักษาสสมดุลของแร่ธาตุที่จำเป็นต่อเซลล์และรักษาเมแทบอลิซึมของซัลเฟอร์ในเซลล์ด้วย^[78, 555, 564]

3. ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-})

บทบาทของซัลไฟด์ไอออนยังไม่เป็นที่เข้าใจกันมากนักว่ามีหน้าที่อะไรในสาหร่าย แต่พบว่าเมื่อมีโลหะหนักที่เป็นพิษ จะทำให้เมแทบอลิซึมของซัลไฟด์ทำงานผิดปกติ เช่นพบในสาหร่าย *Skeletonema costatum* และ *Tetraselmis suecica* ซึ่งสาหร่ายนี้จะเก็บโลหะในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ ซึ่งอาจเป็น phytochelatin แต่พบอยู่ในรูปของเกลือที่ไม่ละลายน้ำอยู่ในไซโทพลาซึม^[534]

จากการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus acutus* ในอาหารที่มีแคดเมียมเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่า สาหร่ายนี้สามารถผลิต cysteine และ glutathione ได้มากกว่าสาหร่ายที่เลี้ยงในภาวะปกติ^[635]

ไดอะตอม *Phaeodactylum tricornutum* ที่สัมผัสกับแคดเมียม จะมีการสร้างสาร phytochelatin และจับกับแคดเมียม โดยพบว่าซัลไฟด์ไอออนทำให้การจับตัวของ phytochelatin กับแคดเมียมมีความคงตัวมากขึ้นและเกิดเป็นอนุภาคนาขนาดเล็ก ๆ ขึ้นมา^[585]

ในการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii* ในอาหารที่มีแคดเมียม จะทำให้มีการนำเข้าสู่เซลล์ได้มากและเร็วขึ้น และพบส่วนประกอบของ cysteine synthase complex ในเซลล์ เช่นพบการทำงานของ serine acetyltransferase และ O-acetyl-L-serine (thiol) lyase^[106, 109]

4. การแยกโลหะหนักไปไว้ในแวคิวโอล

ในสาหร่ายยังไม่พบรายงานที่ชัดเจนของการที่ phytochelatin จับกับโลหะหนักและนำเข้าไปไว้ในแวคิวโอล แต่พบกลไกการลดพิษอื่น ๆ ที่นำโลหะหนักไปยังแวคิวโอล ในสาหร่าย เช่น

ในสาหร่ายสีเขียว *Dunaliella bioculata* เมื่อสัมผัสกับแคดเมียมที่ระดับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าในแวคิวโอลมีแคดเมียมและซัลเฟอร์อยู่ในอัตราส่วน 2: 2.4^[182]

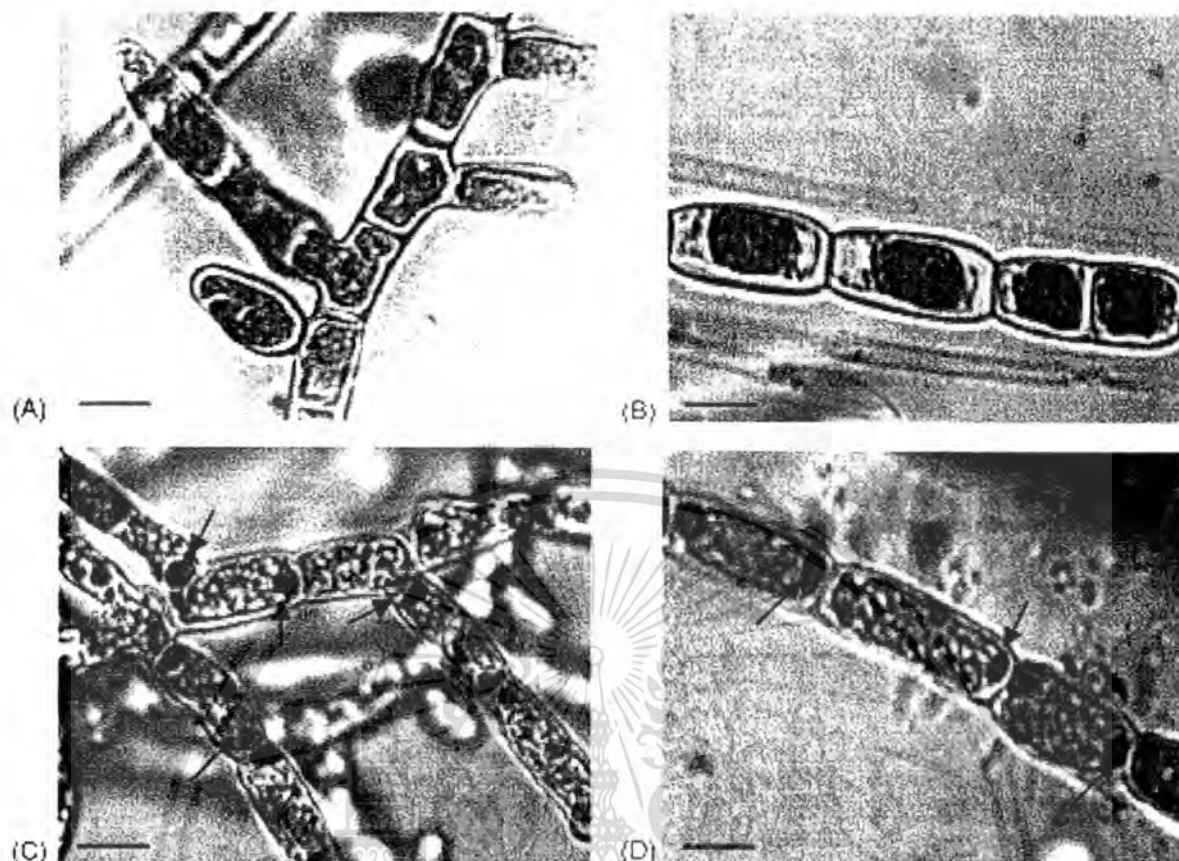
สาหร่ายสีเขียว *Tetraselmis suecica* ที่สัมผัสกับแคดเมียม จะมีแคดเมียมตกตะกอนกับแคลเซียมและซัลเฟอร์อยู่ในแวคิวโอลด้วย^[40]

ในไดอะตอม *Skeletonema costatum* เมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีแคดเมียมและคอปเปอร์อยู่ พบว่ามีการสะสมแคดเมียมและคอปเปอร์ไว้ในแวคิวโอล โดยพบรวมอยู่กับซัลเฟอร์ ในอัตราส่วน ซัลเฟอร์ต่อโลหะ เท่ากับ 1.5^[500]

ในสาหร่าย *Stigeoclonium tenue* เพื่อได้รับสังกะสี พบว่าเมื่อมีการสัมผัสเป็นระยะเวลานาน เซลล์สาหร่ายจะมีการนำตะกอนสังกะสีไปไว้ในแวคิวโอล (ภาพที่ 7) โดยพบทั้งในเซลล์ที่ทนสังกะสีได้มาก และทนได้น้อย^[527]

5. การแยกโลหะหนักไปสู่คลอโรพลาสต์และไมโทคอนเดรีย

ในสาหร่ายบางชนิดเช่น *Euglena gracilis* พบว่าเป็นพวกที่ไม่มีแวคิวโอลในเซลล์ แต่มีความสามารถในการทนและสามารถสะสมแคดเมียมได้สูง^[475] ซึ่งแสดงว่าต้องมีกลไกอื่นช่วยในการสะสมหรือกำจัดโลหะหนัก นอกจากการนำไปไว้ในแวคิวโอลเหมือนสาหร่ายอื่น ๆ ซึ่งพบว่าใน *E. gracilis* สะสมแคดเมียมไว้ในคลอโรพลาสต์ได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ของแคดเมียมทั้งหมดในเซลล์ ซึ่งการสะสมนี้สัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณของสารประกอบไทออล และซัลไฟด์ในคลอโรพลาสต์ ซึ่งเพิ่มมากขึ้นกว่าสาหร่ายปกติถึง 4.4 เท่า และยังพบว่าในคลอโรพลาสต์ของสาหร่ายที่ได้รับแคดเมียม มีปริมาณ phytochelatin สูงกว่าสาหร่ายปกติ และพบ glutathione และ γ -EC มากกว่า 66 เปอร์เซ็นต์ ของไทออลอินทรีย์ทั้งหมด (organic thiol)^[476]



ภาพที่ 7 แสดงการดกตะกอนของสังกะสีในเซลล์สาหร่าย *Stigeoclonium* โดยภาพ A คือ เซลล์ปกติ (T), ภาพ B คือเซลล์ (T) ที่ได้รับสังกะสี 15 ไมโครโมล 2 วัน, ภาพ C คือ เซลล์ (T) ที่ได้รับสังกะสี 15 ไมโครโมล 6 สัปดาห์, ภาพ D คือ เซลล์ (S) ที่ได้รับสังกะสี 15 ไมโครโมล 6 สัปดาห์, T คือสายพันธุ์ที่มาจากแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อน, S คือ สายพันธุ์ที่มาจากแหล่งน้ำที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน, ในภาพลูกศรชี้แสดงการดกตะกอนของสังกะสีในแวคิวโอล

ที่มา : Pawlik-Skowronska (2003)^[527]

ส่วนการนำ *E. gracilis* ไปผ่านการสัมผัสปรอท (Hg^{2+}) เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับเซลล์ และนำมาสัมผัสกับแคดเมียม พบว่ามีแคดเมียมสะสมอยู่ในไมโทคอนเดรีย 79 เปอร์เซ็นต์ ของ แคดเมียมในเซลล์ทั้งหมด และพบการเพิ่มขึ้นของ cysteine และ glutathione อย่างเด่นชัด และ พบ phytochelatin ในไมโทคอนเดรียประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ของ phytochelatin ทั้งหมดที่พบในเซลล์^[34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ซึ่งการที่พบ phytochelatin และแคดเมียมในคลอโรพลาสต์และไมโทคอนเดรียของ *Euglena* นั้นอาจมีขบวนการที่เกิดขึ้นได้อยู่ 3 แบบคือ^[475]

1. มีการสังเคราะห์ phytochelatin ในไซโทพลาซึม ซึ่งเป็นที่ที่มีแคดเมียมอยู่ จากนั้น phytochelatin จับตัวกับแคดเมียมเป็นสารเชิงซ้อน แล้วจะถูกขนส่งไปไว้ที่คลอโรพลาสต์และไมโทคอนเดรีย

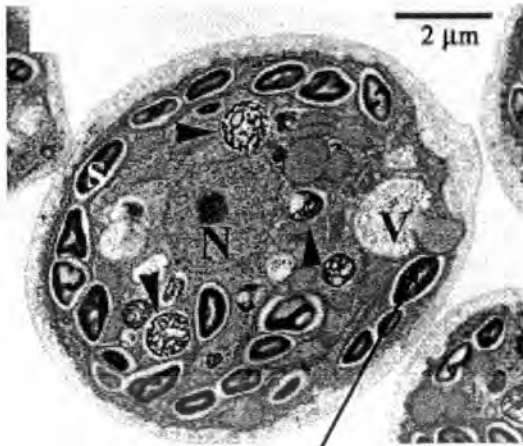
2. phytochelatin ถูกสังเคราะห์ขึ้นภายในออร์แกเนลล์ที่ซึ่งมีการจับกับแคดเมียมเกิดขึ้น โดยเมื่อมีแคดเมียมที่อยู่ในรูปไอออนอิสระเข้าไปในออร์แกเนลล์ใด ในออร์แกเนลล์นั้นก็จะมีการสังเคราะห์ phytochelatin ขึ้นมาและจับตัวกับแคดเมียมในรูปที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (HWM)

3. ทั้งสองขบวนการที่กล่าวมา เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน และ phytochelatin ถูกสังเคราะห์ขึ้นทั้งในส่วนไซโทพลาซึม คลอโรพลาสต์ และไมโทคอนเดรีย

ในสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii* พบว่าสะสมแคดเมียมในคลอโรพลาสต์ได้ 60 เปอร์เซ็นต์ และพบ phytochelatin ที่จับกับแคดเมียมในคลอโรพลาสต์ด้วย และที่น่าสนใจมากคือ พบว่ามี phytochelatin ที่สร้างขึ้นโดยการทำงานของ cDNAs และ glutathione synthetase ในไมโทคอนเดรีย^[498]

นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายสีเขียวชนิด *Oocystis nephrocystioide* ที่สัมผัสกับคอปเปอร์ จะสะสมคอปเปอร์ไว้ในไทลาคอยด์และไพรีนอยด์ ในปริมาณที่สูง^[607] ซึ่งเป็นเพราะคอปเปอร์ถูกจับโดยลิแกนด์ที่อยู่บนคลอโรพลาสต์ และบางทีคอปเปอร์อาจถูกขนส่งไปจากไซโทพลาซึมสู่คลอโรพลาสต์ในรูปของคอปเปอร์ที่จับอยู่กับลิแกนด์ก็ได้ (Cu^{2+} -ligand complex)

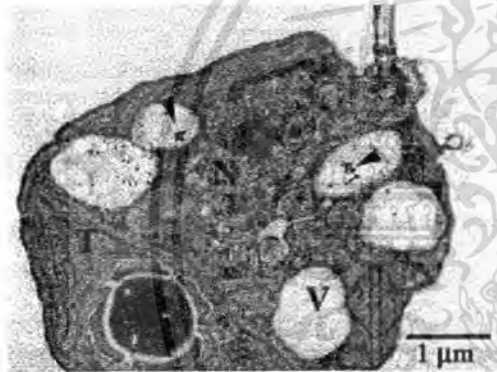
สาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas acidophila* ที่ได้รับแคดเมียม พบว่าปริมาณ phytochelatin ไม่สัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมที่สะสม แต่พบว่าปริมาณ glutathione ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับการสะสมแคดเมียม และพบว่าสายพันธุ์ที่ทนแคดเมียมได้น้อยจะมีเม็ดแป้งกระจายอยู่ในคลอโรพลาสต์เพิ่มขึ้นสูงมาก เป็นผลทำให้เข้าสู่ระยะที่เซลล์ใกล้ตาย สายพันธุ์ที่สะสมแคดเมียมได้มากจะไม่เพิ่มเม็ดแป้ง แต่จะสะสมแคดเมียมไว้ในคลอโรพลาสต์ ไซโทพลาซึม และแวคิวโอล^[503] (ภาพที่ 8)



เซลล์ได้รับแคดเมียม 60 ไมโครโมล
1 วัน มีการเพิ่มเม็ดแป้ง (ก่อนสีด้าที่บ
มีเป็นจำนวนมาก)



เซลล์ได้รับแคดเมียม 60 ไมโครโมล
4 วันมีการเพิ่มเม็ดแป้ง



เซลล์ได้รับแคดเมียม 60 ไมโครโมล
1 วัน ไม่มีการเพิ่มเม็ดแป้ง



เซลล์ได้รับแคดเมียม 60 ไมโครโมล
4 วันไม่มีการเพิ่มเม็ดแป้ง



เซลล์ได้รับแคดเมียม 6 ไมโครโมล
1 วัน มีการเพิ่มเม็ดแป้งบ้าง

ลูกศรแสดงการตกตะกอนของ
แคดเมียมซึ่งเห็นเป็นก้อนสีดำ

ตัวย่อ N คือ นิวเคลียส, P คือ ไพรีนอยด์,
S คือ เม็ดแป้ง, V คือ แวคิวโอล,
T คือ ไทลาคอยด์

ภาพที่ 8 แสดงการตกตะกอนของแคดเมียมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเซลล์ของ

Chlamydomonas

ที่มา : Nishikawa et al. (2006)^[503]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

6. ความยาวของสาย phytochelatin

โดยปกติแล้ว phytochelatin ที่มีสายยาวจะจับกับโลหะหนักได้แข็งแรงและเสถียรมากกว่าพวกที่มีสายสั้น ในไดอะตอม *Phaeodactylum tricornutum* ซึ่งเป็นชนิดที่ทนทานต่อแคดเมียมได้สูงมาก พบว่ามีความยาวของสาย phytochelatin อยู่ระหว่าง $n=5$ ถึง 9 ^[633] และในสาหร่ายชนิดนี้พบว่าตะกั่วสามารถชักนำให้สายของ phytochelatin ยาวขึ้นได้มากกว่าปกติ แต่อย่างไรก็ตามยังชักนำได้น้อยกว่าแคดเมียม^[485] และในสาหร่ายชนิดนี้คอปเปอร์สามารถชักนำ phytochelatin ให้มีค่า $n=2$ เท่านั้น^[560]

การนำสาหร่ายสีเขียว *Stigeoclonium* สองสายพันธุ์คือ สายพันธุ์ที่แยกจากเหมืองที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก กับสายพันธุ์จากแหล่งน้ำที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน จากนั้นนำทั้งสองสายพันธุ์มาสัมผัสกับสังกะสีที่พีเอช 8.2 พบว่าสาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์สร้าง phytochelatin ได้ที่ $n=2$ และ 3 และเมื่อปรับระดับพีเอชของสารละลายให้มีพีเอชลดลงเป็น 6.8 พบว่ามีการสร้าง phytochelatin เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และความยาวของสาย phytochelatin เพิ่มขึ้นเป็น $n=4$ โดยถ้าได้รับโลหะหนักเพียงอย่างเดียวและไม่ได้รับไบคาร์บอเนต สาหร่ายจะสร้าง phytochelatin ได้มากกว่า^[526]

ในสาหร่ายสีเขียว *Dunaliella tertiolecta* เมื่อสัมผัสกับสังกะสี พบว่ามีค่าความยาวของ phytochelatin ที่ $n=5$ ^[185]

นอกจากนี้ยังพบว่าการที่ไดอะตอม *Phaeodactylum tricornutum* สามารถทนต่อความเข้มข้นของแคดเมียมหรือโลหะหนักได้สูงนั้น ไม่เพียงแต่เป็นเพราะการเพิ่มการผลิต phytochelatin เท่านั้นแต่ยังรวมถึงการเพิ่มความยาวของสาย phytochelatin ด้วย^[633]

7. กลไกการลดพิษของโลหะหนักโดย phytochelatin และกลไกอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในเซลล์สาหร่ายนอกจากใช้ phytochelatin ในการกำจัดโลหะหนักแล้ว ยังมีกลไกอื่น ๆ ที่มีหน้าที่ช่วยควบคุมความสมดุลของโลหะหนักในเซลล์กับสิ่งแวดล้อม เพื่อไม่ให้มีโลหะหนักเข้มข้นมากเกินไปจนสมดุลของเซลล์

เช่นพบว่าในไดอะตอมและไดโนแฟลเจลเลตที่มีความสามารถในการทนต่อพิษของโลหะหนักได้สูงนั้นนอกจากสามารถสร้าง phytochelatin ได้แล้ว ยังสามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์และปล่อยออกมานอกเซลล์ซึ่งทำหน้าที่จับโลหะหนัก ป้องกันไม่ให้โลหะหนักเข้าสู่เซลล์^[539] ซึ่งกลไกนี้เป็นคุณสมบัติที่มีในสาหร่ายขนาดเล็กทุกชนิดและกลไกนี้ไม่เพียงแต่เกิดกับการลดพิษโลหะหนักเท่านั้น แต่ยังเกิดกับพิษประเภทอื่น ๆ ด้วย เช่นพิษพวก dichlorophenol^[462]

นอกจากนี้ยังพบมีกลไกของการเพิ่มโมเลกุล -SH ที่ทำหน้าที่กำจัด reactive oxygen species- ROS เช่นในไดอะตอม *Ditylum brightwellii* และ *Thalassiosira pseudonana* เมื่อได้รับความเครียดจากโลหะหนักชนิด คอปเปอร์ สังกะสี แคดเมียม จะตอบสนองโดยเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

กิจกรรมการทำงานของ -SH โมเลกุลเพื่อทำหน้าที่กำจัด ROS ซึ่งใน *T. pseudonana* จะมีปริมาณของสาร -SH ปริมาณ phytochelatin และปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์สูงกว่า จึงสามารถทนต่อพิษของโลหะหนักได้มากกว่า *D. brightwellii*^[561]

บางครั้งพบว่าในสาหร่ายบางชนิด phytochelatin ไม่สามารถจับกับโลหะหนักได้โดยตรง เช่นในสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii* ซึ่งได้รับปรอท Hg^{2+} พบว่า phytochelatin ไม่สามารถจับกับปรอทได้ แต่พบว่า glutathione จะทำหน้าที่ในการลดพิษของปรอทแทน โดยไม่เพียงแต่ทำหน้าที่ให้ γ Glu-Cys สำหรับสังเคราะห์ phytochelatin เท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นโมเลกุลลดพิษของโลหะหนักได้ด้วยตัวเองโดยการเข้าไปจับโดยตรงกับโลหะหนักแล้วทำให้โลหะหนักตกตะกอน^[191]

ในสาหร่ายสกุล *Tetraselmis* พบว่ามีการสร้าง phytochelatin ได้เช่นกัน^[7, 534] แต่ *Tetraselmis tetraele* พบว่าเมื่อได้รับความเครียดจากปรอท กลับไม่สร้าง phytochelatin ทั้ง ๆ ที่มีการลดลงอย่างมากของ glutathione ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ phytochelatin แต่กลับพบว่าการสร้างสาย tripeptide ขึ้นมาใหม่ในรูป Arg-Arg-Glu ซึ่งมีความสามารถในการจับกับปรอทได้ จึงอาจเป็นไปได้ว่าเป็นวิธีลดพิษอีกแบบหนึ่ง^[582]

ส่วนใน *Stigeoclonium tenue* ที่สัมผัสกับสังกะสีและตะกั่ว สามารถสร้างสายเปปไทด์ที่คล้ายกับ phytochelatin ขึ้นมา แต่มีหมู่ -SH มากกว่า phytochelatin อยู่ 1 กลุ่ม^[527, 528]

นอกจากนี้ยังพบว่าในสาหร่ายยังมีกลไกการลดพิษอีกวิธีหนึ่งคือการสร้าง proline (Pro)^[37, 116, 550, 639] โดยพบว่า proline ใน *Chlamydomonas reinhardtii* ทำหน้าที่เป็น antioxidant ในเซลล์ที่ได้รับความเครียดจากแคดเมียม^[603]

8. เมทัลโลไทโอนีนในสาหร่าย

ในพืชชั้นสูงจะพบทั้ง MtlI และ MtlII แต่การจะพบตัวใดนั้นยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน แต่มีการคาดการณ์ว่าการจะพบตัวใดน่าจะขึ้นกับอายุของพืช ชนิดเอนไซม์ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ glutathione ชนิดโลหะหนักว่าจำเป็นหรือไม่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต^[586]

ในสาหร่ายพบเมทัลโลไทโอนีน MtlI ในสาหร่ายบางชนิดเท่านั้น เช่นในสาหร่ายสีน้ำตาล *Fucus vesiculosus* พบว่า phytochelatin (PCs/ MtlII) ทำหน้าที่ตอบสนองต่อพิษของแคดเมียมแต่กลับไม่ตอบสนองต่อพิษของคอปเปอร์^[414] แต่พบว่าในสาหร่ายชนิดเดียวกันนี้ MtlI จะทำหน้าที่ตอบสนองในการลดพิษเมื่อได้รับพิษของคอปเปอร์^[490] ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งว่ากลไกการทำงานของ MtlI และ MtlII นั้นแตกต่างกันอย่างไร ในการตอบสนองต่อพิษของโลหะหนัก

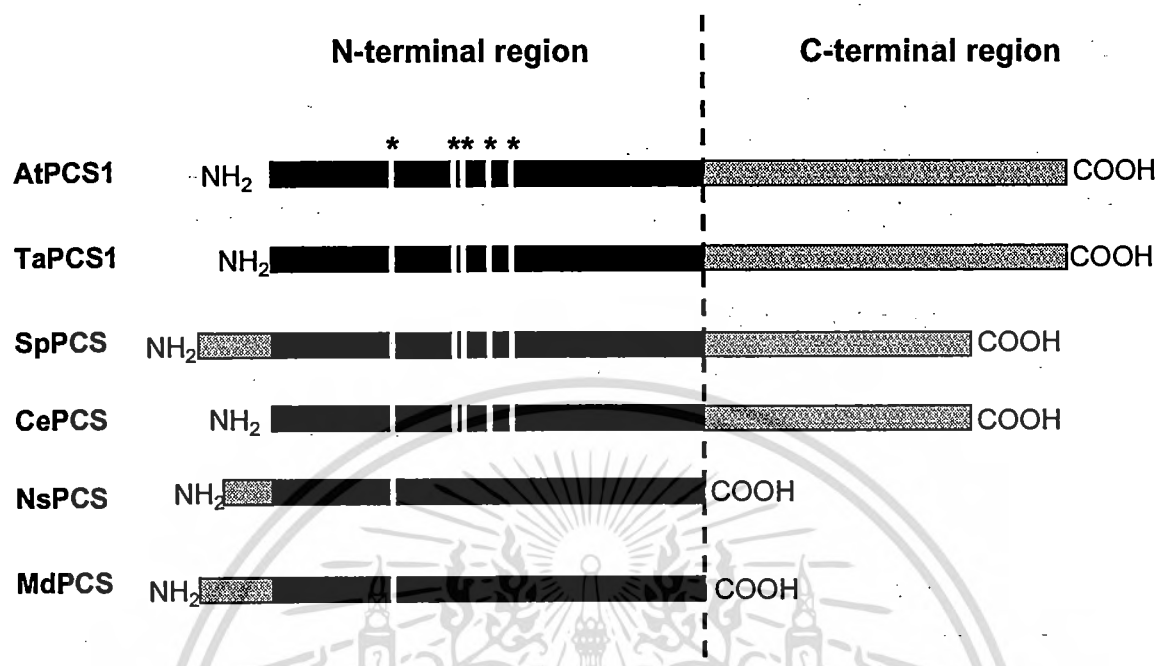
9. ไฟโตคีเลตินในสาหร่ายกลุ่มโปรคาริโอต

ในอดีตได้มีรายงานว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Anacystis nidulans* ที่มีชีวิตสามารถสร้างสารในเซลล์มาจับแคดเมียมภายในเซลล์ไม่ให้ปนพิษกับเซลล์ได้ ซึ่งในช่วงนั้นไม่มีรายงานว่าเป็นสารประเภทใด ต่อมานักวิจัยพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Anabaena doliololum* สามารถสังเคราะห์โปรตีนที่มีน้ำหนักเบามาจับกับแคดเมียมในเซลล์เพื่อให้เซลล์ไม่เป็นพิษได้^[460] พบมีรายงานว่า *Nostoc linckia* ที่เลี้ยงในน้ำเสียที่มีสังกะสี และแคดเมียมปนเปื้อนในความเข้มข้นที่ไม่สูงเกินไปนั้น สาหร่ายยังสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้เพราะมีการสร้างโปรตีนขึ้นมาจับกับโลหะหนักนั่นเอง^[115]

ตามปกติจะพบการสร้าง phytochelatin ได้ในกลุ่มยูคาริโอตที่สังเคราะห์แสงได้ และฟังก์ไอบางกลุ่ม แต่ไม่นานมานี้ได้พบว่ามีโปรคาริโอตบางชนิดที่พบว่ามียีนที่ทำหน้าที่สร้างโปรตีนที่มีลักษณะคล้าย phytochelatin synthase เช่นพบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Nostoc*, *Anabaena*, *Prochlorococcus marinus*, *Anabaena variabilis*, *Nostoc punctiforme* และ *Trichodesmium erythraeum*

ซึ่งโปรตีนที่มีลักษณะคล้าย phytochelatin synthase ที่สร้างโดยการทำงานของยีน ในกลุ่มโปรคาริโอตคือมีส่วน N-terminal region เหมือน phytochelatin synthase ของยูคาริโอต แต่ขาด cysteine ไป 4 ตำแหน่ง จาก 5 ตำแหน่ง (ภาพที่ 9) โดยใน *Nostoc* (โปรคาริโอต) จะพบโปรตีนที่มีลักษณะคล้าย phytochelatin synthase ที่สร้างจากการทำงานของยีน alr0975

ถึงแม้ยีน alr0975 ของ *Nostoc* จะทำหน้าที่สร้างโปรตีน (NsPCS) ที่เหมือนกับ phytochelatin synthase ของยูคาริโอต แต่พบว่าเมื่อ *Nostoc* ได้รับแคดเมียม alr0975 จะเพียงแต่สามารถช่วยกระตุ้นให้ glutathione เปลี่ยนเป็น γ -glutamylcysteine (γ -EC) และจะกระตุ้นการสังเคราะห์ phytochelatin ในขั้นถัดได้น้อยมาก และไม่พบการสะสมของ phytochelatin เกิดขึ้นในเซลล์ *Nostoc*^[643] แต่พบว่ายีน alr0975 นี้ สามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้าง phytochelatin ได้ใน *E. coli* ดังนั้น NsPCS จึงเหมือนกันเป็นรูปแบบพื้นฐานดั้งเดิม (primitive form) ของ phytochelatin synthase ที่พบในยูคาริโอต



ภาพที่ 9 แสดงสายของ phytochelatin synthases (PC synthase) ที่พบในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ

โดยลำดับได้มาจาก *Arabidopsis thaliana* (AtPCS1, AF135155),

Triticum aestivum (TaPCS, AF093252),

Schizosaccharomyces pombe (SpPCS, Z68144),

Caenorhabditis elegans (CePCS, AF299333),

Nostoc sp. PCC7120 (NsPCS, AB162106), และ

Microbulbifer degradans 2-40 (MdPCS, ZP_00315875)

ตำแหน่งของ cysteine ในด้าน N-terminal region แสดงโดยเส้นช่องว่างในแนวตั้ง และมีดอกจันทร์กำกับ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirata et al. (2005)^[184]

การแพร่ผ่านของผนังเซลล์สาหร่าย^[611, 620]

การแพร่ผ่านของผนังเซลล์สาหร่าย (algal permeability) โดยพบว่านอกจากผนังเซลล์ของสาหร่ายจะทำหน้าที่ในการจับโลหะหนักไว้ที่ผนังแล้ว พบว่าผนังเซลล์ยังมีหน้าที่ให้โลหะหนักแพร่ผ่านได้อีกด้วย โดยพบมีโลหะหนักบางส่วนที่สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์สาหร่ายผ่านทางผนังเซลล์ได้ โดยหากต้องการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักจะพบว่าการแพร่ผ่านผนังเซลล์ของสาหร่ายมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการกำจัดโลหะหนักอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

บทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

มาก ซึ่งการทำงานของเซลล์สาหร่ายที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียคือการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์และนำเข้าสู่เซลล์นั่นเอง ซึ่งการนำเข้าสู่เซลล์จะเกี่ยวข้องกับ permeability หรือการเลือกผ่านของเยื่อเซลล์เป็นหลัก

ผนังเซลล์สาหร่ายเป็นเสมือนเยื่อเลือกผ่านที่มีคุณสมบัติเป็น permeability เป็นที่ผ่านเข้าออกของสารทั้งแบบ passive คือไม่ใช้พลังงาน และ active คือใช้พลังงาน โดยการแพร่แบบแรกคือการแพร่ผ่านของสารหรือตัวถูกละลายแบบไม่ใช้พลังงาน ซึ่งการแพร่ผ่านแบบนี้ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร และแบบที่สอง คือใช้พลังงานที่อยู่นอกเซลล์ในการนำเข้าสู่หรือใช้แรงออสโมติกหรือแรงแม่เหล็ก

การศึกษา permeability จะวัดค่าได้จากปริมาณสารหรือแร่ธาตุที่ผ่านเข้าเซลล์และเทียบเป็นต่อหน่วยพื้นที่ผิวที่เท่ากัน จึงจะเทียบค่า permeability ระหว่างชนิดสาหร่ายได้ และการศึกษาต้องขึ้นกับเวลาและแรงในการผลักดันสารเข้าเซลล์ที่เท่ากันด้วย

การหาค่าการแพร่ผ่านที่สมบูรณ์คือการหาค่า permeability constant (K) หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ผ่าน ซึ่งหมายถึงปริมาณของสาร substance (dm) ที่ผ่านผนังเซลล์ของหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา (t) เมื่อแรงผลักดัน (driving force) สำหรับการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับหนึ่ง สำหรับสารที่ไม่มีประจุแรงผลักดันในการเคลื่อนที่คือความแตกต่างของความเข้มข้น ΔC ดังนั้นสำหรับผนังเซลล์ที่มีพื้นที่ผิว (surface area) เป็น A ค่าคงที่ของการแพร่ผ่านคือ

$$K = (dm/dt) \times (1/A) \times (1/\Delta C)$$

โดยมีหน่วยเป็นความยาวต่อระยะเวลา

1. คุณสมบัติการเลือกผ่านของเซลล์สาหร่าย

สาหร่ายในแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติในการให้สารแพร่ผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นกับความต้องการสารต่าง ๆ ของเซลล์และคุณสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยเมื่อมีการแพร่ผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์สิ่งที่จะเกิดขึ้นกับเซลล์แบ่งออกเป็น 3 แบบ หลัก ๆ คือ

- plasmolysis คือการหดตัวหรือเหี่ยวตัวของโปรโทพลาสต์ (protoplast) แยกจากผนังเซลล์ (protoplast concave)
- cytorrhysis คือการเหี่ยวหรือหดตัวของเซลล์ทั้งเซลล์ (shrinkage of cell)
- plasmoptysis คือการแตกของเซลล์ (bursting open of the cell)

โดยลักษณะการเลือกผ่านของเซลล์สาหร่ายในแต่ละกลุ่มมีดังนี้

1.1. กลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน/ไซยาโนแบคทีเรีย (Division Cyanophyta)

- เซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะแตกต่างจากสาหร่ายกลุ่มอื่นมาก เนื่องจากมีส่วนของโปรโทพลาสซึม (protoplast) กับส่วนของผนังเซลล์อยู่ติดกัน ไม่มีช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าบทที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเซลล์ และในบางครั้งพบว่าในส่วนของโพรโทพลาซึมมีค่าความหนืด (viscosity) สูง

- เมื่อนำเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมาใส่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารในสารละลายมากกว่าความเข้มข้นของสารภายในเซลล์สาหร่าย (hypertonic solution) เซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมักจะไม่เกิดการหดตัวหรือเว้าตัวของ protoplast (plasmolysis) แยกจากผนังเซลล์เหมือนสาหร่ายทั่ว ๆ ไป แต่จะเกิดการเหี่ยวหรือหดตัวของเซลล์ทั้งเซลล์แทน ถ้าหากเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย พบว่าทั้งเส้นสายจะมีการเกิดรอยบาก รอยเว้า หรือเกิดการหดตัวของเซลล์ แต่พบว่าในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดหากมีการเกิด plasmolysis ขึ้น จะพบส่วนของ protoplast มีลักษณะรูปร่างเว้าเข้าด้านใน (concave)
- การเกิดการหดตัวของโพรโทพลาสต์เป็นปัญหาที่รุนแรงที่สามารถทำลายเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ ดังนั้นการศึกษากการพินตัวหรือการคินตัวของเซลล์จากการหดตัวจึงเป็นประโยชน์ แต่พบว่าเป็นเรื่องยากเนื่องจากการแพร่ผ่านเยื่อเซลล์สาหร่ายมีวิธีมากมายและแตกต่างกัน และนอกจากนี้ยังพบว่าภายในเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีส่วนของ colloid หรือมีระบบ colloidal system ซึ่งสามารถที่จะทำให้เซลล์มีลักษณะบวมหรือขยายขนาดใหญ่ขึ้นได้ซึ่งช่วยให้เซลล์เกิดการคินตัวจากการเหี่ยวหรือหดของเซลล์ ดังนั้นในการศึกษาเมื่อนำเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินไปใส่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จึงระบุได้ยากกว่าการที่เซลล์เปลี่ยนแปลงขนาดไปนั้น จะมีความสัมพันธ์ระหว่างการนำน้ำกลับเข้าเซลล์และค่าแรงดันออสโมติกอย่างไร
- ค่า permeability constant (K) ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบว่าค่านี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวถูกละลายที่อยู่ภายในสารละลาย ซึ่งตัวถูกละลายเหล่านี้สามารถผ่านเข้าผนังเซลล์ได้โดยการกรอง (filtration) นั่นคือสารที่มีอนุภาคเล็กกว่าช่องว่างที่ผนังเซลล์จึงจะสามารถผ่านเข้าเซลล์ได้
- การศึกษาในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบว่าเมื่อย้ายเซลล์จาก glycerol ไปแช่ในน้ำ เซลล์จะเกิดการแตก นั่นเป็นเพราะน้ำแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์อย่างรวดเร็วมากทำให้เซลล์ขยายจนแตกออก
- การแพร่ผ่านของสี (dyes) พวก methylene blue และ toluidine เข้าเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพวกที่เป็นเส้นสาย พบว่าสีจะแพร่เข้าได้ทางเซลล์ปลายสุดของเส้นสาย และผ่านทางผนังเซลล์ทางด้านแนวขวาง (cross wall) เท่านั้นไม่สามารถเข้าทางผนังเซลล์ด้านแนวยาวของเส้นสายได้ (longitudinal wall) แต่ถ้าเป็นสีประเภทอื่นสามารถแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้ทุกเซลล์และทุกตำแหน่งตลอดทั้งเส้นสาย

1.2. สาหร่ายสีแดง (Division Rhodophyta)

- สาหร่ายสีแดงสามารถเกิดการหดตัวของโพโทพลาสต์ได้ง่าย
- สีแพร่เข้าไปในส่วนของโพโทพลาสซึมและไปสะสมอยู่ในแวคิวโอล
- เมื่อนำสาหร่ายสีแดงไปใส่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ KCl สูงมาก (hypertonic solution) พบว่าส่วนโพโทพลาสซึมของสาหร่ายจะหดตัว
- สาหร่ายสีแดงให้ K^+ แพร่ผ่านเซลล์ได้ดีกว่า Na^+
- การนำเข้า K^+ กับ Cl^- จะเป็นแบบใช้พลังงานจากเซลล์ (active transport)
- สาหร่ายสีแดงบางชนิดทนความเค็มสูงได้ดี เพราะมีความสามารถในการเลือกผ่านที่ผนังเซลล์ แม้มีการหดตัวของโพโทพลาสต์ในเซลล์ ก็สามารถกลับเข้าสู่สภาพปกติได้ แต่บางชนิดก็ไม่สามารถทนความเค็มสูงได้

1.3. กลุ่มสาหร่ายสีเขียว (Division Chlorophyta)

- กลุ่มสาหร่ายสีเขียว ในสาหร่ายต่างชนิดกันมีความสามารถในการให้น้ำหรือสารแพร่ผ่านได้แตกต่างกัน ในสาหร่ายสกุล *Spirogyra*, *Zygnema*, *Mougeotia* ผนังเซลล์ของสาหร่ายพวกนี้สามารถให้น้ำแพร่ผ่านเข้า-ออกเซลล์ได้ง่าย น้ำจึงแพร่ผ่านเข้า-ออกเซลล์ได้ในปริมาณมาก แต่ถ้าเป็น zygote ของ *Spirogyra* ซึ่งเป็นเซลล์สืบพันธุ์ที่มีผนังหนามากนั้น เมื่อนำมาแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าเซลล์ จะแช่อยู่ได้เป็นระยะเวลานานมาก กว่าที่จะแสดงอาการหดตัวของโพโทพลาสต์ออกมา นั่นเป็นเพราะผนังเซลล์ที่หนามาก การแพร่ผ่านของน้ำออกนอกเซลล์จึงยากนั่นเอง
- ส่วนการนำสาหร่ายสีเขียวไปแช่ในแอลกอฮอล์ที่เข้มข้นสูง พบว่าจะเกิดการแตกของเซลล์ขึ้น ซึ่งเป็นเพราะเกี่ยวข้องกับกระบวนการนำไขมันที่ละลายในสารอินทรีย์หรือละลายในแอลกอฮอล์เข้าเซลล์ได้นั่นเอง
- เมื่อนำสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กไปแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส พบว่าเกิดการเหี่ยวของเซลล์ เนื่องจากเกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์
- การแช่สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กสกุล *Spirogyra* ในสีย้อม หรือ methyl violet พบว่าสารทั้งสองชนิดนี้เข้าสู่เซลล์สาหร่ายได้ด้วยวิธี passive process คือการแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์จากภายนอกที่มีปริมาณเข้มข้นมากกว่าเข้าสู่ภายในเซลล์ที่มีปริมาณสารสื่อน้อยกว่า โดยไม่ใช้พลังงาน และสารสีทั้งสองนี้เมื่อเข้าสู่เซลล์สาหร่ายจะดูดซับและสะสมไว้ในแวคิวโอล หรือสะสมเป็นเม็ดไว้ในไซโทพลาสซึม
- ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับสารสีโดยเซลล์สาหร่าย เช่นการดูดซับสี methyl red จะถูกดูดซับดีที่พีเอช 3.1-6.8 และพบว่าในสาหร่ายแต่ละชนิดจะมี

คุณสมบัติในการให้แร่ธาตุแพร่ผ่านไม่เหมือนกัน เช่นการแพร่ผ่านของคลอไรด์ สำหรับเช่น *Spirogyra* จะให้ NaCl แพร่ผ่านได้มากกว่า CaCl_2 สำหรับบางชนิด จะไม่ให้ประจุบวกแพร่ผ่านชั้นโพทอพลาซึม แต่บางชนิดจะยอมให้ผ่านได้เป็นบาง ตัวเช่นให้ K^+ ผ่านได้ แต่ไม่ให้ Na^+ , Ca^{2+} ผ่าน

1.4. ยูกลีโนอยด์ (Division Euglenophyta)

- สำหรับขนาดเล็กในกลุ่ม euglenoid เมื่อนำไปใส่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารสูงกว่าเซลล์ เซลล์สาหร่ายจะเกิดการหดตัว shrinkage เป็นเพราะการเคลื่อนที่ของน้ำออกนอกเซลล์ ยกเว้นพวก *Phacus*, *Lepocinclis* ซึ่งมีผนังเซลล์ที่คงรูป

1.5. สาหร่ายไฟ (Division Charophyta)

- ในสาหร่ายไฟจะให้สารที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 4 อังสตรอม แพร่ผ่านได้ดี และสารที่ละลายในไขมันสามารถแพร่ผ่านได้ดีด้วยเช่นกัน
- สีย้อมแพร่ผ่านเข้าเซลล์สาหร่ายไฟและไปอยู่ในส่วนของไซโทพลาซึมและแวคิวโอล
- การควบคุมปริมาณ Cl^- ของเซลล์ เกิดขึ้นที่ผนังด้านในของโพทอพลาซึม การควบคุม Na^+ เกิดที่ส่วน plasmalemma หรือเยื่อหุ้มเซลล์
- ในสาหร่ายไฟจะมีผนังเซลล์ ไซโทพลาซึม และแวคิวโอล ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกัน ในการควบคุมและแลกเปลี่ยน Na^+ , K^+ โดยในแวคิวโอล มี Na^+ , K^+ มาก และสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ , K^+ กับโพทอพลาซึมได้ ทำให้ความเข้มข้นไม่แตกต่างกันระหว่างแวคิวโอลกับโพทอพลาซึม แต่การแลกเปลี่ยนนี้เกิดขึ้นช้ากว่าการแลกเปลี่ยนระหว่างโพทอพลาซึมกับสารละลายภายนอกเซลล์
- ในส่วนของฟอสเฟตสามารถเข้าสู่ไซโทพลาซึมได้ แต่ไม่พบในแวคิวโอล ส่วนไนเตรตสามารถเข้าในแวคิวโอลได้ แต่ไนเตรตนั้นแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้ช้ามาก แม้ผนังเซลล์จะถูกทำลายแล้วก็ตาม

1.6. สาหร่ายสีน้ำตาล (Division Phaeophyta)

- ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาลให้น้ำแพร่ผ่านเซลล์ได้ดี
- ในส่วนของสีย้อมสามารถแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้รวดเร็วมาก แสดงว่าทั้ง plasmalemma และ ไซโทพลาซึมนั้น ให้สีผ่านได้ดี
- นอกจากนี้ผนังเซลล์ยังให้แร่ธาตุที่มีประจุบวก 1 แพร่ผ่านได้ดี แต่ในพวก alkali earth salts จะแพร่ผ่านได้น้อยมาก

- เมื่อนำไปใส่ในน้ำที่ความเค็มสูงมาก เซลล์สาหร่ายสีน้ำตาลจะเกิดหดของโปรโทพลาสต์

1.7. ไดอะตอม (Division Bacillariophyta)

- ในสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมนั้นพบว่าสารพวก glucose กับ sucrose สามารถแพร่ผ่านเซลล์ไดอะตอมได้รวดเร็ว แต่มียกเว้นในบางชนิดที่ไม่ให้น้ำตาลเคลื่อนที่ผ่านสาหร่ายไดอะตอมนี้จะดูดสีย้อมเก็บไว้เป็นหยด droplet ในไซโทพลาสซึมหรือไว้ในแวคิวโอล สารบางตัวที่มีประจุเช่นพวก toluidine blue จะถูกดูดซับในรูปประจุบวกบนผนังเซลล์และแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าสู่เซลล์และสะสมไว้ในเซลล์ นอกจากนี้ไดอะตอมยังพบว่า CaCl_2 สามารถแพร่เข้าแวคิวโอลของไดอะตอมได้ในขณะที่พืชชั้นสูง (plant) อื่น ๆ ไม่สามารถให้เกลือนี้แพร่ผ่านได้ แสดงว่าไดอะตอมมีขบวนการควบคุมการแพร่ผ่านเข้าออกของน้ำและแร่ธาตุที่ดีมาก โดยมีกลไกการขนส่งสารต่าง ๆ แบบใช้พลังงานของเซลล์ในการขนส่ง เข้ามาเกี่ยวข้อง

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์สาหร่าย

การแพร่ของน้ำหรือสารต่าง ๆ ผ่านผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้งปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายใน ล้วนมีผลต่อปริมาณการแพร่ผ่านทั้งสิ้น

2.1. ปัจจัยภายใน (endogenous factors) ปัจจัยภายในคือปัจจัยที่มาจากตัวของสาหร่ายเอง เช่น อายุของเซลล์สาหร่าย ซึ่งมีผลต่อการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ เช่นในสาหร่ายสีเขียวสกุล *Spirogyra* นั้นพบว่าเซลล์ที่มีอายุน้อยจะยอมให้ยูเรียผ่านได้ง่าย หรือสาหร่ายสีเขียวสกุล *Oedogonium* ในขณะที่กำลังสืบพันธุ์จะมีการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ดีกว่าเซลล์ปกติ ซึ่งการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กยังเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลด้วย

2.2. ปัจจัยทางกายภาพ (physical factors) เช่นพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มการแพร่ผ่านของเซลล์สาหร่าย หรือถ้าได้รับแสงเพิ่มขึ้นเซลล์สาหร่ายจะเพิ่มการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารพวกที่ละลายในไขมันได้น้อยจะเพิ่มการแพร่ผ่านได้มากเมื่อสาหร่ายได้รับแสงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการที่สาหร่ายได้รับแสงสีน้ำเงินจะทำให้มีการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ดีกว่าได้รับแสงสีแดง และยังพบว่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นสามารถกระตุ้นอัตราการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมและไนโตรเจนให้แก่เซลล์สาหร่ายด้วย

2.3. ปัจจัยทางเคมี (chemical effects) สารเคมีบางชนิดเป็นพิษต่อเซลล์สาหร่าย จึงมีผลกระทบต่อการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เช่นพบว่ายูเรียเป็นพิษต่อสาหร่ายสีเขียวสกุล *Spirogyra* เกือบบางชนิดลดการแพร่ผ่านของสีย้อมหรือการแพร่ผ่านของเกลืออื่น ๆ เข้าเซลล์สาหร่าย

2.4. ผลกระทบของพีเอช พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการแพร่ผ่านของสารเข้าสู่เซลล์สาหร่าย เช่นพบว่า การแพร่ผ่านของสารจากเซลล์สู่ น้ำสูงสุดที่พีเอช 7 หรือเป็นกลาง การค้าไม่ว่าบที่ 8 การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสาหร่ายสีเขียว *Spirogyra*, *Cladophora* ส่วนในสาหร่าย *Valonia* พบว่าสาร arsenite ที่ละลายในสารละลายที่เป็นต่างจะแพร่ผ่านได้ดีกว่าสารละลายที่เป็นกลาง ซึ่งพีเอชเท่าใดที่จะทำให้สารแพร่ผ่านได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับประเภทหรือชนิดของสาร โดยพีเอชที่ทำให้สารอยู่ในรูปแตกตัวจะเป็นค่าที่สารแพร่ผ่านได้ดีที่สุด

สารที่ไม่มีประจุ จะมีความสามารถในการแพร่ผ่านผนังเซลล์ของสาหร่ายทุกกลุ่มได้เหมือนกัน ยกเว้นแต่ในกลุ่มไดอะตอมที่ให้น้ำตาลแพร่ผ่านได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น และยกเว้นกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ให้สารไม่มีประจุแพร่ผ่านได้ดีต่างจากกลุ่มอื่น เป็นเพราะลักษณะผนังเซลล์และโครงสร้างเซลล์ที่ต่างจากสาหร่ายกลุ่มอื่น ๆ นั่นเอง

3. สมดุลของเกลือและแรงดันออสโมติก^[562]

ความเข้มข้นและชนิดของเกลือที่ละลายน้ำมีผลต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ โดยเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบไอออนที่มีในธรรมชาติและเกี่ยวกับค่าแรงดันของแร่ธาตุที่แตกต่างกันระหว่างน้ำกับในเซลล์สาหร่าย ซึ่งค่าแรงดันของน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสิ่งแขวนลอยหรือตะกอนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำทั้งหมด และความเข้มข้นของเกลือเหล่านี้มีผลต่อการเคลื่อนที่เข้า-ออกของน้ำจากเซลล์ โดยทั่วไปสาหร่ายที่อยู่ในน้ำกร่อยจะรักษาค่าความเข้มข้นของแร่ธาตุภายในเซลล์ให้สูงกว่าน้ำภายนอก และพบว่าสาหร่ายทะเลบางชนิดมีค่าความเข้มข้นของแร่ธาตุในเซลล์สูงกว่าน้ำทะเลภายนอกถึงสองเท่า

บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก โดยสาหร่าย

FACTORS AFFECT TO HEAVY METALS BIOSORPTION BY ALGAE

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักของสาหร่ายนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก ปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น^[15, 423, 515] โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลกระทบต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายมีดังนี้

พีเอช

ค่าพีเอช (pH) ของน้ำหรือสารละลายที่โลหะหนักนั้นละลายอยู่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่าย และมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายเป็นอย่างมาก เพราะค่าพีเอชมีความเกี่ยวข้องกับการละลายของโลหะหนักในน้ำ และการทำงานของหมู่ฟังก์ชันหรือตำแหน่งยึดจับโลหะหนักที่อยู่บนผิวเซลล์ของสาหร่าย

โลหะหนักส่วนใหญ่มีความสามารถในการละลายได้ดีที่พีเอชต่ำ โดยโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายได้แตกต่างกันไป ซึ่งสาหร่ายจะกำจัดโลหะหนักได้ดีเมื่อโลหะหนักอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่เป็นไอออนนั่นเอง พีเอชที่สูงเกินกว่าจุดที่เหมาะสมต่อการละลายจะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักเช่นตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เพราะพีเอชที่สูงจะให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำ และเมื่อโลหะหนักเริ่มตกตะกอน จะทำให้ตำแหน่งยึดจับบนผิวเซลล์ของสาหร่ายไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่ตกตะกอนได้ ดังนั้นพีเอชที่สูงเกินไปจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายลดลง

แต่อย่างไรก็ตาม แม้พีเอชต่ำจะทำให้โลหะหนักละลายและอยู่ในรูปที่มีประจุบวกซึ่งทำให้สาหร่ายสามารถจับหรือกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ได้ดี แต่พีเอชต่ำก็มีข้อเสียคือเมื่อระดับพีเอชต่ำนั้นหมายถึงในสารละลายมีปริมาณ H^+ สูง ซึ่ง H^+ นี้สามารถไปแข่งขันกับประจุบวกของโลหะหนักได้ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายลดลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะหนักชนิดอื่น ในการจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์สาหร่ายได้ ดังนั้นพีเอชที่ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายลดลงได้เช่นกัน^[9, 467, 668]

แต่ยกเว้นในกรณีที่โลหะหนักบางชนิดมีค่าเป็นประจุลบที่พีเอชต่ำ เช่นการศึกษาการดูดซับโครเมียมโดยสาหร่ายสีเขียว *Spirogyra* sp.^[168] พบว่าการดูดซับที่พีเอชต่ำเกิดได้ดีโดยเฉพาะที่พีเอช 2 เป็นเพราะประจุลบของโครเมียม ($\text{chromate- CrO}_4^{-1}$ / $\text{dichromate-Cr}_2\text{O}_7^{-2}$) จับกับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่าย และเมื่อพีเอชมากกว่า 3 หมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่ายมีประจุลบ จึงดูดซับโครเมียมที่เป็นประจุบวก (Cr^{+6})

ส่วนการที่พีเอชมีผลต่อการทำงานของตำแหน่งยึดจับบนผิวเซลล์สาหร่ายนั้น สาเหตุเนื่องจาก ผนังเซลล์ของสาหร่ายประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์เป็นหลัก ซึ่งกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์เหล่านี้จะให้ตำแหน่งยึดจับหรือหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันในการจับกับไอออนของโลหะหนักและหมู่ฟังก์ชันแต่ละประเภทมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid dissociation constant- pKa) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำงานหรือจะสามารถยึดจับกับไอออนของโลหะหนักได้ก็ต่อเมื่อมีค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมคือเท่ากับหรือสูงกว่าค่า pKa นั้นเอง โดยที่ระดับค่าพีเอชของสารละลายสูงกว่าค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชัน หมู่ฟังก์ชันจะเกิดการแตกตัวให้โปรตอน (deprotonated) ทำให้หมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นสามารถแตกตัวและมีประจุลบซึ่งสามารถจับกับไอออนโลหะหนักซึ่งมีประจุบวกได้^[492] โดยมีรายงานถึงค่า pKa ของหมู่ carboxyl, phosphate และ hydroxyl ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะทำหน้าที่ในการจับโลหะหนักได้ดีที่พีเอชในช่วง 2-5, 5-9 และ 9-12 ตามลำดับ^[71]

เนื่องจากพีเอชมีผลต่อการละลายและการตกตะกอนของโลหะหนัก ดังนั้นในการทดลองใช้สาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด ต้องมีการกำหนดค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่โลหะหนักชนิดนั้น ๆ สามารถละลายได้ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระดับพีเอชต่ำ ๆ แต่ในบางกรณีพบมีรายงานว่าที่พีเอชระดับสูงสามารถช่วยเพิ่มการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มตำแหน่งยึดจับที่มีประจุลบของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่ที่สามารถแตกตัวได้ที่พีเอชสูงเท่านั้น ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มค่าการจับประจุบวกของโลหะหนักได้^[11, 469] ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อสาหร่ายแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายแต่ละชนิดนั่นเอง แต่หากพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นเป็นช่วงที่โลหะหนักตกตะกอนแล้ว แม้หมู่ฟังก์ชันจะแตกตัวให้ประจุลบก็ไม่สามารถจับกับโลหะหนักได้เพราะโลหะหนักไม่มีประจุนั่นเอง

ดังนั้นพีเอชที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นกับว่าโลหะหนักชนิดนั้น ๆ เกิดการละลาย การรวมตัว การตกตะกอนที่ระดับพีเอชเท่าใด ในสาหร่ายที่ต่างชนิดกันอาจมีค่าพีเอชที่เหมาะสมเหมือนหรือต่างกันได้ ขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ผนังเซลล์สาหร่ายนั้น ๆ ตัวอย่างของค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายซึ่งศึกษาโดยนำสาหร่ายมาดูดซับโลหะหนักที่มีระดับพีเอชของสารละลายแตกต่างกัน และวัดปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ^[28] พบว่าการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด

Phormidium angustissimum, และสาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus*

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

dimorphus ในลักษณะของเซลล์สด (ไม่ผ่านการอบแห้ง) เพื่อดูดซับตะกั่ว (ตารางที่ 1) และ แคลเมียม (ตารางที่ 2) ที่ระดับพีเอชของสารละลายแตกต่างกัน ผลที่ได้พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายทั้งสามชนิดมีค่าอยู่ที่ระดับ 3.5 โดยให้ค่าเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับตะกั่วได้สูงกว่าที่ระดับพีเอช อื่น ๆ ส่วนที่พีเอชต่ำหรือสูงกว่าระดับ 3.5 สาหร่าย จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ลดลง ซึ่งแสดงว่าที่พีเอช 3.5 เป็นระดับที่ หมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่ายทั้งสามชนิดสามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์และจับตะกั่วได้ดี ที่พีเอชต่ำกว่า 3.5 เป็นระดับที่มี H^+ มากเกินไป ทำให้ H^+ นี้แย่งกับไอออนของตะกั่วจับกับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายทำให้สาหร่ายจับไอออนตะกั่วได้น้อยลง ดังนั้นสาหร่ายจะดูดซับโลหะหนักได้นั้นโลหะหนักจะต้องแตกตัวได้มาก ในขณะที่มีประจุ H^+ ในสารละลายน้อย ส่วนที่พีเอชสูงมากกว่า 3.5 เป็นจุดที่การดูดซับเริ่มลดน้อยลงอีก อาจเป็นเพราะเริ่มใกล้จุดที่ ตะกั่วจะตกตะกอนเพราะที่ระดับพีเอช 4.5 ตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนกับ OH^- ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของ สาหร่ายไม่สามารถจับกับตะกั่วได้ ค่าการดูดซับจึงเริ่มลดลง

ตารางที่ 1 ผลของระดับพีเอชของสารละลายที่มีต่อความสามารถของสาหร่ายในการดูดซับ ตะกั่ว

พีเอช	เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว		
	<i>Phormidium angustissimum</i> *	<i>Chlorella vulgaris</i> *	<i>Scenedesmus dimorphus</i> **
3	19.6	13.0	57.0
3.5	77.1	63.6	68.9
4	73.9	37.9	52.1
4.5	51.6	26.2	32.4
5	39.4	17.4	3.8
5.5	16.9	2.3	2.1

ที่มา : *สุนิรัตน์ (2547ก)^[734]; **สุนิรัตน์ (2547ข)^[735]

ส่วนค่าพีเอชของสารละลายที่สาหร่าย *Phormidium angustissimum*, *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus dimorphus* สามารถการดูดซับแคลเมียมได้สูงสุดคือ พีเอช 5, 7 และ 5.5 ตามลำดับ และยังพบได้ว่าค่าพีเอชระดับอื่น ๆ ให้ผลในการดูดซับได้ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) และที่พีเอช 5 และ 6 ยังให้ค่าการดูดซับแคลเมียมได้ใกล้เคียงกัน ส่วนที่พีเอชสูงกว่า 6 หรือ ต่ำกว่าพีเอช 4 ค่าการดูดซับแคลเมียมจะต่ำลง ซึ่งเป็นเพราะที่พีเอชต่ำมีปริมาณของ H^+ สูง และที่พีเอชสูงมีการตกตะกอนของแคลเมียมเกิดขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 2 ผลของระดับพีเอชของสารละลายที่มีต่อความสามารถของสาหร่ายในการดูดซับแคดเมียม

พีเอช	เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียม		
	<i>Phormidium angustissimum</i> *	<i>Chlorella vulgaris</i> *	<i>Scenedesmus dimorphus</i> **
3	10.7	7.0	5.2
3.5	76.7	9.5	6.2
4	94.7	72.9	32.5
4.5	94.7	91.3	74.5
5	95.8	88.7	79.3
5.5	93.7	92.2	81.9
6	93.8	93.5	78.6
7	95.7	93.7	71.47

ที่มา : *สุธีรัตน์ (2547ก)^[734]; **สุธีรัตน์ (2547ข)^[735]

จากข้อมูลขั้นต้นหากมีการนำสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ไปดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสีย พบว่าสามารถปรับค่าระดับพีเอชของสารละลายได้ในช่วงกว้างมากกว่าการกำจัดตะกั่ว เช่น การใช้ *Phormidium angustissimum* กำจัดแคดเมียม จะสามารถกำจัดได้ดีแม้สารละลายอยู่ในช่วงพีเอชที่กว้างคือ 4-7 ซึ่งเมื่อนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สาหร่ายชนิดนี้จะมีความเหมาะสม เพราะน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานจะมีค่าพีเอชที่ไม่แน่นอน การที่สาหร่ายทำงานได้ในพีเอชช่วงกว้างจะทำให้เหมาะสมในการนำไปใช้จริง

ซึ่งการที่ค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับตะกั่วมีค่าต่ำกว่าและอยู่ในช่วงแคบ แต่พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแคดเมียมมีค่าสูงกว่าและอยู่ในช่วงกว้าง มีสาเหตุเนื่องมาจากความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกัน โดยตะกั่วมีความสามารถละลายได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงแคบคือต่ำกว่า 4.5 ส่วนแคดเมียมมีความสามารถในการละลายได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกว้างคือต่ำกว่า 6.5^[431] ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของสาหร่ายในการดูดซับแคดเมียมจึงมีค่าที่กว้างกว่าของตะกั่ว

ค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายนั้น จึงขึ้นกับชนิดของโลหะหนักและชนิดของสาหร่ายที่แตกต่างกัน ตัวอย่างพีเอชที่เหมาะสมต่อสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมต่อสาหร่ายในการกำจัดโลหะหนัก

สาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	พีเอชที่เหมาะสม	เอกสารอ้างอิง
Division Cyanophyta			
<i>Synechocystis</i> sp.	Cr	2	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cu	5	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	4.5	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Phormidium</i> sp.	Cd	5	Wang et al., 1998 ^[665]
	Zn	5	Wang et al., 1998 ^[665]
	Pb	5	Wang et al., 1998 ^[665]
	Ni	7	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cu	5	Wang et al., 1998 ^[665]
<i>P. angustissimum</i>	Pb	4.5	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
	Cd	6.5-7	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
	Cd	7	สุนิรัตน์, 2547ก ^[734]
	Pb	3.5	สุนิรัตน์, 2547ข ^[735]
<i>Oscillatoria angustissima</i>	Cu	5	Ahuja et al., 1997 ^[9]
	Co	6	Ahuja et al., 1999a ^[10]
	Zn	5	Ahuja et al., 1999b ^[11]
<i>Spirulina platensis</i>	Cu	6.7	Zhou et al., 1998 ^[709]
	Cd	7	Rangsayatorn et al., 2002 ^[552]
Division Rhodophyta			
<i>Gracilaria</i> sp.	Pb, Cu	5	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd, Zn, Ni	5.5	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>Gelidium</i> sp.	Pb	5.3	Vilar et al., 2005 ^[653]
Division Chlorophyta			
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mn, Ni, Zn	8	Lopez-Suarez et al., 2000 ^[453]
	Cr, Cu	6.8	Lopez-Suarez et al., 2000 ^[453]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าแบบที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	พีเอชที่เหมาะสม	เอกสารอ้างอิง
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cd	7	สุธีรัตน์, 2547ก ^[734]
	Pb	3.5	สุธีรัตน์, 2547ข ^[735]
	Hg	3	Tajes-Martinez et al., 2006 ^[623]
	Cr	2	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cu	5	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	4.5	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>C. sorokiniana</i>	Cu	5	Munoz et al., 2006 ^[492]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Hg	6	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Cd	6	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Pb	5	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Hg, Cd, Pb	5-6	Bayramoglu et al., 2006 ^[42]
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Cd	5.5	สุธีรัตน์, 2547ข ^[735]
	Pb	3.5	สุธีรัตน์, 2547ข ^[735]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Cr	2	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cu	5	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	4.5	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Spirogyra</i> sp.	Cr	2	Gupta et al., 2001 ^[168]
	Cu	5	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Ulothrix zonata</i>	Cu	4.5	Nuhoglu et al., 2002 ^[505]
<i>Ulva</i> spp.	Pb, Cu	5	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd, Zn, Ni	5.5	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>Schizomeris leibleinii</i>	Fe	2.5	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb	4.5	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd	5	Ozer et al., 1999 ^[515]
Division Phaeophyta			
<i>Durvillaea potatorum</i>	Pb, Cu	5	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งยังมิได้ดำเนินการตรวจสอบเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	พีเอชที่เหมาะสม	เอกสารอ้างอิง
<i>Ecklonia radiata</i>	Pb, Cu	5	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
	Pb, Cd, Cu	5-5.5	Matheickal and Yu, 1996 ^[469]
<i>Fucus</i> sp.	Cd	5	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>F. ceranoides</i>	Cd	5	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>F. serratus</i>	Cd	5	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>Fucus vesiculosus</i>	Cd	5	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>Sargassum baccularia</i>	Cd	3-5	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>Sargassum</i> sp.	Pb, Cu	5	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd, Zn, Ni	5.5	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>S. hystrix</i>	Pb	4-5	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>S. natans</i>	Pb	4-5	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Padina</i> sp.	Pb, Cu	5	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd, Zn, Ni	5.5	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cu	5	Kaewsarn, 2002 ^[417]
<i>P. pavonia</i>	Pb	4-5	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Cystoseira baccata</i>	Hg	7	Herrero et al., 2005 ^[180]

จากตารางที่ 3 พบว่าแม้เป็นสาหร่ายสกุลเดียวกันแต่ต่างชนิด หรือเป็นชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์นั้นอาจมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวกันได้ที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน เช่น *O. angustissimum* มีระดับพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วที่พีเอช 3.5^[734] และ 4.5^[110] ซึ่งค่าที่แตกต่างกันนี้จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ เข้ามาประกอบด้วย เช่น ลักษณะโครงสร้าง รูปร่างของเซลล์ ปัจจัยแวดล้อมในการเลี้ยง และอายุของสาหร่าย เป็นต้น ซึ่งล้วนมีผลต่อปัจจัยที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้งสิ้น

อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลเกี่ยวข้องต่อการดูดซับโลหะหนักของสิ่งมีชีวิต เพราะความเร็วของปฏิกิริยา (rate of chemical reaction) ขึ้นกับอุณหภูมิ หรือความเร็วในการที่หมู่ฟังก์ชันบนเซลล์สาหร่าย จะจับกับไอออนของโลหะหนักในสาหร่ายบางชนิดจะขึ้นกับอุณหภูมิ^[437] และพบว่าผลของ อุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิอาจ มีผลช่วยให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น หรืออาจไม่มีผลต่อการดูดซับ โลหะหนักเลยก็ได้

การศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* ที่ ระดับอุณหภูมิของสารละลายตะกั่วแตกต่างกันคือ 0- 45 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4) พบว่าที่ ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายชนิดนี้เพิ่มขึ้น โดยมีค่า การดูดซับตะกั่วสูงสุดเมื่อสารละลายตะกั่วมีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส^[570] และการศึกษา การดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กชนิด *Dunaliella tertiolecta* ในน้ำเค็ม ที่ระดับ อุณหภูมิ 5 – 45 องศาเซลเซียส พบว่ามีการดูดซับตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเป็น 45 องศาเซลเซียส^[580]

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิของสารละลายที่มีต่อการดูดซับตะกั่วโดย *Gloeocapsa* sp. และ *Calothrix marchica* (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE.))

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณตะกั่วที่ดูดซับ (mg/g)	
	<i>Gloeocapsa</i> sp.	<i>Calothrix marchica</i>
0	48.29 $\pm$ 0.36 ^{ab}	42.01 $\pm$ 0.41 ^a
4	47.67 $\pm$ 0.78 ^b	52.98 $\pm$ 2.86 ^b
25	51.22 $\pm$ 1.72 ^a	49.88 $\pm$ 2.65 ^{ab}
35	47.05 $\pm$ 0.81 ^b	55.97 $\pm$ 4.06 ^b
45	43.89 $\pm$ 1.11 ^c	77.96 $\pm$ 6.08 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2004a)^[570]

การดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายสีเขียว *Oedogonium* sp. พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 45 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก 144.92 เป็น 169.49 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Nostoc* sp. ในการดูดซับตะกั่วพบว่าค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก 93.46 เป็น 106.38 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 45 องศาเซลเซียส เช่นกัน^[570]

ในสาหร่ายบางชนิดการดูดซับโลหะหนักไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Gloeocapsa* sp. ดูดซับตะกั่วที่ระดับอุณหภูมิของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 0 – 45 องศาเซลเซียส พบว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลทำให้การดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น โดยค่าการดูดซับสูงสุดพบที่ระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่ระดับ 0 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาจากผลการดูดซับ (ตารางที่ 4) พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่มีแนวโน้มที่จะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นหรือลดลง แสดงว่าความสามารถในการการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายชนิดนี้ไม่ขึ้นกับระดับอุณหภูมิ และพบว่าการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria angustissima* ดูดซับโคบอลต์และสังกะสี พบว่าค่าการดูดซับที่ระดับอุณหภูมิ 25 – 45 องศาเซลเซียส ให้ผลไม่แตกต่างกัน^[10, 11] แต่เมื่อนำไปดูดซับคอปเปอร์ พบว่าเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 45 องศาเซลเซียส ทำให้สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น^[9]

นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การดูดซับปรอท แคดเมียม และตะกั่ว โดยสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii* ที่ระดับอุณหภูมิ 5 - 35 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักเหล่านี้แตกต่างกัน^[644] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ^[42] ที่ใช้สาหร่ายชนิดนี้ในการดูดซับปรอท ตะกั่วและแคดเมียม พบว่าที่อุณหภูมิ 5 - 45 องศาเซลเซียส ไม่มีผลกระทบต่อ การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายชนิดนี้ ส่วนการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina platensis* ดูดซับแคดเมียม พบว่าที่ระดับอุณหภูมิของสารละลายแตกต่างกันคือ 20 - 40 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้ค่าการดูดซับแตกต่างกัน^[552]

แต่ในสิ่งมีชีวิตบางชนิดที่ใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักลดลง เช่นเมื่อใช้แบคทีเรีย *Streptomyces rimosus* ที่ไม่มีชีวิตและเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับสังกะสีพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง^[461]

ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอาจไม่มีผล หรือมีผลทั้งด้านเพิ่มและลดการดูดซับโลหะหนักโดยตัวดูดซับชีวภาพ ในกรณีที่มีการเพิ่มการดูดซับโลหะหนักนั้นเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงมากทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของตัวดูดซับทำให้โลหะหนักสามารถเข้าไปภายในเซลล์และจับกับตำแหน่งยึดจับหรือสารประกอบที่อยู่ภายในเซลล์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากที่อุณหภูมิต่ำ ผิวเซลล์ไม่ถูกทำลายโลหะหนักจะจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์เพียงอย่างเดียว ส่วนในกรณีที่พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ลดการดูดซับโลหะหนักนั้นมักพบในการใช้เซลล์ที่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนักแบบระยะยาว โดยมีกลไกการทำงานของเซลล์เข้ามาเกี่ยวข้องในการดูดซับ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เซลล์สาหร่ายถูกทำลายและตาย ทำให้กลไก

การทำงานของเซลล์ในการกำจัดโลหะหนักลดลงหรือไม่อาจทำงานได้ ผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิในการทำให้เซลล์สาหร่ายตายนั้นจะมีผลที่แตกต่างกันในสาหร่ายที่ต่างชนิดกันและโลหะที่ต่างกันเพราะสาหร่ายแต่ละชนิดมีลักษณะเซลล์ที่แตกต่างกัน และพืชโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังนั้นหากเป็นการใช้เซลล์ที่ไม่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักแนวทางการใช้ความร้อนกับเซลล์ตัวดูดซับก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำไปใช้เพิ่มความสามารถในการกำจัดโลหะหนักโดยตัวดูดซับชีวภาพได้^[437]

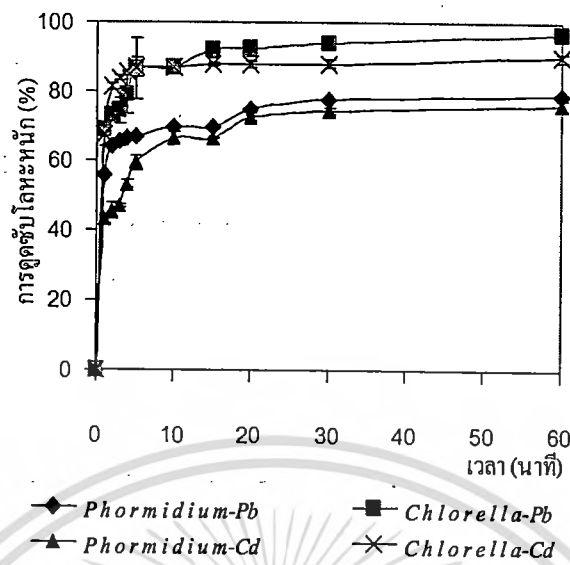
ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะหนัก

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่ายขึ้นกับระยะเวลาในการที่สาหร่ายนั้นสัมผัสกับสารละลายโลหะหนัก หรือระยะเวลาที่ตำแหน่งยึดจับสัมผัสกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายนั่นเอง โดยเมื่อสาหร่ายเริ่มสัมผัสกับไอออนของโลหะหนักจะเกิดการดูดซับโลหะหนักที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งยึดจับพื้นที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายนั้นว่างอยู่และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งตำแหน่งยึดจับที่ผิวของสาหร่ายดูดซับโลหะหนักไว้เต็มแล้วทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ณ จุดนี้คือจุดสมดุลของการดูดซับ (equilibrium)

จากการทดลองการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (ในระบบที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียว) โดยใช้เซลล์สดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Phormidium angustissimum* และสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* พบว่าการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 นาที หลังจากสาหร่ายสัมผัสสารละลายโลหะหนัก โดยสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่เพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ภาพที่ 1) หลังจากนั้นอัตราเร็วของการดูดซับเริ่มช้าลง (ความชันของเส้นกราฟลดลง) และพบว่าการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมโดย *P. angustissimum* เริ่มคงที่หรือเข้าสู่จุดสมดุล ที่ 30 นาที ในโลหะหนักทั้งสองชนิด ส่วนการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมโดย *C. vulgaris* เข้าสู่จุดสมดุลที่ 5 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ^[734]

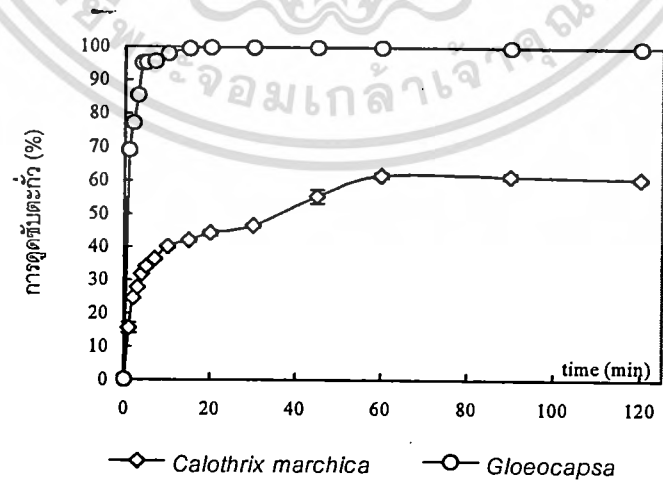
ซึ่งการที่สาหร่ายทั้งสองชนิดมีระยะเวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลแตกต่างกันแม้เป็นการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวกัน เป็นเพราะรูปร่างของสาหร่ายนั้นแตกต่างกัน โดย *C. vulgaris* มีลักษณะเป็นเซลล์กลม ขนาดเล็ก อยู่เดี่ยว ๆ ส่วน *P. angustissimum* ลักษณะเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว และมักมีการพันกันของเส้นสายเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก ๆ จึงทำให้พื้นที่ผิวของเซลล์บางส่วนไม่สามารถสัมผัสกับสารละลายโลหะหนักได้ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวเซลล์ของ *C. vulgaris* จึงมีโอกาสสัมผัสกับสารละลายโลหะหนักได้ทั่วถึงมากกว่า และส่งผลให้มีการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดได้มากกว่า *P. angustissimum* ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย



ภาพที่ 1 การดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์) โดยสาหร่าย *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris* ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน
ที่มา : สุนีรัตน์ (2547ก)^[734]

เช่นเดียวกับการใช้เซลล์สดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Gloeocapsa* sp. และ *Calothrix marchica* ดูดซับตะกั่ว พบว่า *Gloeocapsa* sp. ถึงจุดสมดุลที่ 20 นาที ซึ่งเร็วกว่า *Calothrix marchica* ที่ถึงจุดสมดุลที่ 60 นาที (ภาพที่ 2) ซึ่งการที่ *Gloeocapsa* sp. ถึงจุดสมดุลได้เร็วกว่า เป็นเพราะลักษณะของกลุ่มเซลล์ที่มีขนาดเล็ก ไม่ซับซ้อน และมีพื้นที่ผิวมากกว่า *Calothrix marchica* ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นสายที่สานพันกันเป็นแผ่น ทำให้พื้นที่ผิวลดลง^[570]



ภาพที่ 2 การดูดซับตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์) โดยสาหร่าย *Gloeocapsa* sp. และ *Calothrix marchica* ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน
ที่มา : Ruangsomboon et al. (2004a)^[570]

ส่วนการการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (ในระบบที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียว) โดยเซลล์สดของสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus dimorphus* (ภาพที่ 3) พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 นาทีแรก จากนั้นปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างช้า ๆ การดูดซับตะกั่วถึงจุดสมดุลที่เวลา 10 นาที การดูดซับแคดเมียมถึงจุดสมดุลที่ 5 นาที ที่หลังจากนี้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับไม่สูงขึ้นอีก แต่ยังคงมีการแลกเปลี่ยนระหว่าง Pb^{2+} และ Cd^{2+} ระหว่างผิวเซลล์สาหร่ายกับสารละลายรอบ ๆ เซลล์อยู่ตลอดโดยเกิดขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน ค่าการดูดซับจึงคงที่^[735]



ภาพที่ 3 การดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์) โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน
ที่มา : สุนิรัตน์ (2547ข)^[735]

จากภาพที่ 1-3 แสดงให้เห็นว่าการกำจัดหรือการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายเกิดอย่างรวดเร็วหลังการสัมผัสสารละลายโลหะหนัก แต่อย่างไรก็ตามก็ยังพบว่าเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลสำหรับสาหร่ายแต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของสาหร่ายและสภาวะในการดูดซับ ตัวอย่างของระยะเวลาเข้าสู่จุดสมดุลของสาหร่ายบางชนิดในการดูดซับโลหะหนัก แสดงเพิ่มเติมในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

สาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เวลาเข้าสู่ สมดุล (นาที)	เอกสารอ้างอิง
Division Cyanophyta			
<i>Microcystis</i> sp.	Fe	20	Singh, 1998 ^[601]
	Cu	60	Singh, 1998 ^[601]
<i>M. aeruginosa</i>	Ni, Cd, Cu	120	Parker et al., 1998 ^[522]
<i>Oscillatoria angustissima</i>	Cu	15	Ahuja et al., 1997 ^[9]
	Co	60	Ahuja et al., 1999a ^[10]
	Zn	120	Ahuja et al., 1999b ^[11]
<i>Spirulina</i> sp.	Cr, Cd, Cu	10	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>S. platensis</i>	Cu	480	Zhou et al., 1998 ^[709]
<i>Tolypothrix tenuis</i>	Cd	30	Inthorn et al., 1996 ^[406]
Division Chlorophyta			
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Cu	600	Munoz et al., 2006 ^[492]
<i>C. vulgaris</i>	Cd	5	Geisweid and Urbach, 1983 ^[153]
	Cd	48	Travieso et al., 1999 ^[637]
	Zn	54	Travieso et al., 1999 ^[637]
	Cr	42	Travieso et al., 1999 ^[637]
	Mn, Cr, Ni, Zn,	15	Lopez-Suarez et al., 2000 ^[453]
	Cu		
	Hg	20	Inthorn et al., 2001 ^[405]
	Cd, Pb	30	Inthorn et al., 2001 ^[405]
<i>C. regularis</i>	Cd	30	Sakaguchi et al., 1979 ^[576]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Hg, Cd, Pb	60	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Hg, Cd, Pb	60	Bayramoglu et al., 2006 ^[42]
<i>Dunaliella tertiolecta</i> (living)	Pb	360	Santana-Casiano et al., 1995 ^[580]
<i>Scenedesmus acutus</i>	Hg, Pb, Cd	30	Inthorn et al., 2001 ^[405]
<i>S. abundans</i> (living)	Cu, Cd	1960	Terry and Stone, 2002 ^[625]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าทางใดก็ตาม 9 ปีข้างหน้าที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	ชนิดโลหะหนัก	เวลาเข้าสู่ สมดุล (นาที)	เอกสารอ้างอิง
<i>Spirogyra</i> sp.	Cu	120	Gupta et al., 2006 ^[167]
	Cr	120	Gupta et al., 2001 ^[168]
<i>Caulerpa lentillifera</i>	Cu, Cd, Pb, Zn	20	Pavasant et al., 2006 ^[525]
Division Phaeophyta			
<i>Durvillaea potatorum</i>	Pb, Cu	10	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
<i>Ecklonia radiata</i>	Pb, Cu	10	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
	Pb	15	Matheickal and Yu, 1996 ^[469]
<i>Fucus</i> sp.	Cd	25	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>F. ceranoides</i>	Cd	25	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>F. serratus</i>	Cd	25	Herrero et al., 2006 ^[179]
	Cd	25	Herrero et al., 2006 ^[179]
<i>Sargassum baccularia</i>	Cd	30-40	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>S. hystrix</i>	Pb	180	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>S. natans</i>	Pb	180	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Padina</i> sp.	Pb	180	Jalali et al., 2002 ^[412]
	Cu	30	Kaewsarn, 2002 ^[417]
<i>Cystoseira baccata</i>	Hg	100	Herrero et al., 2005 ^[180]

ซึ่งพบว่าการเข้าสู่จุดสมดุลของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย และชนิดของโลหะหนักที่แตกต่างกันด้วย เพราะชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกันทำให้รูปร่างเซลล์ หรือกลุ่มเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันมีผลต่อพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารละลายโลหะหนัก นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชัน ตำแหน่งของตัวยึดจับหรือจำนวนตัวยึดจับบนผิวสาหร่ายแต่ละชนิดนั้น ๆ ที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ช้า เร็ว ต่างกัน และยังคงคำนึงถึงความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการดูดซับ เพราะความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูงกว่าจะทำให้ถึงจุดสมดุลได้เร็วกว่า เพราะมีโลหะหนักปริมาณมากที่พร้อมที่จะจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์ และโลหะหนักที่เข้มข้นสูงทำให้มีแรงผลักระหว่างไอออนของโลหะหนักด้วยกัน ทำให้มีแรงผลักเข้าถึงตำแหน่งยึดจับได้เร็วกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าโดยวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ข้อมูลเบื้องต้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ความเข้มข้นของโลหะหนัก

ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักมีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่าย ความเข้มข้นโลหะหนักที่สูงในสารละลายจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับระหว่างผนังเซลล์ของสาหร่าย จึงทำให้มีแรงผลักของประจุสูง ทำให้การขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายเกิดได้แรงและเร็ว ทำให้กำจัดโลหะหนักได้เร็วและได้มาก^[9, 11, 109, 474, 515, 681]

การใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* และสาหร่ายสีเขียวก้ามปู *Synechocystis* sp. ดูดซับคอปเปอร์ นิกเกิล และโครเมียม พบว่าเมื่อความเข้มข้นตั้งต้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่สาหร่ายดูดซับได้จะเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (ตารางที่ 6) เช่นพบว่าเมื่อความเข้มข้นตั้งต้นของคอปเปอร์เพิ่มขึ้นจากประมาณ 25 เป็น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ *C. vulgaris* สามารถดูดซับคอปเปอร์เพิ่มขึ้นจาก 31.2 เป็น 46.8 มิลลิกรัมต่อกรัม *S. obliquus* ดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 10.3 เป็น 26.8 มิลลิกรัมต่อกรัม *Synechocystis* sp. ดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 14.2 เป็น 32.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับแคดเมียมและโครเมียมก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน^[109]

การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีจาก 25 เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สาหร่ายสีเขียวก้ามปูชนิด *Oscillatoria angustissima* ดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 45.0 เป็น 245.7 มิลลิกรัมต่อกรัม^[11] การใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus abundans* ในการกำจัดแคดเมียมและคอปเปอร์พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมและคอปเปอร์เริ่มต้นที่เพิ่มจาก 4 เป็น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่ายเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่เห็นผลที่แตกต่างในการดูดซับทั้งคอปเปอร์และแคดเมียม^[625] แต่อย่างไรก็ตามแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่าย *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* และ *Synechocystis* sp. เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแตกต่างกัน

คอปเปอร์		นิกเกิล		โครเมียม	
Co (mg/l)	$q_{eq}(\text{mg/g})$	Co (mg/l)	$q_{eq}(\text{mg/g})$	Co (mg/l)	$q_{eq}(\text{mg/g})$
<i>C. vulgaris</i>					
36.7	31.2	42.4	30.9	36.1	6.8
57.5	35.6	70.5	36.2	61.2	11.0
104.7	40.0	100.2	42.3	129.6	23.0
147.0	43.6	148.3	47.3	175.3	26.6
291.8	46.8	259.2	55.6	263.0	33.8
<i>S. obliquus</i>					
30.1	10.3	25.9	9.0	28.1	6.1
48.9	13.5	41.7	12.3	53.5	10.3
77.1	17.2	75.9	16.4	75.6	13.4
104.8	20.0	101.5	18.7	106.4	15.6
151.5	23.4	121.6	20.6	150.4	20.4
224.4	26.8	217.8	24.7	230.4	30.2
<i>Synechocystis</i> sp.					
34.4	14.2	32.8	5.4	29.9	6.2
53.8	16.8	56.4	8.9	50.5	10.0
80.8	20.5	77.2	11.6	74.8	13.8
102.3	24.0	109.6	15.8	106.0	19.2
170.1	28.6	165.2	23.5	152.2	26.7
262.6	32.2	264.1	30.3	237.3	39.0

หมายเหตุ : Co คือความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร), q_{eq} คือปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Donmez et al. (1999)^[109]

ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพหรือความหนาแน่นของตัวดูดซับ

ปริมาณหรือความหนาแน่นของสาหร่าย (ตัวดูดซับ) ในสารละลายโลหะหนัก(biomass concentration/ density of biosorbent) แสดงถึงปริมาณของตำแหน่งยึดจับ เมื่อจำนวนสาหร่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน^[64, 449] แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับถึงแม้จะเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับหรือถูกกำจัด แต่เป็นผลทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักสาหร่ายลดลง^[133, 625] ซึ่งเป็นเพราะว่าที่ตัวดูดซับจำนวนมากจะเกิดการเกาะกลุ่มกันของตัวดูดซับในระหว่างการดูดซับ หรือเป็นการลดระยะห่างระหว่างตัวดูดซับลง ทำให้จำนวนตำแหน่งยึดจับสำหรับจับกับโลหะหนักลดลง หรือทำให้พื้นที่ผิวสำหรับจับโลหะหนักลดลง เพราะตัวดูดซับเกาะติดกันเอง^[10, 101, 109] ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณตัวดูดซับที่สูงสามารถชักนำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ^[437]

เช่นการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Phormidium angustissimum* และสาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlorella vulgaris* ดูดซับตะกั่วและแคดเมียม โดยใช้ปริมาณสาหร่ายที่แตกต่างกันคือ 5-40 กรัม (น้ำหนักเปียก) ต่อลิตร พบว่าน้ำหนักสาหร่ายทั้งสองชนิดที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมคือ 5 กรัม (น้ำหนักเปียก) ต่อลิตร ซึ่งค่าการดูดซับโลหะหนักต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่ายให้ค่าคือ *P. angustissimum* และ *C. vulgaris* สามารถดูดซับตะกั่วได้ 5.40 และ 5.38 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และดูดซับแคดเมียมได้ 1.40 และ 1.91 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 7) เมื่อจำนวนเซลล์สาหร่ายเพิ่มมากขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนักนั้นคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่าย (*q*) มีค่าลดลง เนื่องจากที่น้ำหนักสูง ๆ นั้นเซลล์มีการอยู่ชิดกันมากจนมีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวเซลล์บางส่วนไม่สามารถสัมผัสกับโลหะหนักได้ และเนื่องจากที่เซลล์สาหร่ายปริมาณมากทำให้มีค่าสัดส่วนระหว่างโลหะหนักต่อเซลล์สาหร่ายลดลง^[734]

การใช้สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus dimorphus* ดูดซับตะกั่วและแคดเมียม พบว่าที่ระดับจำนวนตัวดูดซับ 5 กรัม (น้ำหนักเปียก) ต่อลิตร มีค่าการดูดซับโลหะหนัก (มิลลิกรัม) ต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่ายสูงที่สุด โดยดูดซับตะกั่วได้ 0.988 ± 0.008 มิลลิกรัมต่อกรัม และดูดซับแคดเมียมได้ 2.204 ± 0.019 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 8) และเมื่อปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้นปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของสาหร่ายมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อจำนวนเซลล์หนาแน่นมากขึ้น ทำให้เซลล์อยู่ชิดกันมาก จึงมีบางส่วนของเซลล์ไม่สามารถสัมผัสกับโลหะหนักได้ นอกจากนี้ปริมาณเซลล์มากทำให้มีตำแหน่งในการจับกับ Pb^{2+} และ Cd^{2+} อยู่มาก โลหะหนักจึงจับอยู่บนผิวของสาหร่ายแบบแพร่กระจายทั่วไปไม่หนาแน่น ส่วนที่เซลล์น้อยนั้นมีตำแหน่งในการจับโลหะหนักอยู่อย่างจำกัดโลหะหนักจึงจับกับผิวเซลล์สาหร่ายอยู่อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่น ดังนั้นเมื่อเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายแล้ว ที่ปริมาณเซลล์สูงจึงให้ค่าการดูดซับต่อกรัมสาหร่ายต่ำกว่า^[735]

ตารางที่ 7 ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ถูกดูดซับที่ระดับปริมาณเซลล์ของ *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris* ที่แตกต่างกัน

น้ำหนัก สาหร่าย (g wet wt./l)	ตะกั่ว				แคดเมียม			
	<i>P. angustissimum</i>		<i>C. vulgaris</i>		<i>P. angustissimum</i>		<i>C. vulgaris</i>	
	การดูด ซับ (%)	q _{eq} (mg/g)	การดูด ซับ (%)	q _{eq} (mg/g)	การดูด ซับ (%)	q _{eq} (mg/g)	การดูด ซับ (%)	q _{eq} (mg/g)
5	98.68	5.40	94.56	5.38	88.57	1.40	95.01	1.91
10	98.63	2.58	93.47	1.88	88.84	1.04	95.17	1.48
15	98.32	1.24	92.66	1.35	88.90	0.70	96.53	0.65
20	98.32	1.10	91.44	1.11	90.74	0.45	96.99	0.49
30	98.32	0.80	87.50	0.49	88.72	0.25	96.98	0.40
40	98.32	0.58	88.70	1.51	92.78	0.24	91.33	0.29

หมายเหตุ : q_{eq} คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อสาหร่ายแห้ง 1 กรัม)
ที่มา : สุนีรัตน์ (2547ก)^[734]

ตารางที่ 8 ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ถูกดูดซับที่ระดับปริมาณเซลล์ของ *Scenedesmus dimorphus* แตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ปริมาณสาหร่าย (g wet wt./l)	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (mg/g dry wt.)	
	ตะกั่ว	แคดเมียม
5	0.988 ± 0.008	2.204 ± 0.019
10	0.791 ± 0.014	1.153 ± 0.024
15	0.710 ± 0.013	0.779 ± 0.025
20	0.663 ± 0.016	0.565 ± 0.017
30	0.428 ± 0.018	0.374 ± 0.021
40	0.243 ± 0.006	0.264 ± 0.005

ที่มา : สุนีรัตน์ (2547ข)^[735]

การทดลองใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus abundans* ดูดซับแคดเมียมและคอปเปอร์ ซึ่งปริมาณเซลล์ที่ระดับ 15.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ผลการดูดซับโลหะหนักต่อกรัมของสาหร่ายสูงกว่าที่ปริมาณเซลล์ 62 มิลลิกรัมต่อลิตร^[625] และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Oscillatoria* ในการดูดซับคอปเปอร์ จะทำให้ปริมาณของคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับออกไปจากสารละลายทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์การดูดซับ) เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วย (1 กรัม) น้ำหนักแห้งของสาหร่ายลดลง โดยเมื่อใส่ *Oscillatoria* ปริมาณ 0.04 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อหนึ่งมิลลิลิตรของสารละลาย สาหร่ายสามารถดูดซับคอปเปอร์ได้ 685 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ของสาหร่าย และเมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายเป็น 0.2 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อหนึ่งมิลลิลิตรของสารละลาย จะทำให้ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ลดลงเหลือ 165 มิลลิกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ของสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าเปอร์เซ็นต์หรือปริมาณการกำจัดคอปเปอร์ออกจากสารละลายจะสูงกว่าในกรณีที่ใช้ปริมาณสาหร่ายสูงกว่า แต่ในกรณีที่ปริมาณสาหร่ายสูงนี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณตัวดูดซับที่มากเกินไปซึ่งเกินความจำเป็นในการดูดซับ ทำให้สิ้นเปลืองตัวดูดซับ ค่าการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์สาหร่ายที่ขึ้นอยู่กับปริมาณเซลล์สาหร่าย และนอกจากนี้ยังพบว่าหากระยะห่างของตัวดูดซับเมื่ออยู่ห่างกันมากจะทำให้สามารถดูดซับประจุบวกของโลหะหนักได้มากยิ่งขึ้น^[9]

ซึ่งการศึกษาที่ให้ผลสอดคล้องกันนี้ ยังพบได้ในรายงานการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Synechococcus elongatus* ดูดซับยูเรเนียม^[188] การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Oscillatoria* ดูดซับสังกะสี^[11] การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Oscillatoria angustissima* ดูดซับคอปเปอร์^[9] การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Oscillatoria angustissima* ดูดซับโคบอลต์^[10]

ตำแหน่งยึดจับและพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย

เทคโนโลยีการใช้สาหร่ายในการกำจัดโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับทฤษฎีคือไอออนของโลหะหนักเกิดการจับกับตำแหน่งยึดจับหรือหมู่ฟังก์ชัน ที่หลากหลายที่อยู่บนผนังเซลล์ของสาหร่าย โดยผ่านขบวนการที่ไม่ใช้พลังงาน หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผนังเซลล์ของสาหร่ายเช่น carboxylic, amine, hydroxyl และ sulfhydryl ตัวอย่างการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlamydomonas reinhardtii* พบว่ามีหมู่ฟังก์ชัน amino, carboxylic และ carbonyl เป็นหมู่หลักที่ทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนัก^[644] ซึ่งการทำงานของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ มีความสัมพันธ์กับค่า pKa ของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน^[695] ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผนังเซลล์สาหร่ายนั้นมักพบอยู่ในพอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่บนเซลล์สาหร่ายนั่นเอง^[187]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อวันที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายสามารถปล่อยกรดอะมิโนและน้ำตาลที่สร้างขึ้นจากขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ออกสู่ภายนอกเซลล์และสู่อาหารที่เลี้ยงได้^[129] ซึ่งส่วนที่ปล่อยออกมาและเกาะที่ผนังเซลล์มีลักษณะเป็นเมือกที่หุ้มเซลล์ (mucilage) จะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ๆ 2 ประเภท คือ พอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน ซึ่งจะพบพอลิแซ็กคาไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก และพบโปรตีนเป็นส่วนน้อย^[98] โดยในส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดกลูโคสเป็นองค์ประกอบมากที่สุด^[645]

จากการศึกษาองค์ประกอบของเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* พบว่ามีคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนเป็นองค์ประกอบ 71.8 และ 28.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* พบว่ามีคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนเป็นองค์ประกอบ 37.6 และ 34.7 เปอร์เซ็นต์ และพบน้ำตาลที่เป็นกรด (acidic sugar) เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ของ *G. gelatinosa* และ *C. marchica* เท่ากับ 117.73 และ 160.7 ไมโครกรัมต่อกรัม^[572, 573] ส่วนเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่ายสีเขียว *Botryococcus braunii* มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ 55-83 เปอร์เซ็นต์ มีโปรตีนเป็น 5.2-10.5 เปอร์เซ็นต์ และเถ้า 3-13.2 เปอร์เซ็นต์^[22]

สาหร่ายหลายชนิดสามารถปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์มานอกเซลล์ ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เกาะอยู่ที่ตัวเซลล์ มีลักษณะเป็นเมือกวนที่หุ้มเกาะติดกับเซลล์ และส่วนที่ละลายสู่น้ำที่ล้อมรอบ^[502] ซึ่งพบว่าทั้งที่เกาะเซลล์และส่วนที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ของสาหร่ายมีหน้าที่ช่วยในการแยกสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตออกมาจากน้ำให้กับเซลล์ และยังช่วยกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้ด้วย^[451] หรือช่วยให้แร่ธาตุคงอยู่ในแหล่งน้ำโดยเกิดการเกาะของแร่ธาตุกับเมือกจนเป็นกลุ่มเล็ก ๆ และตกตะกอนได้^[98] ดังนั้นนอกจากแลกเปลี่ยนประจุแล้ว พอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่ปล่อยออกมานอกเซลล์ยังช่วยทำให้โลหะต่าง ๆ ตกตะกอนออกจากน้ำได้ นอกจากนี้พวกที่มีพอลิแซ็กคาไรด์หุ้มเซลล์มาก ๆ ยังทำให้สาหร่ายเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งมีประโยชน์ในการนำมาทำเป็นแผ่นดูดซับชีวภาพ (biofilm หรือ biogranules)^[122, 706] และใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย^[502]

พอลิแซ็กคาไรด์นี้มีน้ำตาลประจุลบที่เป็นกรดกลุ่ม uronic acids เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่นกลุ่ม galacturonic acid และ glucuronic acid^[148] น้ำตาลที่เป็นกรดนี้สามารถดูดซับโลหะได้^[657] ดังนั้นหน้าที่หลักของพอลิแซ็กคาไรด์ที่หุ้มเซลล์สาหร่ายคือจับกับโลหะหรือแร่ธาตุต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ นอกจากนี้โปรตีนยังมีหมู่ $-NH_2$ อยู่ด้วย โปรตีนที่พบในเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่ายจึงสามารถกำจัดโลหะหนักได้เช่นกัน

การรบกวนการดูดซับโลหะหนักโดยไอออนอื่น ๆ

น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนอกจากมีไอออนของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่แล้ว ยังมีไอออนของโลหะอื่น ๆ ปนอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งโลหะเหล่านี้จะทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับลดลงได้^[469] ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับในกรณีที่น้ำเสียมีโลหะหนักชนิดนั้นเพียงชนิดเดียวอาจจะไม่เหมือนกับในกรณีที่น้ำเสียมีโลหะหนักมากกว่าหนึ่งชนิด เช่นการกำจัดตะกั่วในกรณีที่น้ำเสียมีตะกั่วเพียงชนิดเดียวอาจมีค่าการกำจัดไม่เท่ากับในกรณีที่น้ำเสียมีตะกั่วและแคดเมียมปนอยู่ด้วยกัน ซึ่งเป็นเพราะมีการรบกวนการดูดซับระหว่างไอออนของโลหะ โดยอาจเป็นแบบทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น หรืออาจเป็นแบบทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ลดลงก็ได้^[439, 519, 557]

การปนเปื้อนของไอออนของโลหะอื่น ๆ ที่พบในน้ำเสียที่เด่นชัดได้แก่ การปนเปื้อนของไอออนประจุบวกในกลุ่ม Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} เนื่องจากเป็นไอออนที่พบอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ^[9, 10, 11, 16, 124, 125, 402, 417, 469, 474]

การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Oscillatoria angustissima* ในการดูดซับโคบอลต์ พบว่าเมื่อมีไอออนประจุบวกของแมกนีเซียมและแคลเซียมในสารละลาย จะทำให้ความสามารถของสาหร่ายในการดูดซับโคบอลต์ลดลง โดยแมกนีเซียมมีผลกระทบมากกว่าแคลเซียม โดยแมกนีเซียมที่ความเข้มข้น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่าการดูดซับโคบอลต์ของสาหร่ายลดลง 51.85 และ 70.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแคลเซียมที่ความเข้มข้น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่าการดูดซับโคบอลต์ของสาหร่ายลดลง 33.33 และ 50.62 เปอร์เซ็นต์^[10]

แต่เมื่อมีไอออนประจุลบของซัลเฟต และไนเตรท ที่ความเข้มข้น 0.75-10.00 มิลลิโมล (เตรียมจากการละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ และ NH_4NO_3) จะทำให้ค่าการดูดซับโคบอลต์ของสาหร่ายลดลงอย่างมาก (ตารางที่ 9) ส่วนคลอไรด์ไอออน (เตรียมจากการละลาย NH_4Cl) จะส่งผลกระทบต่อค่าการดูดซับน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อนำสาหร่ายชนิดนี้ไปดูดซับสังกะสี (ตารางที่ 10) จะพบว่าซัลเฟตและคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 0.75-10 มิลลิโมล ลดการดูดซับสังกะสี ส่วนไนเตรทไม่มีผลกระทบต่อค่าการดูดซับสังกะสีมากนัก^[11] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ไอออนที่เป็นตัวรบกวนการดูดซับโลหะหนักจะเป็นไอออนชนิดเดียวกัน ความเข้มข้นเดียวกัน แต่อาจส่งผลกระทบต่อโลหะหนักไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักด้วย

ตารางที่ 9 ผลของประจุลบต่อการดูดซับโคบอลต์ โดยสาหร่าย *Oscillatoria angustissima* (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ความเข้มข้น (mM)	ปริมาณโคบอลต์ที่ถูกดูดซับ (mg/g dry wt.)		
	ซัลเฟต	คลอไรด์	ไนเตรท
0.00	99.16 $\pm$ 13.76	91.16 $\pm$ 13.76	99.16 $\pm$ 13.76
0.75	-	77.50 $\pm$ 23.84	66.66 $\pm$ 10.04
1.00	-	38.80 $\pm$ 9.90	-
2.00	-	28.25 $\pm$ 1.98	-
5.00	-	-	-
10.00	-	-	-

หมายเหตุ : - คือ ไม่มีการดูดซับ

ที่มา : Ahuja et al. (1999a)^[10]

ตารางที่ 10 ผลของประจุลบต่อการดูดซับสังกะสี โดยสาหร่าย *Oscillatoria angustissima* (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ความเข้มข้น (mM)	ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับ (mg/g dry wt.)		
	ซัลเฟต	คลอไรด์	ไนเตรท
0.00	184.33 $\pm$ 15.01	184.33 $\pm$ 15.01	184.33 $\pm$ 15.01
0.75	158.33 $\pm$ 10.40	139.33 $\pm$ 31.97	182.50 $\pm$ 15.20
1.00	61.66 $\pm$ 7.63	143.33 $\pm$ 18.33	180.41 $\pm$ 4.73
2.00	68.33 $\pm$ 11.54	120.33 $\pm$ 8.08	169.16 $\pm$ 2.92
5.00	56.66 $\pm$ 7.21	97.50 $\pm$ 5.00	160.00 $\pm$ 10.89
10.00	27.58 $\pm$ 2.26	90.33 $\pm$ 7.02	166.75 $\pm$ 8.08

ที่มา : Ahuja et al. (1999b)^[11]

การใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Chlorella vulgaris* กำจัดนิเกิลและคอปเปอร์จากน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบสองระบบ คือระบบที่มีโลหะหนักนิเกิล หรือคอปเปอร์ เพียงชนิดเดียว กับระบบที่มีโลหะหนักทั้งสองชนิดผสมกันอยู่ ผลที่ได้คือความสามารถในการดูดซับนิเกิลและคอปเปอร์นั้นลดลง ในระบบที่มีโลหะหนักสองชนิดผสมกันอยู่^[474] โดยการดูดซับนิเกิลมีปริมาณลดลงอย่างมากเมื่อสารละลายมีคอปเปอร์ผสมอยู่ มากกว่าการลดลงของคอปเปอร์ในกรณีที่มีนิเกิลผสมอยู่ (ตารางที่ 11) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าในระบบที่มีโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด จะทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างโลหะหนักในการจับกับตัวดูดซับ นั่นคือเกิดการแข่งกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ระหว่างนิกเกิลกับคอปเปอร์ในการจับกับ *Chlorella vulgaris* แต่อย่างไรก็ตามจากผลที่สาหร่ายสามารถดูดซับคอปเปอร์ได้มากกว่านิกเกิลในระบบที่มีโลหะหนักทั้งสองชนิดอยู่ด้วยกัน ในความเข้มข้นที่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ได้มากกว่านิกเกิล

และยังพบอีกว่าปริมาณโลหะหนักรวม (นิกเกิลและคอปเปอร์) ที่ถูกดูดซับได้ทั้งหมดนั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดหนึ่ง และลดความเข้มข้นของโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งในอัตราส่วนที่เท่ากัน ซึ่งแสดงว่าเซลล์ของสาหร่ายมีตำแหน่งยึดจับในการจับโลหะที่ไม่เฉพาะเจาะจงต่อชนิดของโลหะ (non-specific sites) อยู่ด้วย

ตารางที่ 11 ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียว (single metal system) และระบบที่มีโลหะหนักสองชนิด (binary metal systems)

โลหะที่ถูกดูดซับ	โลหะที่ถูกเพิ่มเข้ามาในระบบดูดซับ	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (q_{eq} , mmol/g)	
นิกเกิล	ไม่มี	3.010	(single metal system)
	คอปเปอร์	0.815	(binary metal system)
คอปเปอร์	ไม่มี	4.352	(single metal system)
	นิกเกิล	3.254	(binary metal system)

ที่มา : Mehta and Gaur (2001)^[474]

จากการศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Tolypothrix tenuis* ที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้ NaOH ในการดูดซับโลหะหนักเมื่อมีไอออนอื่นร่วมอยู่ในสารละลาย โดยในระบบจะมีโลหะ 2 ชนิดอยู่ร่วมกัน ที่ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 500 ไมโครโมล ผลพบว่า *T. tenuis* สามารถดูดซับหรือมีความสามารถในการจับคอปเปอร์และตะกั่วได้สูงใกล้เคียงกัน รองลงมาคือแคดเมียม สังกะสี แคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ความคงตัว (stability constants) ในการจับตัวของโลหะหนักกับ EDTA จะมีค่าของคอปเปอร์ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี แคลเซียม และแมกนีเซียม เรียงตามลำดับคือ 18.80, 18.04, 16.46, 16.50, 10.59 และ 8.69 ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการจับกับตำแหน่งยึดจับบนเซลล์สาหร่าย โลหะหนักที่มีค่าคงที่ในการจับตัวสูงจะถูกดูดซับได้สูง^[497] (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพของ *Tolypothrix tenuis* ในการดูดซับโลหะหนักเมื่อมีไอออนอื่นร่วมอยู่ในสารละลาย

ไอออนอื่น	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่าย (mmol/g dry wt.)			
	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Zn ²⁺
Cu ²⁺	0.18	0.13	0.04	0.03
Pb ²⁺	0.08	0.15	0.02	0.02
Cd ²⁺	0.16	0.15	0.18	0.08
Zn ²⁺	0.18	0.24	0.09	0.14
Ca ²⁺	0.23	0.21	0.23	0.16
Mg ²⁺	0.19	0.19	0.15	0.14

ที่มา : Nagase et al. (2005)^[497]

การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Microcystis aeruginosa* ดูดซับโลหะหนักสามชนิดที่ปนกันอยู่ในสารละลายคือตะกั่ว แคดเมียม และปรอท พบว่าสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด รองลงมาคือแคดเมียมและปรอทซึ่งให้ค่าในการดูดซับใกล้เคียงกัน^[67] ซึ่งเป็นเพราะรัศมีไอออน (ionic radius) ของโลหะหนักที่มีขนาดใหญ่กว่า จะสามารถจับกับตำแหน่งยึดจับระหว่างหมู่ฟังก์ชันสองตำแหน่งได้ดี^[176] โดยค่ารัศมีไอออนของตะกั่ว แคดเมียม และปรอทคือ 1.19, 0.97 และ 1.02 อังสตรอม

ส่วนการใช้ *M. aeruginosa* ดูดซับนิกเกิลและโครเมียมพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีนิกเกิลหรือโครเมียมเพียงชนิดเดียว สาหร่ายสามารถดูดซับนิกเกิลได้มากกว่าโครเมียม ซึ่งเป็นเพราะนิกเกิลมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากับ 1.8 ซึ่งสูงกว่าโครเมียมคือ 1.6^[602] แต่เมื่อโลหะหนักทั้งสองชนิดปนกันอยู่ในสารละลายพบว่าค่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าโครเมียมมีความสามารถในการแย่งกับนิกเกิลจับกับสาหร่ายได้เช่นกัน^[602]

การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Oscillatoria limnetica*, *Anabaena spiroides* สาหร่ายสีเขียวชนิด *Eudorina elegans* และ *Chlorella vulgaris* ดูดซับโลหะหนักสามชนิดที่ปนกันอยู่ในสารละลายคือ ตะกั่ว คอปเปอร์ และแคดเมียม พบว่าสาหร่ายทั้งสี่ชนิด สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด^[629]

การใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus incrassatulus* ในการดูดซับโครเมียม แคดเมียม และคอปเปอร์ ที่ปนกันอยู่ในสารละลาย พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับแคดเมียมได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีเพียงแคดเมียมชนิดเดียว ซึ่งแสดงว่าโครเมียม และคอปเปอร์ มีผลทำให้แคดเมียมถูกดูดซับได้มากขึ้น^[529] ซึ่งพบได้ว่าไอออนบางอย่างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายได้

นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีปัจจัยอีกหลายประการที่มีผลต่อความสามารถต่อการจับโลหะหนักแต่ละชนิด ในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดผสมกันในระบบ เช่นชนิดของหมู่ฟังก์ชัน โดยพบว่าหากเป็นหมู่ phosphonic acid จะชอบจับกับไอออนประจุบวกที่มีขนาดใหญ่ มีขั้วสูง มีความสามารถในการละลายได้สูง (polarisable) หรือมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง เช่นการดูดซับตะกั่ว และคอปเปอร์ ที่ปนกันอยู่ในสารละลาย โดยใช้ตัวดูดซับที่มีหมู่ phosphonic acid พบว่าตะกั่วถูกดูดซับได้มากกว่าคอปเปอร์ เพราะตะกั่วมีความสามารถในการละลายได้สูงกว่าคอปเปอร์^[459]

อีกปัจจัยหนึ่งคือ พีเอชของสารละลายที่มีโลหะหนักผสมกันอยู่หลายชนิด โลหะหนักชนิดใดที่มีความสามารถในการละลายในระดับพีเอชนั้นได้มากกว่า ย่อมมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับโดยสาหร่ายได้มากกว่า^[602] นอกจากนี้ค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมต่อสาหร่ายชนิดหนึ่งในการดูดซับโลหะหนักชนิดที่แตกต่างกัน จะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อระดับพีเอชของสารละลายนั้นเป็นระดับที่เหมาะสมกับสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักชนิดใด โลหะหนักชนิดนั้นจะถูกดูดซับได้สูงกว่าเช่นกัน

ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

การดูดซับหรือการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยมีทั้งปัจจัยที่มาจากสาหร่าย และปัจจัยที่มาจากโลหะหนัก เช่น แสง เซลล์ที่มีชีวิต อายุของเซลล์ และคุณสมบัติเฉพาะตัวของโลหะหนัก เป็นต้น

1. แสง

แสงมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยจากการใช้เซลล์สาหร่ายยูกลีนาชนิด *Euglena gracilis* ที่มีชีวิต ในการดูดซับปรอทภายใต้สภาวะการได้รับแสงนั้น สามารถดูดซับปรอทได้สูงกว่าสภาวะที่ไม่ได้รับแสง โดยเมื่อได้รับแสงสามารถดูดซับปรอทได้ 148 นาโนโมล ส่วนในที่ไม่ได้รับแสงสามารถดูดซับได้ 139 นาโนโมล ซึ่งเนื่องมาจากแสงมีผลต่อการสังเคราะห์ glutathione ภายในเซลล์สาหร่าย ซึ่ง glutathione นี้ มีความสามารถในการลดพิษของโลหะหนักที่อยู่ภายในเซลล์สาหร่าย ดังนั้นจึงทำให้สาหร่ายสามารถทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้นด้วย^[101]

การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* ดูดซับตะกั่วที่มีความเข้มข้นตั้งต้นแตกต่างกันภายใต้สภาวะการได้รับแสงและไม่ได้รับแสง พบว่าปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับภายใต้การได้รับแสงและไม่ได้รับแสงนั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในทุกความเข้มข้นตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ตารางที่ 13) และความเข้มข้นตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยสาหร่าย เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับได้สูงสุดภายใต้สภาวะมีแสงคือ 41.30 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และภายใต้ที่ไม่ได้รับแสงคือ 42.61 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ที่ความเข้มข้นตะกั่วตั้งต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

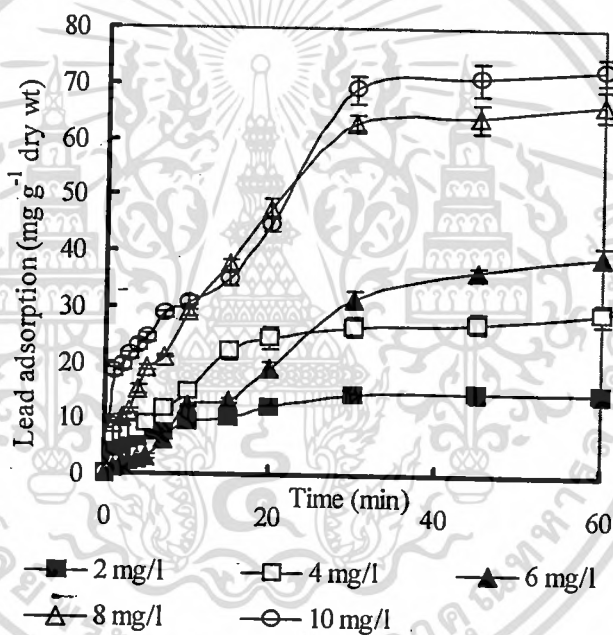
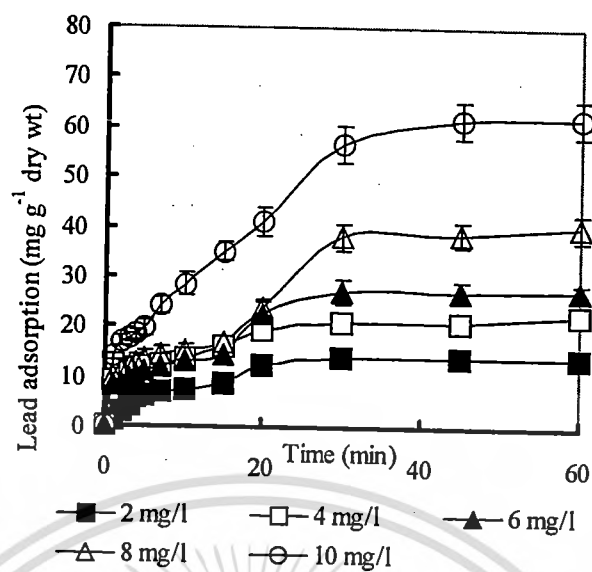
ตารางที่ 13 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (q_{eq}) โดย *Calothrix marchica* ภายใต้การ ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ q_{eq} (mg/g dry wt)	
	ได้รับแสง	ไม่ได้รับแสง
2	11.64 $\pm$ 0.95 ^{aA}	10.36 $\pm$ 0.20 ^{aA}
4	19.30 $\pm$ 0.35 ^{bA}	18.28 $\pm$ 0.99 ^{bA}
6	25.71 $\pm$ 0.37 ^{cA}	27.90 $\pm$ 0.59 ^{cA}
8	33.40 $\pm$ 2.48 ^{dA}	36.66 $\pm$ 1.82 ^{dA}
10	41.30 $\pm$ 3.37 ^{eA}	42.61 $\pm$ 1.94 ^{eA}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวดิ่งเดียวกันและตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแถวแนวนอนเดียวกัน ที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P<0.05$)

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006a)^[572]

นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับตะกั่วภายใต้สภาวะที่ไม่ได้รับแสงถึงจุดสมดุลช้ากว่าการได้รับแสง (ภาพที่ 4) ซึ่งเป็นเพราะโดยปกติแล้วแสงมีผลทางอ้อมต่อการดูดซับสารอาหารผ่านทาง การสังเคราะห์แสง เพราะการสังเคราะห์แสงจะให้พลังงานเพื่อใช้ในการขนส่งธาตุอาหารผ่านเข้าเซลล์และให้พลังงานเพื่อสร้างโครงคาร์บอน (carbon skeletons) ที่จำเป็นต่อการสร้างกรดอะมิโนและโปรตีน^[447] และหากกิจกรรมการสังเคราะห์แสงลดลงอาจทำให้ค่าเฟือชของสารละลายภายในเซลล์ลดลง และทำให้การดูดซับแร่ธาตุโดยไม่ใช้ขบวนการเมแทบอลิซึมลดลงด้วย^[169] ซึ่งการที่ *C. marchica* ภายใต้สภาวะไม่ได้รับแสงมีการดูดซับตะกั่วช้ากว่าสภาวะที่ได้รับแสงอาจเป็นเพราะการที่ไม่มีกิจกรรมการสังเคราะห์แสงภายใต้การไม่ได้รับแสง จึงทำให้ไม่มีพลังงานในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายชนิดนี้มีส่วนหนึ่งที่ขึ้นกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ เพราะเห็นได้ชัดจากความแตกต่างของลักษณะการดูดซับภายใต้การได้รับและไม่ได้รับแสง



ภาพที่ 4 การดูดซับตะกั่วโดย *Calothrix marchica* ภายใต้การได้รับแสง (บน) และไม่ได้รับแสง (ล่าง) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน
ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006a)^[572]

2. เซลล์สาหร่ายมีชีวิตหรือไม่มีชีวิต

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเซลล์ที่ตายแล้วอาจดูดซับได้มากกว่า น้อยกว่า หรือเท่ากับเซลล์ที่ยังมีชีวิตก็ได้^[419, 434, 662] เช่นจากการเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียมและคอปเปอร์ ที่ความเข้มข้นตั้งต้น 0-20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เซลล์สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus abundans* ที่มีชีวิต และไม่มีชีวิต โดยดูดซับเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าเซลล์ที่มีชีวิตสามารถดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดได้มากกว่าเซลล์ที่ไม่มีชีวิต^[625]

ในกรณีของการดูดซับโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำ และใช้ระยะเวลาที่นาน เซลล์มีชีวิตมักดูดซับโลหะหนักได้มากกว่า เพราะเซลล์ที่มีชีวิตสามารถสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมาได้ เซลล์ใหม่จะทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักได้ต่อไป นอกจากนี้เซลล์ที่มีชีวิตยังใช้พลังงานในการนำโลหะหนักเข้าไปอยู่ในเซลล์ได้ ซึ่งจะทำให้กำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเซลล์ตาย อาจจะมีการหลั่งสารบางอย่างออกจากเซลล์ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งสามารถช่วยกำจัดโลหะหนักได้ด้วย ส่วนเซลล์ที่ไม่มีชีวิตจะดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์เท่านั้น เมื่อตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์เต็มจะไม่สามารถดูดซับโลหะหนักเพิ่มได้อีก

แต่ในกรณีที่โลหะหนักมีความเข้มข้นมาก และใช้เวลาในการดูดซับสั้น ๆ อาจพบว่าเซลล์ที่ไม่มีชีวิตจะดูดซับได้ใกล้เคียงหรือดีกว่าเซลล์ที่มีชีวิต เพราะโลหะหนักที่เข้มข้นมากจะเป็นพิษกับเซลล์ เซลล์ที่มีชีวิตจะถูกทำลายและกลไกการนำโลหะหนักเข้าเซลล์จะถูกยับยั้ง ดังนั้นการดูดซับโลหะหนักจึงเหลือเพียงที่ผิวเซลล์ เท่ากับเซลล์ที่ไม่มีชีวิต แต่หากเซลล์ไม่มีชีวิตนั้นได้ผ่านขั้นตอนการทำให้ตายด้วยวิธีที่แตกต่างกัน เช่นการอบแห้ง การแช่สารเคมี หรือการทำแห้งด้วยวิธีทำแห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำ (freeze-dried) จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่ผนังเซลล์สาหร่าย เช่นเพิ่มรูพรุน เพิ่มพื้นที่ผิว หรือเปลี่ยนชนิดหมู่ฟังก์ชัน ในกรณีนี้จะทำให้เซลล์ไม่มีชีวิตสามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่า ตัวอย่างเช่น การใช้สาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella* ซึ่งเป็นสกุลที่เจริญเติบโตในน้ำเค็ม นำมาดูดซับแคดเมียม พบว่าเซลล์ที่มีชีวิตดูดซับแคดเมียมได้เพียง 37.0 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (freeze-dried) ดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดถึง 91.0 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง^[470]

ซึ่งวิธีการในการทำให้เซลล์สาหร่ายตายนั้นเป็นขั้นตอนสำคัญมากที่จะส่งผลต่อความสามารถในการสะสมโลหะหนักของเซลล์สาหร่าย^[57]

3. อายุสาหร่ายหรือระยะเวลาการเลี้ยงสาหร่าย

อายุของเซลล์สาหร่ายหรือระยะเวลาการเลี้ยง (algal age or cultured time) พบว่ามีผลหลักต่อชนิด ปริมาณ และองค์ประกอบของสารต่าง ๆ หรืออาหารสะสมในเซลล์สาหร่าย และมีผลต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์และชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ด้วย

และพบว่าการสะสมโลหะหนักโดยสาหร่ายอาจผันแปรได้แตกต่างกันขึ้นกับอายุของสาหร่าย และนอกจากนี้ยังพบว่ากลไกของเซลล์สาหร่ายในการเพิ่มความทนทานต่อโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

นั้นจะเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างช่วงชีวิตการเจริญเติบโตหรือช่วงอายุของสาหร่ายที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากสามารถเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกนอกเซลล์ได้นั้นเอง^[415]

การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกันคือ 4, 10 และ 14 วัน ในการดูดซับตะกั่ว พบว่าสาหร่ายที่อายุ 14 วัน สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด ส่วนสาหร่ายที่อายุ 4 และ 10 วัน ค่าการดูดซับตะกั่วไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (q_{eq}) โดย *Calothrix marchica* ที่อายุแตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

อายุสาหร่าย (วัน)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ q_{eq} (mg/g dry wt)
4	2.53 ± 0.03^a
10	2.56 ± 0.01^a
14	11.64 ± 0.95^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P < 0.05$)

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006a)^[572]

การที่สาหร่ายที่อายุแตกต่างกันมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเป็นเพราะจำนวนตำแหน่งยึดจับที่แตกต่างกันระหว่างช่วงอายุการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งจากการศึกษานี้อาจเป็นไปได้ว่าสาหร่าย *C. marchica* ที่ช่วงอายุ 4 และ 10 วัน มีจำนวนตำแหน่งยึดจับตะกั่วที่ใกล้เคียงกัน ส่วนที่อายุ 14 วัน มีจำนวนตำแหน่งยึดจับตะกั่วที่ผิวเซลล์มากกว่า จึงแสดงความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบมีรายงานว่าสาหร่าย *Thiothrix* ที่มีอายุ 1 วัน สะสมนิเกิลและสังกะสีได้น้อยกว่าเซลล์สาหร่ายที่มีอายุ 2-5 วัน^[595]

โดยปกติแล้วหุ้มฟังก์ชันหลายประเภทที่อยู่บนผิวเซลล์สาหร่ายและทำหน้าที่ในการยึดจับโลหะหนัก^[437] ซึ่งหุ้มฟังก์ชันเหล่านี้จะพบได้ในพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีนที่ถูกสร้างโดยเซลล์ที่มีชีวิตและปล่อยออกนอกเซลล์และเคลือบอยู่บนผิวเซลล์^[152] ดังนั้นเมื่ออายุของสาหร่ายเพิ่มขึ้น ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีนบนผนังเซลล์จึงเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณหุ้มฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ยึดจับโลหะหนักเพิ่มขึ้น

3.1. ผลของระยะเวลาการเลี้ยงที่มีต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์และชนิดน้ำตาล

สาหร่ายสามารถสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ขึ้นภายในเซลล์ระหว่างการเจริญเติบโต จากนั้นพอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนจะถูกส่งผ่านเยื่อหุ้มไซโทพลาซึมออกมาที่ผนังเซลล์ภายนอก EPS (exocellular polysaccharide) โดยแบ่งเป็น EPS ส่วนที่ละลายในน้ำหรืออาหารที่ล้อมรอบเซลล์ และ EPS ส่วนที่หุ้มอยู่ที่ผนังเซลล์ (CPS)^[612] ดังนั้นระยะเวลาการเลี้ยงหรืออายุของสาหร่ายที่ยาวนานขึ้น จะทำให้ปริมาณ EPS และ CPS เพิ่มขึ้น ซึ่งทั้ง EPS และ CPS มีผลต่อการดูดซับหรือกำจัดโลหะหนัก ดังนั้น EPS และ CPS ที่สูง ย่อมทำให้การดูดซับโลหะหนักสูงขึ้นด้วย

จากการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ที่ระยะเวลาการเลี้ยงหรือช่วงการเจริญเติบโตแตกต่างกัน โดยการเจริญเติบโตของสาหร่ายในการศึกษานี้แบ่งการศึกษาเป็น 5 ช่วงคือ ช่วงที่หนึ่ง lag phase เป็นช่วงที่สาหร่ายปรับตัวเข้ากับอาหารหรือสภาวะแวดล้อมใหม่ ยังไม่พบการแบ่งเซลล์หรือการเจริญเติบโตที่ชัดเจนในช่วงนี้ ช่วงที่สอง early log phase เป็นช่วงที่สาหร่ายเริ่มมีการแบ่งเซลล์ ช่วงที่สาม mid log phase เป็นช่วงที่สาหร่ายมีการแบ่งเซลล์หรือมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ช่วงที่สี่ stationary phase เป็นช่วงที่สาหร่ายเริ่มเจริญเติบโตคงที่ คือมีการเกิดใหม่ของเซลล์และการตายของเซลล์ใกล้เคียงกัน ส่วนช่วงสุดท้าย death phase คือช่วงที่สาหร่ายมีการตายมากกว่าการเกิดของเซลล์ใหม่ จำนวนเซลล์สาหร่ายจึงลดลง ซึ่งการเข้าสู่ช่วงการเจริญเติบโตต่าง ๆ นี้ จะใช้เวลาแตกต่างกันในสาหร่ายที่ต่างชนิดกัน

ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาการเลี้ยงเพิ่มขึ้นปริมาณ CPS และ EPS เพิ่มขึ้นด้วย โดยปริมาณ CPS และ EPS ของ *G. gelatinosa* เพิ่มจาก 11.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 10.6 ± 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเลี้ยง 4 วัน เป็น 35.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 33.0 ± 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเลี้ยง 30 วัน (ตารางที่ 15) ซึ่งเป็นปริมาณสูงสุดที่สาหร่ายสร้างขึ้นในการศึกษารั้งนี้ และในส่วนของผลผลิตสาหร่ายมีการเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเลี้ยงเพิ่มขึ้น

นอกจากปริมาณของ CPS ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักโดยสาหร่ายแล้ว องค์ประกอบของชนิดน้ำตาลที่พบใน CPS ยังมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักด้วย โดยเฉพาะน้ำตาลชนิดที่เป็นกรด (acidic sugars) เป็นน้ำตาลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาทั้งปริมาณ CPS และชนิดน้ำตาลใน CPS ร่วมกันในการที่จะเลือกสาหร่ายไปใช้ดูดซับโลหะหนัก

CPS ของสาหร่ายในธรรมชาติมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่หลากหลายแตกต่างกันขึ้นกับหมู่ฟังก์ชัน รวมถึงความสามารถในการดูดซับ การทำให้เกิดการรวมกลุ่ม และการทำให้ตกตะกอน แต่โดยหลัก ๆ แล้ว ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของ CPS จะ

หมายถึง การทำงานของหมู่ฟังก์ชันซึ่งพบจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เป็นกลาง (neutral sugar) และเป็นกรดนั่นเอง น้ำตาลที่เป็นกรดจะมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถให้โปรตอนและมีประจุลบ (COO-) ที่พีเอชสูงกว่า 2.9-3.4 และพร้อมที่จะจับกับประจุบวกของโลหะหนักได้ ดังนั้น CPS ที่มีน้ำตาลกรดมาก จะมีแนวโน้มที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้สูง

จากการศึกษาพบว่าอายุของสาหร่ายหรือระยะเวลาในการเลี้ยงสาหร่ายมีผลกระทบต่อชนิดน้ำตาลใน CPS ด้วยเช่นกัน โดยจากการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ที่ระยะเวลาการเลี้ยงต่าง ๆ และศึกษาชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบใน CPS พบว่ามีน้ำตาลที่เป็นกลางและเป็นกรดเป็นองค์ประกอบใน CPS โดยน้ำตาลที่เป็นกลางคือ rhamnose, arabinose, ribose, galactose, glucose, mannose, fructose, xylose และน้ำตาลที่เป็นกรดคือ galacturonic และ glucuronic

โดยชนิดและปริมาณน้ำตาลที่พบในแต่ละช่วงอายุการเลี้ยงนั้นแตกต่างกันไป และเมื่อพิจารณาน้ำตาลที่เป็นกรดพบว่า ใน CPS ของ *G. gelatinosa* (ตารางที่ 16) ช่วง lag phase มีน้ำตาล galacturonic สูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำตาลอื่น ๆ แต่หลังจากนั้นพบว่าน้ำตาล glucuronic มีค่าสูงสุดตลอดการเลี้ยง โดยปริมาณรวมของน้ำตาลสูงที่สุดพบในระยะเวลาการเลี้ยง stationary phase คือ 10.52 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากนั้นปริมาณน้ำตาลรวมลดลง

ตารางที่ 15 ปริมาณ CPS, EPS และ ปริมาณผลผลิตของสาหร่าย *Gloeocapsa gelatinosa* ที่เลี้ยงที่ระยะเวลาแตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	CPS (mg/g dry biomass)	EPS (mg/l culture medium)	ผลผลิตสาหร่าย (g dry wt./l)
lag phase (4 วัน)	11.4	10.6 ± 0.4^a	0.5 ± 0.1^a
early log phase (6 วัน)	11.5	11.0 ± 0.4^a	0.5 ± 0.1^{ab}
mid log phase (10 วัน)	13.8	15.0 ± 0.7^b	0.7 ± 0.1^{ab}
stationary phase (20 วัน)	32.0	24.1 ± 1.0^c	1.3 ± 0.2^c
death phase (30 วัน)	35.4	33.0 ± 1.0^d	1.9 ± 0.3^d

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P < 0.05$)

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

ตารางที่ 16 องค์ประกอบน้ำตาลใน CPS (มิลลิกรัมต่อกรัม CPS) ของ *Gloeocapsa gelatinosa* (ในทุกค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำตาล มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยกว่า 0.001)

ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	rhamnose	arabinose+ ribose	galactose+ glucose	mannose	fructose	xylose	galacturonic	glucuronic	total sugar
lag phase (4 วัน)	0.08 ^a	0.68 ^a	0.56 ^a	0.00 ^a	0.72 ^a	0.64 ^a	0.80 ^a	0.00 ^a	3.48 ^a
early log phase (6 วัน)	0.53 ^b	2.29 ^b	0.91 ^b	0.41 ^b	0.31 ^b	0.34 ^b	1.25 ^b	2.34 ^b	8.38 ^b
mid log phase (10 วัน)	1.49 ^c	1.77 ^c	1.43 ^c	0.00 ^a	1.15 ^c	0.90 ^c	1.18 ^c	1.98 ^c	9.91 ^c
stationary phase (20 วัน)	1.49 ^c	0.98 ^d	1.07 ^d	0.02 ^a	0.82 ^d	1.12 ^d	1.73 ^d	3.30 ^d	10.52 ^d
death phase(30 วัน)	0.25 ^{ab}	0.82 ^e	0.83 ^e	0.01 ^a	0.80 ^d	0.60 ^a	0.74 ^e	1.24 ^e	5.28 ^e

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P<0.05)

- เนื่องจากจากการวิเคราะห์ น้ำตาลชนิด arabinose กับ ribose และ galactose กับ glucose จะมีบางส่วนที่ปรากฏอยู่ในพื้นที่เส้นโค้ง (peak) เดียวกัน ดังนั้นการรายงานผลจึงรายงานผลรวมเป็นน้ำตาลทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

สำหรับการพิจารณาว่าควรเลี้ยงสาหร่ายที่อายุ ระยะเวลาเท่าใดหรือเจริญเติบโตอยู่ในระยะใด แล้วจึงนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนัก นอกจากพิจารณาชนิดและปริมาณน้ำตาลกรดใน CPS แล้ว จำเป็นต้องคำนึงว่าปริมาณ CPS ที่สกัดได้ มาจากสาหร่ายปริมาณเท่าใด และคำนวณกลับเป็นปริมาณน้ำตาลกรดต่อน้ำหนักสาหร่ายออกมา เพื่อช่วยในการพิจารณาเลือกเซลล์สาหร่ายมาใช้ เช่นเมื่อพิจารณา น้ำตาลกรดของ *G. gelatinosa* พบว่าการเลี้ยงในช่วง stationary phase สาหร่ายแห้ง 1 กรัม ให้ปริมาณน้ำตาลกรดมากที่สุดคือ 160.7 ± 0.8 ไมโครกรัม (ตารางที่ 17)

นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงปริมาณผลผลิตของเซลล์สาหร่ายที่ได้ในแต่ละช่วงอายุด้วยเช่นกัน โดยนำน้ำตาลกรดที่ได้ต่อสาหร่ายแห้ง 1 กรัม คูณด้วยผลผลิตสาหร่ายที่ได้ในช่วงระยะเวลาการเลี้ยงต่าง ๆ (ข้อมูลจากตารางที่ 15) จะทำให้ทราบว่าในการเลี้ยงสาหร่ายในอาหาร 1 ลิตร ระยะเวลาการเลี้ยงใดจะเหมาะสมในการเก็บเซลล์สาหร่ายไปใช้ดูดซับโลหะหนักมากที่สุด

ตารางที่ 17 ผลรวมของน้ำตาลกรดต่อน้ำหนักสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของ *Gloeocapsa gelatinosa* ที่ระยะเวลาการเลี้ยงแตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ระยะการเจริญเติบโต	น้ำตาลกรดใน CPS (mg/g CPS)	น้ำตาลกรดในสาหร่าย (μ g/g dry biomass)
lag phase (4 วัน)	0.8 ± 0.0^a	9.1 ± 0.3^a
early log phase (6 วัน)	3.6 ± 0.0^b	41.3 ± 0.1^b
mid log phase (10 วัน)	3.2 ± 0.0^c	43.7 ± 0.2^c
stationary phase (20 วัน)	5.0 ± 0.0^d	160.7 ± 0.8^d
death phase(30 วัน)	2.0 ± 0.00^e	69.9 ± 0.2^e

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P<0.05$)

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

ซึ่งการพิสูจน์ว่าน้ำตาลกรดมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักจริงหรือไม่ โดยการทดลองนำสาหร่าย *G. gelatinosa* ที่ช่วงอายุต่างกัน มีปริมาณน้ำตาลกรดต่างกัน มาดูดซับตะกั่ว พบว่าสาหร่ายช่วงอายุที่มีน้ำตาลกรดสูงกว่า สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่าและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายที่มีน้ำตาลกรดต่ำกว่า (ตารางที่ 18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ตารางที่ 18 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยเซลล์สาหร่าย *Gloeocapsa gelatinosa* ที่ช่วงอายุแตกต่างกันซึ่งมีปริมาณน้ำตาลกรดที่เซลล์ต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ระยะการเจริญเติบโต	<i>G. gelatinosa</i>	น้ำตาลกรดทั้งหมดในสาหร่าย ($\mu\text{g/g}$ dry biomass)
mid log phase (10 วัน)	3.53 ± 0.02^a	43.73 ± 0.16^a
stationary phase (20 วัน)	21.28 ± 0.56^b	160.74 ± 0.77^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแถวแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P<0.05$)

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

แต่พบว่าการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Tolypothrix* ที่มีอายุต่างกันคือ 3, 7 และ 21 วัน ในการดูดซับแคดเมียม กลับพบว่าความสามารถในการดูดซับนั้นไม่แตกต่างกัน^[406] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการที่อายุของสาหร่ายจะมีผลหรือไม่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก น่าจะขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะ และคุณสมบัติของสาหร่ายด้วย สาหร่ายบางชนิดอาจไม่มีการสร้างพอลิแซ็กคาไรด์หุ้มเซลล์ หรืออาจไม่สร้างพอลิแซ็กคาไรด์เพิ่มเมื่ออายุเพิ่ม หรือบางครั้งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำหน้าที่จับโลหะหนักที่ต้องการทดสอบโดยตรง

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่มีผลต่อสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักอีกเช่น

- ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ของโลหะหนัก ซึ่งพบว่าหากมีค่าสูง จะยึดจับกับสาหร่ายได้แรง ถูกดูดซับได้มาก^[602]
- ค่าคงที่ความคงตัว (stability constants) ของโลหะหนัก ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการจับกับตำแหน่งยึดจับบนเซลล์สาหร่าย โลหะหนักที่มีค่าคงที่ในการจับตัวสูงจะถูกดูดซับได้สูง^[497]
- รัศมีของไอออน (ionic radius) ของโลหะหนักที่มีขนาดใหญ่กว่า จะสามารถจับกับตำแหน่งยึดจับระหว่างหมู่ฟังก์ชันสองตำแหน่งได้ดี^[176]
- โลหะหนักที่มีค่าความเป็นขั้วสูง มีความสามารถในการละลายได้สูง (polarisable) จะถูกดูดซับได้มากกว่าพวกที่มีค่าความเป็นขั้วต่ำ^[459]

(รายละเอียดของค่าเหล่านี้อ่านเพิ่มเติมได้ในบทที่ 4)

บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและ จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ADSORPTION ISOTHERM AND KINETICS

การดูดซับ [80, 112]

1. นิยามการดูดซับ

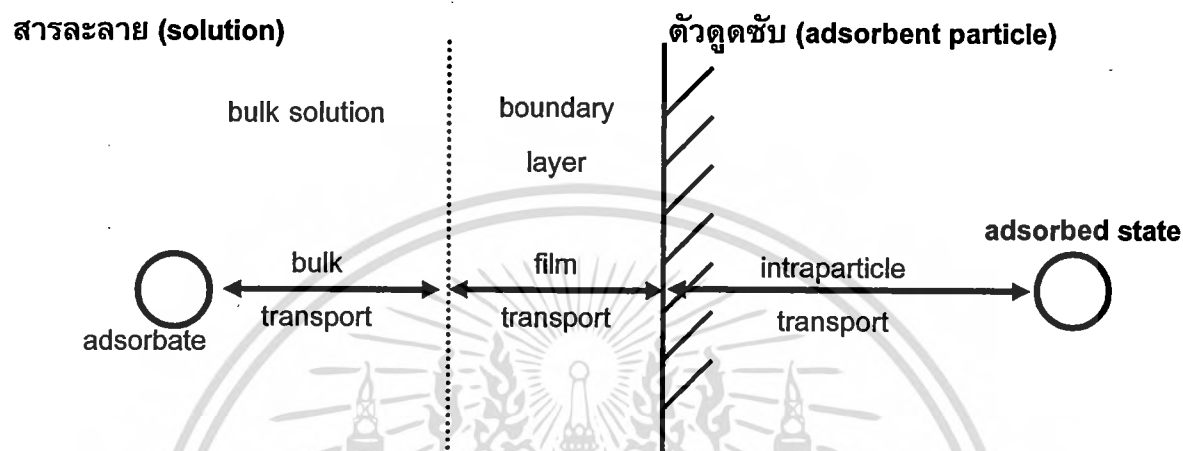
การดูดซับ (adsorption) เป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (mass transfer) มาสะสม (accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของตัวดูดซับ โดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) องค์ประกอบแต่ละชนิดของสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย เพราะตัวถูกละลายบางประเภทเป็นพวกไม่ชอบน้ำ และขึ้นกับความชอบของตัวถูกละลายที่มีต่อตัวดูดซับ (specific affinity) การดูดซับนี้จะรวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (surface precipitation process) หรือกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายลดลงเกิดจากการดูดซับหรือการตกตะกอนที่พื้นผิว หรือกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือกระบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้ว โดยทั่วไปจะใช้คำว่า sorption [90, 112, 727]

2. กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน (ภาพที่ 1) คือ 1) bulk transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ จากสารละลาย (bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ 2) film transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ ข้ามฟิล์มน้ำ (boundary layer) ไปยังผิวของตัวดูดซับ 3) intraparticle transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (adsorbent particle) 4) adsorption เป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หรือการนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน^[135, 446, 465, 472]



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในกระบวนการ adsorption
ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://www.lboro.ac.uk>^[318]

3. ลักษณะของการดูดซับ^[90]

3.1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ทำให้ตัวถูกดูดซับยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วหรือกับสารที่มีขั้ว และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force)

3.2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือความร้อนที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติ ไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4. แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force) โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงไฟฟ้าสถิต เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น ion exchange ส่วนแรงทางเคมี จะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาหรือการกระทำระหว่างกัน (interaction) เกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

4.1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น^[717, 718] และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อน ๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

4.2. แรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เหล่านี้เกิดจากผล ดังนี้

4.2.1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่ง กับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

4.2.2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรียสารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรียสารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

4.2.3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

4.3. แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับกับไอออนของโลหะหนัก แล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

- 4.3.1. เป็นพันธะที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือให้อิเล็กตรอน หรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางกายภาพ
- 4.3.2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

5. ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ

การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มีความแตกต่างกัน ดังนี้

- 5.1. การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน
- 5.2. ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพ จะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล และอิทธิพลของการแพร่
- 5.3. การดูดซับทางเคมีนั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และการดูดซับจะหยุดลง เมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์นั้น ตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (multilayer)
- 5.4. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดูดซับทางกายภาพจะลดลง

6. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ตัวถูกดูดซับจะสามารถเกาะ หรือกระจายที่ผิวของตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ ตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และสภาวะในการดูดซับ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่

6.1. คุณสมบัติของตัวดูดซับ

- 6.1.1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น ประกอบกับมีโครงสร้างรูพรุนมาก จะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ และทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะขบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่

- 6.1.2. ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง พื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น

ตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

- 6.1.3. หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่ผิวตัวดูดซับ หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ เช่นหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH), หมู่เอมีน (NH_2) และหมู่ซัลเฟต (SO_3^-) ซึ่งจะเป็นประจุลบในสารละลาย สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักที่เป็นประจุบวกได้

6.2. คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

- 6.2.1. ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือถ้าตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลายมีค่ามาก โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่สูง ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อย จะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า

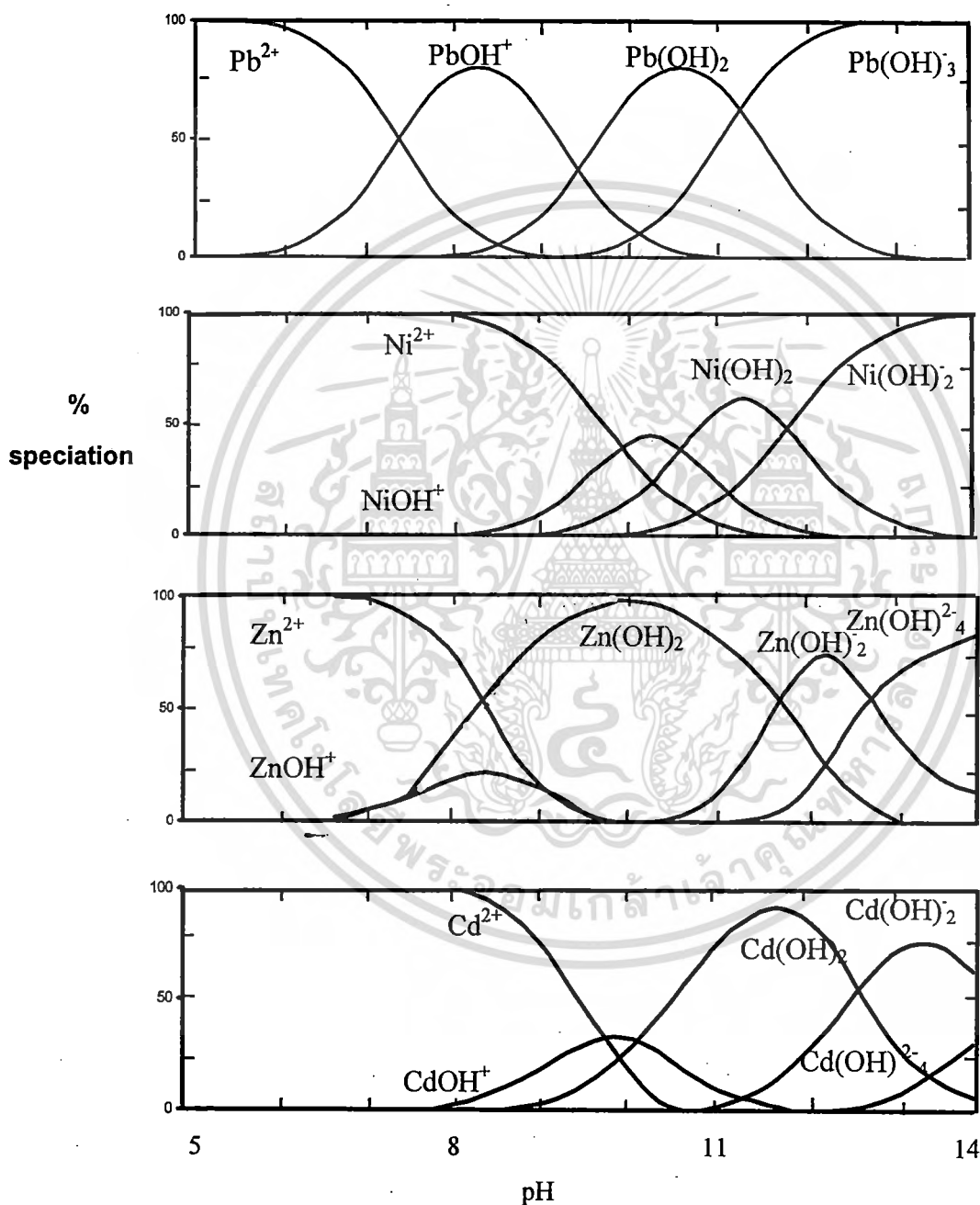
- 6.2.2. น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง แต่การดูดซับในรูพรุน จะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย เพราะตัวถูกดูดซับ สามารถเข้าไปในรูพรุน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

6.3. สภาวะในการดูดซับ

- 6.3.1. ค่าพีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการเปลี่ยนรูป (species) ของโลหะหนัก เช่นการเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลุ่มประจุบวกสอง (divalency ion) ได้แก่ตะกั่ว (Pb^{2+}), นิกเกิล (Ni^{2+}), สังกะสี (Zn^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) (ภาพที่ 2) และค่าพีเอชของสารละลายยังมีผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์ตัวดูดซับด้วย

- 6.3.2. อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่อ

อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนรูปของโลหะกลุ่มประจุบวกสอง ในสารละลายที่ค่าพีเอชต่าง ๆ
ที่มา : ดัดแปลงจาก Schuthess and Huang (1990)^[590]

สภาวะสมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ แต่จะไม่ให้ค่าศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง ทำให้ตัวถูกละลายเกิดการดูดซับและการคายการดูดซับไปพร้อม ๆ กัน จนกระทั่งอัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเรียกว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่

ดังนั้นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคือต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและต้องทำภายใต้อุณหภูมิคงที่ โดยการหาจุดสมดุลของการดูดซับอาจรายงานผลเป็นค่าปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

โดยการหาค่าการดูดซับที่จุดสมดุลคำนวณได้โดย

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m}$$

สมการที่ 1

โดย

- q_e คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารแห้งที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม ต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสารแห้ง)
- C_o คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- V คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนัก (ลิตร)
- m คือ น้ำหนักแห้งของตัวดูดซับ (กรัม)

หรืออาจหาจุดสมดุลโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ระยะเวลาต่าง ๆ และนำมาสร้างกราฟเพื่อหาจุดสมดุล

การหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ (R)

$$R(\%) = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} 100$$

สมการที่ 2

โดย

C_o คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

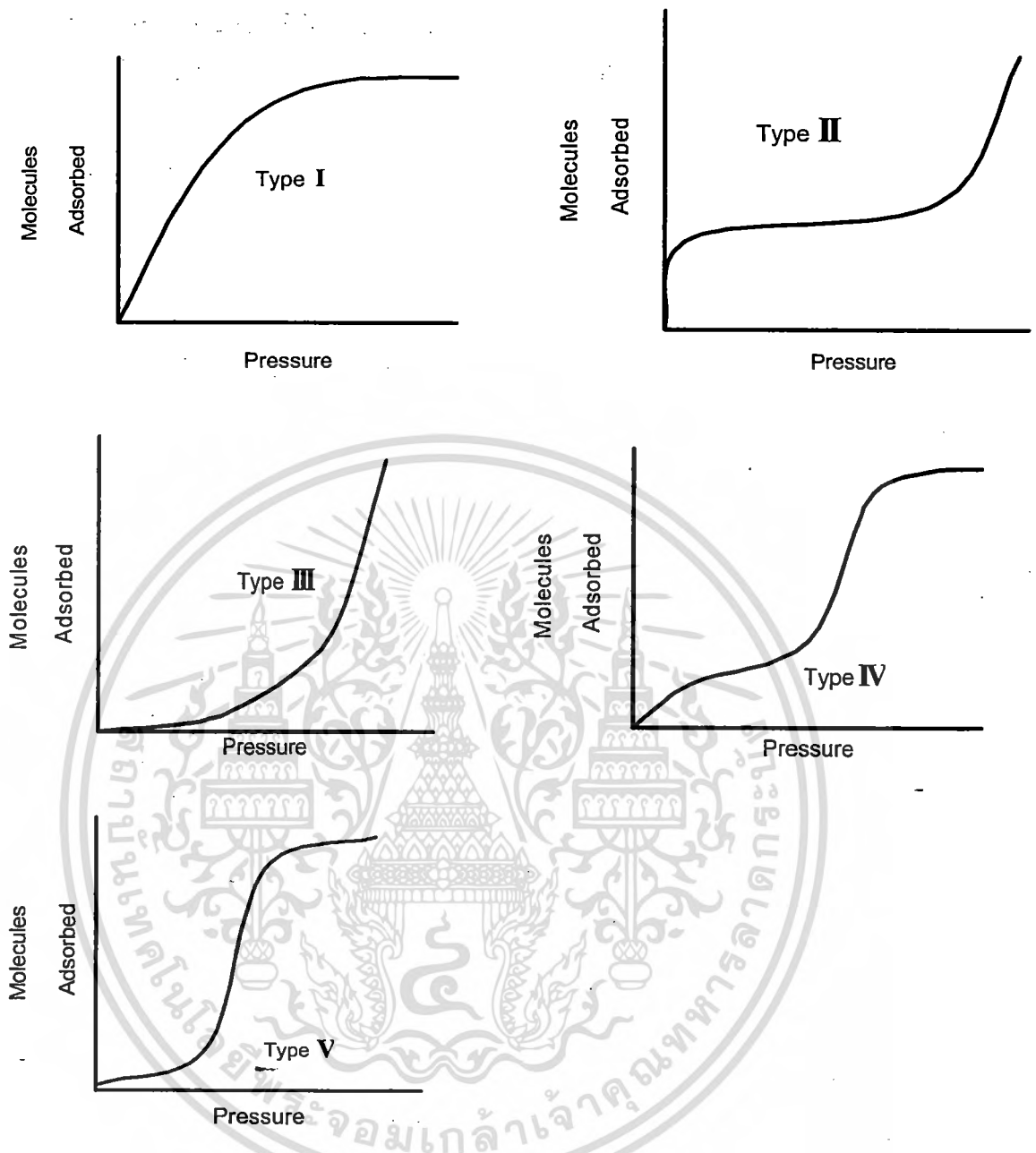
C_t คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับ^[4, 673, 674]

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่าง ๆ เส้นนี้เกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษากการดูดซับมักพบไอโซเทอร์มใน 5 ลักษณะ (ภาพที่ 3) ซึ่งจำแนกจากลักษณะความโค้งของความชัน ของเส้นไอโซเทอร์มในช่วงเริ่มต้น

Type I Isotherm เป็นแบบที่พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (monolayer coverage/single layer adsorption) (ภาพที่ 4) พบทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ microporous powders ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้หนึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น microporous และมีรูพรุนปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

Type II Isotherm พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน nonporous powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบหนาหลายชั้นโมเลกุล (multilayer) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 3 รูปแบบของ adsorption isotherm
ที่มา : ดัดแปลงจาก Masel (1996)^[465]

Type III Isotherm การดูดซับคล้าย Type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับแบบ multilayer

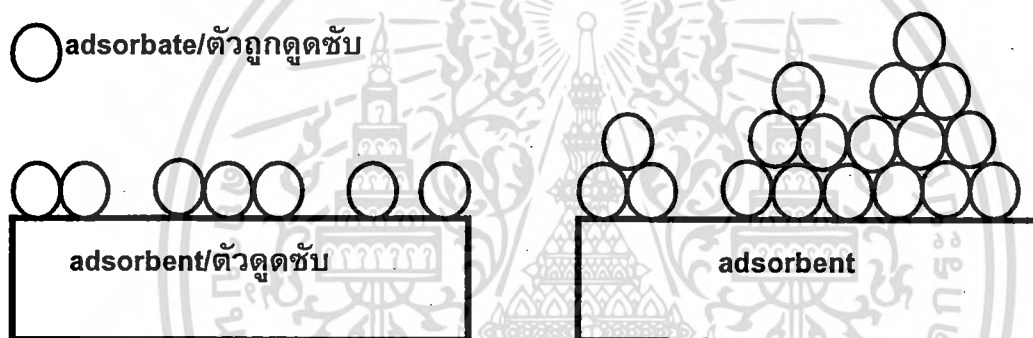
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยเป็นอย่างสูงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type IV Isotherm เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 15-1000 อังสตรอม การดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรก ๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคบลิ้นภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์ เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Isotherm Type II คือเกือบเป็น monolayer ที่สมบูรณ์ หรือเป็น multilayer นั้นเอง

Type V Isotherm การดูดซับคล้าย Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดและตัวดูดซับมีค่าน้อย ๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1000 อังสตรอม เป็นการดูดซับแบบ multilayer



A) monolayer adsorption

B) multilayer adsorption

ภาพที่ 4 การดูดซับแบบ monolayer adsorption (A) และ multilayer adsorption (B)
ที่มา : ดัดแปลงจาก Masel (1996)^[465]

2. สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ

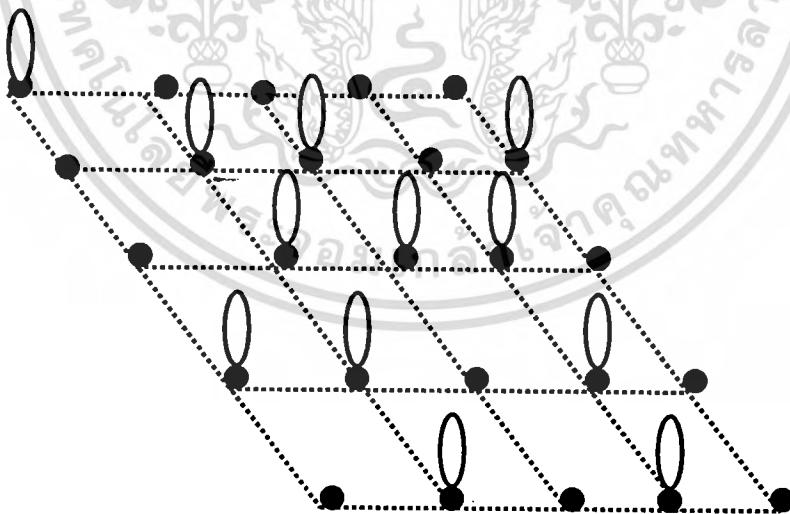
การอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ จะนิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรง แล้วคำนวณหาค่าต่าง ๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ โดยสมการที่ใช้มีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ รูปแบบของสมการ Langmuir adsorption isotherm และ Freundlich adsorption isotherm

โดยเป็น isotherm ที่ใช้ทำนายปริมาณที่ถูกดูดซับ เมื่อศึกษาโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เป็นไอโซเทอร์มที่นิยมใช้ในการศึกษา biosorption ไอโซเทอร์มนี้จะอธิบายการดูดซับโลหะหนักที่เหมาะสมกับตัวดูดซับโดยไม่ศึกษาเรื่องผลกระทบของพีเอช สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Langmuir จะแปรผลในรูปค่าการดูดซับสูงสุด ส่วน Freundlich จะแปรผลในรูปของความชอบในการดูดซับ กับตำแหน่งยึดจับ (binding sites) ที่อยู่บนตัวดูดซับ

2.1. Langmuir adsorption isotherm (ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์) แบบจำลองนี้พัฒนามาจากสมมุติฐานคือ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น จำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกจับกับตำแหน่งยึดจับ บนตัวดูดซับก็มากขึ้น ขีดขวางการจับของโมเลกุลอื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่าง ตำแหน่งยึดจับที่ว่างบนตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะการดูดซับชั้นเดียว (monomolecular layer) โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer (ภาพที่ 5) คือ มีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว ไอออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด
- เมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
- พื้นที่ผิวในการดูดซับ มีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน เป็น homogeneous surface
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ



ภาพที่ 5 ลักษณะการดูดซับของ Langmuir model แสดงการดูดซับแบบ monomolecular layer, จุดสีดำที่บ่งชี้ตำแหน่งยึดจับบนตัวดูดซับ วงกลมรูปไข่สีขาวแสดงโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Masel (1996)^[465]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง Langmuir adsorption isotherm มีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{Q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e}$$

สมการที่ 3

โดย

q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่าย (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่าย)

Q_m คือ ปริมาณโลหะหนักสูงสุด (maximum capacity) ที่สาหร่ายสามารถดูดซับได้ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่าย)

C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_a คือ ค่าคงที่ในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพรรคของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น สามารถเขียนได้เป็น 4 แบบคือ

Langmuir 1:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_m} + \frac{1}{Q_m} C_e$$

สมการที่ 4

การหาค่าความสามารถสูงสุด (Q_m) ในการดูดซับทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง C_e/q_e เป็นแกน Y และ C_e เป็นแกน X

ซึ่งค่าคงที่ K_a หาได้จากค่าจุดตัดแกน Y และ Q_m หาได้จากค่าความชันของกราฟ

Langmuir 2:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m}$$

สมการที่ 5

การหาค่าความสามารถสูงสุด (Q_m) ในการดูดซับทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง $1/q_e$ เป็นแกน Y และ $1/C_e$ เป็นแกน X

ซึ่งค่าคงที่ K_a หาได้จากค่าความชันของกราฟ และ Q_m หาได้จากค่าจุดตัดแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Langmuir 3:

$$q_e = Q_m - \left(\frac{1}{K_a} \right) \frac{q_e}{C_e}$$

สมการที่ 6

การหาค่าความสามารถสูงสุด (Q_m) ในการดูดซับทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง q_e เป็นแกน Y และ q_e / C_e เป็นแกน X

ซึ่งค่าคงที่ K_a หาได้จากค่าความชันของกราฟ และ Q_m คือค่าจุดตัดแกน Y

Langmuir 4:

$$\frac{q_e}{C_e} = K_a Q_m - K_a q_e$$

สมการที่ 7

การหาค่าความสามารถสูงสุด (Q_m) ในการดูดซับทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง q_e/C_e เป็นแกน Y และ q_e เป็นแกน X

ซึ่งค่าคงที่ K_a คือค่าความชันของกราฟ และ Q_m หาได้จากค่าจุดตัดแกน Y

2.1.1. การคำนวณค่า K_a และ Q_m จากกราฟ เมื่อทราบว่ารูปแบบสมการเป็นแบบใด และเลือกทำการสร้างกราฟแบบที่ต้องการแล้ว ให้เปรียบเทียบสมการที่เลือกเป็นสมการเส้นตรง ในรูป $Y=aX + b$ โดย Y คือค่าที่สร้างเป็นแกน Y และ X คือค่าที่สร้างเป็นแกน X และ b คือจุดตัดบนแกน Y ส่วน a คือความชัน

เช่น สมการ Langmuir 2

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m}$$

สร้างกราฟระหว่าง $1/q_e$ เป็นแกน Y และ $1/C_e$ เป็นแกน X (ภาพที่ 6)

ดังนั้นเมื่อสร้างกราฟเสร็จ และเทียบเป็นสมการเส้นตรง

$$Y = a X + b$$

จะพบว่าจากสมการเทียบได้เป็น

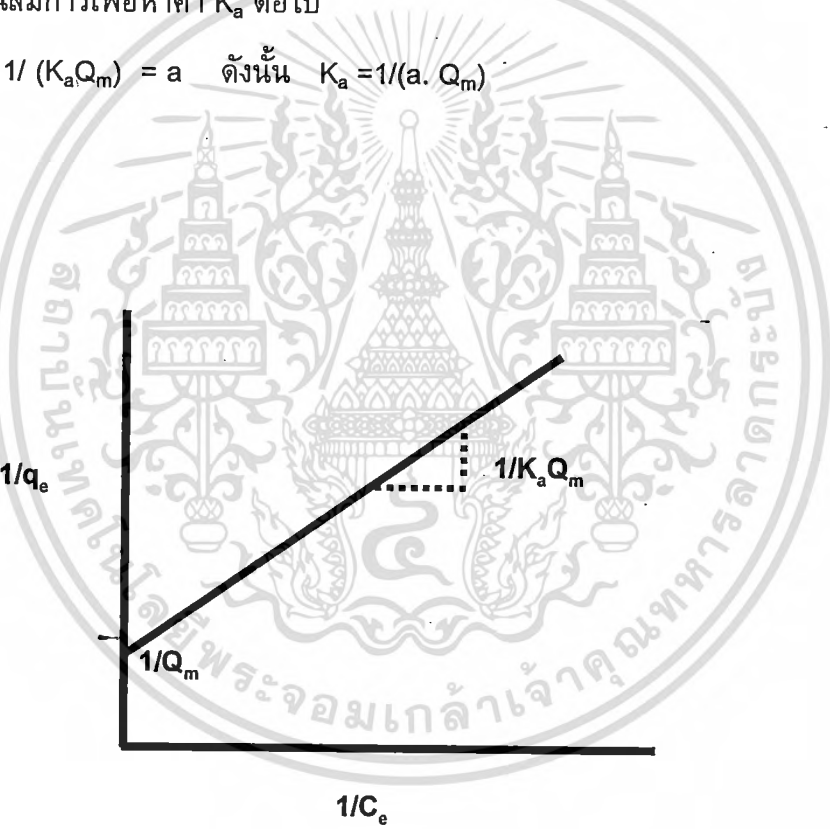
$$Y = (1/(K_a Q_m)) (X) + 1/Q_m$$

ซึ่ง $1/(K_a Q_m)$ คือค่า a ในสมการเส้นตรงหรือค่าความชัน

ส่วนค่า $1/Q_m$ คือค่า b ในสมการเส้นตรง หรือค่าจุดตัดแกน Y

เนื่องจากค่า a และ b เป็นค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงอยู่แล้ว จึงทำการเทียบหาค่าของ K_a และ Q_m ต่อไปได้ จาก $1/Q_m = b$ ดังนั้นค่า $Q_m = 1/b$ จะทำให้ได้ค่า Q_m จากนั้นนำค่านี้ไปแทนในสมการเพื่อหาค่า K_a ต่อไป

จาก $1/(K_a Q_m) = a$ ดังนั้น $K_a = 1/(a \cdot Q_m)$



ภาพที่ 6 ลักษณะกราฟเส้นตรงของ Langmuir adsorption isotherm

2.2. Freundlich adsorption isotherm ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิค สมการของ Freundlich isotherm นี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า

- การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer
- ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว บนตำแหน่งยึดจับที่ต่างชนิดกัน (heterogeneous binding site)
- ใช้ได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

สมการของ Freundlich คือ

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 8}$$

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดย

q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่าย)

C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F และ $1/n$ คือค่าคงที่

ค่า K_F เป็นดัชนีถึงความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม และ n ความแรงในการดูดซับ (adsorption intensity) ซึ่งไม่มีหน่วย

เมื่อนำค่า $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์โดยให้ $\ln q_e$ เป็นแกน Y และ $\ln C_e$ เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\ln K_F$ (ภาพที่ 7)

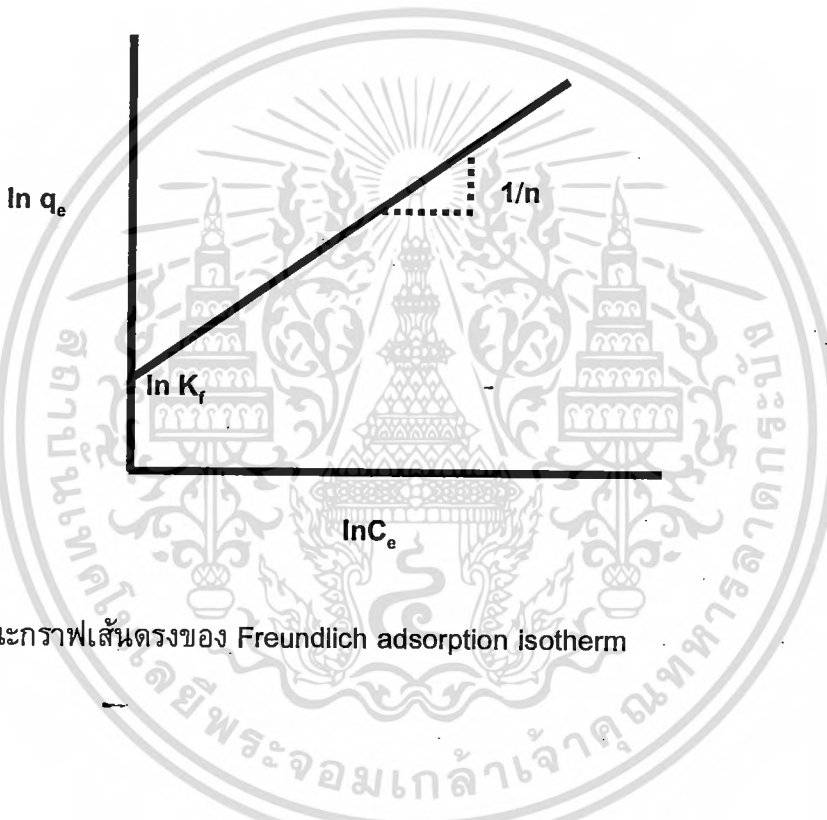
เมื่อ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้น ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น

เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมากกว่า 1 คือมีความชันมาก จะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำ อัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและกลไกการดูดซับ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $1/n$ น้อยกว่า 1 หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดแกน X นั้น แสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ

อย่างไรก็ตามจากลักษณะของ Freundlich Isotherm จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ตรวจจับค่าความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ Freundlich ที่สำคัญข้อหนึ่ง คือไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



ภาพที่ 7 ลักษณะกราฟเส้นตรงของ Freundlich adsorption isotherm

ความสำคัญของการเลือกใช้ไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารยวคือ ทำให้ สามารถอธิบายสมดุลของสารยวในระบบการกำจัดโลหะหนักได้ถูกต้องทั้งในระบบแบบกะ (batch) และระบบต่อเนื่อง (continuous systems) เพื่อที่จะสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบระบบบำบัดและการคัดเลือกชนิดสารยวที่เหมาะสม^[157] ยิ่งไปกว่านั้น ไอโซเทอร์มเหล่านี้ยังสามารถช่วยทำให้สามารถทำนายสมดุลการดูดซับที่ค่าพีเอชหรือที่ความเข้มข้นของโลหะหนักตั้งต้นต่างกันได้ด้วย^[707]

นอกจากนี้ยังพบว่ามีไอโซเทอร์มอีกบางประเภทที่สามารถนำมาใช้อธิบายการดูดซับได้ เช่น BET adsorption isotherm, Redlich-Peterson Isotherm, Koble-Corrigan model, Temkin isotherm โดยมีรายละเอียดของแต่ละไอโซเทอร์มคือ

บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. BET adsorption isotherm ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบบี อี ที (Brunauer-Emmett-Teller) ไอโซเทอร์มแบบนี้พัฒนามาจากไอโซเทอร์มแบบ Langmuir ใช้อธิบายการดูดซับหลายชั้น (multilayer) หรือแบบที่ 2-4 (type II-IV) โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
- ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการ BET Adsorption Isotherm มีรูปสมการคือ

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)(C_e - C_s)]}$$

สมการที่ 10

โดย

X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

X_m คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_s คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ 10 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \frac{B - 1}{X_m B} \frac{C_e}{C_s}$$

สมการที่ 11

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $C_e / [(C_s - C_e)X]$ เป็นแกน Y กับ C_e / C_s เป็นแกน X จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/(X_m B)$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$

2.4. Redlich-Peterson isotherm เป็นไอโซเทอร์มที่รวม Langmuir และ Freundlich เข้าด้วยกัน โดยรูปสมการเป็นสมการเส้นตรงที่ขึ้นกับความเข้มข้นในรูปเศษส่วนและเลขยกกำลัง โดยมีสมการคือ

$$q_e = \frac{AC_e}{1 + BC_e^g} \quad \text{สมการที่ 12}$$

โดย

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับบนเซลล์สำหรับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาร)

สมการนี้มีค่าคงที่ 3 ค่า คือ A, B และ g โดย g มีค่ามากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 ($0 < g < 1$) ถ้าค่า g เท่ากับ 1 คือการดูดซับแบบ monolayer โดย A มีหน่วยเป็น (ลิตรต่อกรัม) B มีหน่วยเป็น (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และสามารถเขียนสมการได้ในรูปสมการเส้นตรงคือ

$$\ln\left(A\frac{C_e}{q_e} - 1\right) = g \ln(C_e) + \ln(B) \quad \text{สมการที่ 13}$$

A, B และ g สามารถคำนวณได้จากการสร้างกราฟเส้นตรงนี้

2.5. Koble-Corrigan model เป็นไอโซเทอร์มที่แสดงค่าการดูดซับที่สมดุล โดยเป็นการรวมไอโซเทอร์ม Langmuir และ Freundlich เข้าด้วยกัน โดยมีสมการคือ

$$q_e = \frac{aC_e^n}{1 + bC_e^n} \quad \text{สมการที่ 14}$$

โดย

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับบนเซลล์สำหรับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาร)

โดยค่า a, b และ n คือค่าคงที่ของ Koble-Corrigan

2.6. Temkin isotherm เป็นไอโซเทอร์มที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระ (free energy) ต่างจากไอโซเทอร์ม Langmuir และ Freundlich คือ ไอโซเทอร์มแบบ Temkin จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับซึ่งมีสมมุติฐานว่าพลังงานอิสระในการดูดซับนั้น เกิดจากการทำงานของสิ่งที่ปกคลุมพื้นผิว โดยมีสมการคือ

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e)$$

สมการที่ 15

โดย

A_T คือ ค่าคงที่ในการดูดซับที่จุดสมดุล ขึ้นกับพลังงานสูงสุดในการดูดซับ

b_T คือ ค่าคงที่ของ Temkin isotherm

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.315 จูลต่อโมลเคลวิน)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสาหร่าย)

2.7. สมการดัดแปลงของ Langmuir adsorption isotherm โดยพบว่าได้มีการดัดแปลงสมการของ Langmuir เพื่อใช้อธิบายในกรณีที่มีโลหะผสมกันอยู่ 2 ชนิดในสารละลายเดียวกัน เช่น Lee et al. (2004)^[440] ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณเพื่ออธิบายการดูดซับของระบบที่มีโลหะหนักผสมกันสองชนิด โดยเมื่อถึงจุดสมดุลจะเขียนได้ดังนี้



โดย

K_1 และ K_2 คือค่าคงที่ของการดูดซับที่จุดสมดุล คือค่าการดูดซับ/ ค่าการคาย ($k_{\text{adsorption}}/ k_{\text{desorption}}$) (ความหมายเดียวกับสมการ Langmuir เดิม)

B คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

M_1 คือ โลหะหนักชนิดที่ 1 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

M_2 คือ โลหะหนักชนิดที่ 2 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ดังนั้นจึงเขียนสมการดัดแปลงของ Langmuir ได้เป็น

$$q(M_1) = \frac{Q_m K_1 C_e [M_1]}{1 + K_1 C_e [M_1] + K_2 C_e [M_2]} \quad \text{สมการที่ 18}$$

$$q(M_2) = \frac{Q_m K_2 C_e [M_2]}{1 + K_1 C_e [M_1] + K_2 C_e [M_2]} \quad \text{สมการที่ 19}$$

โดย

Q_m คือ ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

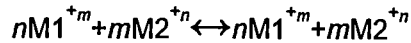
K_1 และ K_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับที่จุดสมดุล ค่าการดูดซับ/ ค่าการคาย ($k_{\text{adsorption}}/ k_{\text{desorption}}$)

$q(M_1)$ และ $q(M_2)$ คือ ปริมาณโลหะหนัก M_1 และ M_2 ที่ถูกดูดซับที่ความเข้มข้น ณ จุดสมดุล ($C_e[M_1]$ และ $C_e[M_2]$) ของโลหะ M_1 และ M_2

C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.8. ion-exchange isotherm ได้มีรายงานว่าหากในการทดลองที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักต่างกัน จำนวนตัวดูดซับต่างกัน จะทำให้ไม่มีไอโซเทอร์มใดที่สามารถอธิบายได้¹⁵⁷¹ ทำให้เปรียบเทียบระบบที่ต่างกันที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและมีจำนวนตัวดูดซับต่างกันไม่ได้ จึงได้มีการนำ ion exchange model มาใช้อธิบาย ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะหนัก M_1 และ โลหะที่จับอยู่กับตัวดูดซับ M_2

โดยปฏิกิริยาของการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange reaction) คือ



สมการที่ 20

และการดูดซับที่จุดสมดุลมีค่าคงที่คือ

$$K_{M_1M_2} = \frac{q_{M_1}^n C_{fM_2}^m}{q_{M_2}^m C_{fM_1}^n}$$

สมการที่ 21

ดังนั้นสมการ ion-exchange isotherm เขียนได้เป็น

$$q_{M_1} = \frac{Q}{1 + C_{fM_2} / K_{M_1M_2} C_{fM_1}}$$

สมการที่ 22

$$q_{M_2} = \frac{Q}{1 + C_{fM_1} / K_{M_1M_2} C_{fM_2}}$$

สมการที่ 23

โดย

M_1 คือ โลหะหนัก และ M_2 คือไอออนที่จับอยู่กับสารหลายแต่เดิม (เช่น Ca^{2+} , K^+ , H^+ ฯลฯ)

m และ n คือประจุของโลหะ M_1 และ M_2 ตามลำดับ

Q คือ ความเข้มข้นทั้งหมดของตำแหน่งยึดจับที่อยู่บนตัวดูดซับ

C_{fM_1} และ C_{fM_2} คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่จุดสมดุล ของโลหะ M_1 และ M_2 ตามลำดับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_{M_1} และ q_{M_2} คือ ปริมาณของโลหะ M_1 และ M_2 ที่อยู่บนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและกลไกการดูดซับ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอร์มที่นิยมใช้อธิบายการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย

ในการดูดซับโลหะหนักโดยการใช้สาหร่ายนั้นไอโซเทอร์มการดูดซับที่พบว่ามีค่านิยมใช้คือ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm โดยในแต่ละการทดลองมักมีการนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย โดยการพิจารณาว่าสมการใดเหมาะสมมากกว่ากันนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2 หรือค่า correlation coefficient) ที่ได้จากสมการนั้นเอง โดยสมการใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงกว่า แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองใกล้เคียงกับทฤษฎีของสมการนั้นมากที่สุด หลังจากหาค่าสมการที่เหมาะสมที่สุดได้แล้ว จึงนำสมการนั้นมาใช้อธิบายผลการทดลอง เช่นหากเปรียบเทียบสมการระหว่าง Langmuir และ Freundlich แล้ว พบว่าสมการ Langmuir ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สูงกว่าสมการของ Freundlich แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองนั้นสอดคล้องตามสมมุติฐานของสมการ Langmuir และให้ใช้สมการ Langmuir ในการอธิบายผลการทดลองนั้น ซึ่งสมการ Langmuir จะมีสมมุติฐานที่ต่างจาก Freundlich คือการดูดซับเกิดบนตำแหน่งยึดจับที่เป็นชนิดเดียวกัน (homogenous binding sites) และสามารถทำนายค่าการดูดซับสูงสุด (Q_m) ได้ ตัวอย่างการทดลองใช้สมการ Langmuir และ Freundlich เพื่ออธิบายการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายแสดงในตารางที่ 1

และในบางการทดลองพบว่าค่าการดูดซับโลหะหนักสอดคล้องกับสมการ Freundlich ในการทดลองนั้นจึงแสดงผลเฉพาะสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดหรือสมการที่สอดคล้องกับการดูดซับโลหะหนักในการทดลองนั้นมากที่สุด (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 แสดงค่าเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich เพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีตำแหน่งจุดทดสอบไม่เท่ากัน เนื่องจากเอกสารงานวิจัยแต่ละเรื่องแสดงไว้ไม่เท่ากัน)

304

สาหร่าย	โลหะหนัก	Langmuir		Freundlich			เอกสารอ้างอิง	
		Q_m (mg/g)	K_a (l/mg)	r^2	K_F (mg/g)	n		r^2
Division Cyanophyta								
<i>Gloeocapsa gelatinosa</i>	Pb	256.41	1.61	0.9988	61.43	2.34	0.8551	Ruangsomboon et al., 2004a ^[570]
<i>Synechocystis</i> sp.	Cu	38.1	0.021	0.991	4.59	2.76	0.976	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	189.8	0.001	0.917	2.83	2.37	0.991	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cr (IV)	153.6	0.002	0.921	1.54	1.40	0.994	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Microcystis</i> sp. field	Cu	125.00	1.33	0.203	1.76	3.16	0.9777	Singh et al., 1998 ^[601]
<i>Microcystis</i> sp. lab	Cu	100.00	0.45	0.012	1.56	2.94	0.943	Singh et al., 1998 ^[601]
<i>Microcystis</i> sp. field	Fe	333.33	3.00	0.935	2.16	3.67	0.727	Singh et al., 1998 ^[601]
<i>Microcystis</i> sp. lab	Fe	333.33	0.50	0.954	1.97	2.11	0.849	Singh et al., 1998 ^[601]
<i>Calothrix marchica</i>	Pb	57.14	1.77	0.9976	17.94	3.33	0.8523	Ruangsomboon et al., 2004a ^[570]
Division Rhodophyta								
<i>Gracilaria corticata</i>	Pb	54	15.8(x100)	0.862	24.8	7.5	0.987	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>G. canaliculata</i>	Pb	41.8	23.2(x100)	0.717	21.3	8.7	0.827	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Polysiphonia violacea</i>	Pb	102	132(x100)	0.75	89.8	45.2	0.92	Jalali et al., 2002 ^[412]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	Langmuir		Freundlich			เอกสารอ้างอิง	
		Q _m (mg/g)	K _a (l/mg)	r ² (mg/g)	K _F	n		r ²
Division Chlorophyta								
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cu (II)	48.2	0.122	0.999	24.90	8.69	0.987	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni (II)	59.7	0.050	0.992	18.31	4.87	0.984	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cr (IV)	79.3	0.003	0.937	0.48	1.26	0.980	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Cu (II)	33.3	0.019	0.995	2.85	2.32	0.992	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni (II)	30.2	0.022	0.994	0.27	1.13	0.986	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cr (IV)	58.8	0.005	0.868	0.68	1.42	0.995	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Cladophora glomerata</i>	Pb	73.5	2160	0.69	37.5	8.5	0.892	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Ulva lactuca</i>	Pb	126.5	990	0.925	42.5	5.2	0.974	Jalali et al., 2002 ^[412]
Division Phaeophyta								
<i>Sargassum</i> sp.	Cd (25°C)	-	-	-	13.9	2.45	0.941	Cruz et al., 2004 ^[88]
	Cd (40°C)	-	-	-	14.6	2.92	0.955	Cruz et al., 2004 ^[88]
	Cd (55°C)	-	-	-	13.2	3.06	0.977	Cruz et al., 2004 ^[88]
<i>S. hystrix</i>	Pb	285	430	0.997	39.5	2.8	0.968	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>S. natans</i>	Pb	238	560	0.999	47.4	3.5	0.935	Jalali et al., 2002 ^[412]
<i>Padina pavonia</i>	Pb	217.4	720	0.992	46.3	3.65	0.98	Jalali et al., 2002 ^[412]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและงานพลศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 2 ค่าการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายจากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich

สาหร่าย	โลหะหนัก	Freundlich			เอกสารอ้างอิง
		K _F (mg/g)	1/n	r ²	
Division Cyanophyta					
Gloeothece magna- dry	Cd	0.91	0.5	-	Mohamed, 2001 ^[482]
	Mn	2.39	0.54	-	Mohamed, 2001 ^[482]
G. magna -living	Cd	0.15	0.8	-	Mohamed, 2001 ^[482]
	Mn	0.06	1.7	-	Mohamed, 2001 ^[482]
Oscillatoria limnetica	Cu	23.96	0.50	0.72	Tien, 2002 ^[629]
	Cd	1.37	0.92	0.85	Tien, 2002 ^[629]
	Pb	31.88	0.48	0.78	Tien, 2002 ^[629]
Anabaena spiroides	Cu	0.20	1.17	0.99	Tien, 2002 ^[629]
	Cd	0.92	0.85	0.97	Tien, 2002 ^[629]
	Pb	1.46	0.88	0.87	Tien, 2002 ^[629]
Divison Chlorophyta					
Eudorina elegans	Cu	1.08	1.07	0.93	Tien, 2002 ^[629]
	Cd	1.44	0.61	0.90	Tien, 2002 ^[629]
	Pb	3.83	0.70	0.86	Tien, 2002 ^[629]
Chlorella vulgaris	Cu	9.47	0.78	0.73	Tien, 2002 ^[629]
	Cd	4.76	0.85	0.92	Tien, 2002 ^[629]
	Pb	10.96	0.57	0.87	Tien, 2002 ^[629]
Schizomeris leibleinii	Fe (pH 1.5)	1.819	0.554	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Fe (pH 2.5)	12.77	0.454	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (pH 3.0)	0.938	0.771	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (pH 4.0)	3.096	0.604	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (pH 4.5)	5.385	0.504	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (pH 3.0)	0.153	0.912	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (pH 4.0)	0.352	0.826	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (pH 5.0)	1.716	0.685	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
Fe (20°C)	8.75	0.494	-	Ozer et al., 1999 ^[515]	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	Freundlich			เอกสารอ้างอิง
		K_F (mg/g)	1/n	r^2	
<i>Schizomeris leibleinii</i>	Fe (30°C)	12.77	0.454	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Fe (40°C)	7.34	0.605	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (20°C)	2.158	0.692	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (30°C)	5.385	0.504	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb (40°C)	2.785	0.634	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (20°C)	1.097	0.688	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (30°C)	1.716	0.685	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd (40°C)	1.493	0.693	-	Ozer et al., 1999 ^[515]
Division Phaeophyta					
<i>Laminaria japonica</i>	Cu	24.86	0.22	0.96	Zhou et al., 1998 ^[709]
	Cd	34.27	0.19	0.90	Zhou et al., 1998 ^[709]
<i>Sargassum kjellmanianum</i>	Cu	26.69	0.22	0.99	Zhou et al., 1998 ^[709]
	Cd	31.03	0.22	0.98	Zhou et al., 1998 ^[709]

หมายเหตุ : “-” คือไม่พบข้อมูล

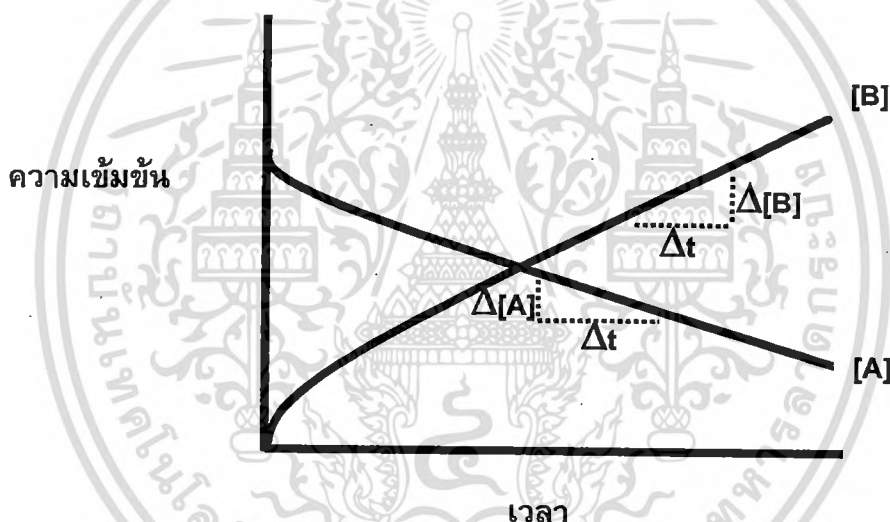
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetics of adsorption) เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/ rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพเหมาะกับการใช้งานระบบต่าง ๆ เช่น batch reactors, fixed beds และ fluidized beds เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 10 สิงหาคม 2563 สำนักส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กฎอัตราเร็วของปฏิกิริยา

อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate of reaction) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา อัตราเร็วของปฏิกิริยาเดียวกันไม่ว่าจะคิดจากสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ต้องเท่ากัน เช่น ปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ สามารถแสดงอัตราได้ทั้งการลดลงของสาร A และการเพิ่มขึ้นของสาร B เทียบกับเวลา (ภาพที่ 8) $-d[A]/dt$ และ $d[B]/dt$ ตามลำดับ โดยมีเส้นโค้งแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ขึ้นอยู่กับการเวลา ในระหว่างที่ปฏิกิริยาดำเนินไปความเข้มข้นของสารเปลี่ยนไป อัตราเร็วของปฏิกิริยาและความชันของเส้นโค้งจึงเปลี่ยนตาม มีหน่วยเป็นความเข้มข้นของสารต่อเวลา เช่น โมลต่อลิตรต่อวินาที โดยหน่วยของเวลาอาจเป็นวินาที นาที หรือชั่วโมง แล้วแต่ว่าปฏิกิริยานั้นเกิดเร็ว ช้าเท่าใด



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร A และสาร B

ที่มา : ดัดแปลงจาก www.sparknotes.com ^[694]

2. อันดับของปฏิกิริยา^[614]

อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสาร โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่อหนึ่งหน่วยเวลา สามารถแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่าสมการอัตราเร็วหรือกฎของอัตราเร็ว (rate law) (ภาพที่ 9) ได้ดังนี้^[565]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของอัตราเร็ว (rate law) = $k[C]^n$

โดย C คือ ความเข้มข้นของสาร

k คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว (rate constant) ณ อุณหภูมิหนึ่ง

n คือ อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction)

ถ้า $n = 0$ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate) = $k[C]^0 = k$

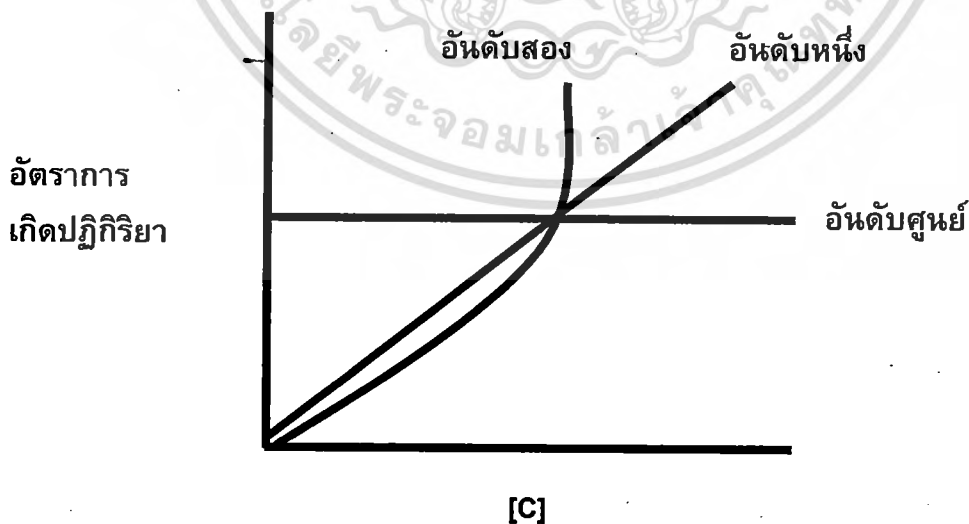
อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับ 0 (zero order)

ถ้า $n = 1$ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate) = $k[C]^1$

อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้แปรตามความเข้มข้นของสาร $[C]^1$ เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับ 1 (first order)

ถ้า $n = 2$ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate) = $k[C]^2$

อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้แปรตามกำลังสองของความเข้มข้นของสาร $[C]^2$ เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับ 2 (second order)



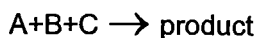
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาที่ปฏิกิริยา

อันดับที่ศูนย์ หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและกลศาสตร์การดูดซับ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในกรณีที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดจากสารตั้งต้นมากกว่า 1 ชนิด ค่า n ที่แสดงถึงอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) ในที่นี้จะหมายถึงอันดับรวมของปฏิกิริยา (overall order of reaction) ที่เทียบกับสารตั้งต้นแต่ละตัว เช่น



$$\text{กฎของอัตราเร็ว (rate law)} = k[A]^x[B]^y[C]^z$$

โดย x , y และ z คืออันดับของปฏิกิริยา ในด้านของสาร A, B และ C ตามลำดับ

อันดับของปฏิกิริยานี้ (n) จึงเกิดจากการรวมกันของ x , y และ z หรือ $n=x+y+z$

อันดับของปฏิกิริยาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารสามารถแสดงได้ในรูปของสมการที่เกิดจากการอินทิเกรตกฎของอัตราเร็ว (rate law) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1. ปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ (zero order reaction) คือปฏิกิริยาที่มีอันดับเท่ากับศูนย์ ($n=0$) อัตราเร็วของปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรืออัตราเร็วของปฏิกิริยาคงที่ตลอดเวลาที่ทำปฏิกิริยา

กฎของอัตราเร็ว (rate law)

$$R = -d[A]/dt = k[A]^0 = k$$

สมการที่ 24

เนื่องจาก $[A]^0 = 1$

$$d[A] = -kdt$$

สมการที่ 25

อินทิเกรตสมการจากจุดเริ่มต้นของเวลา (t_1) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $[A]_0$ จนกระทั่งถึงเวลา t_2

สมมุติว่า $[A]$ ที่ $t_1=0$ เป็น $[A]_0$ และ $t_2=t$ เป็น $[A]_t$ จะได้เป็น

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} d[A] = -k \int_{t=0}^{t=t} dt$$

สมการที่ 26

ดังนั้น

$$[A]_t - [A]_0 = -k(t - 0)$$

สมการที่ 27

เทียบกับสมการเส้นตรง

$$[A]_t = [A]_0 - kt$$

สมการที่ 28

$$Y = b + ax$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ 10 ไอซ์เทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

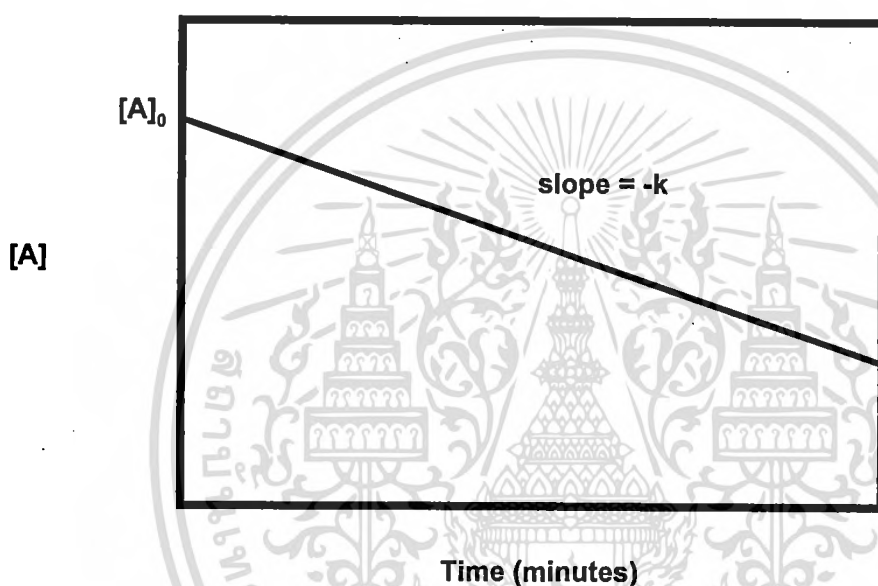
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[A]$ กับเวลา (ภาพที่ 10) เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ค่าความชันของกราฟ (a) เท่ากับ ค่าคงที่ $(-k)$ มีหน่วยเป็นความเข้มข้นต่อเวลา และจุดตัดแกน y (b) เท่ากับ $[A]_0$

โดย

$[A]$ คือ ความเข้มข้นของโลหะที่ระยะเวลาใด ๆ

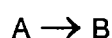
$[A]_0$ คือ ความเข้มข้นของโลหะตั้งต้น ที่เวลาเท่ากับศูนย์ ($t = 0$)

k คือ ค่าคงที่ rate constant



ภาพที่ 10 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาอันดับศูนย์
ที่มา : ดัดแปลงจาก Rossmann (1997)^[565]

2.2. ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (first order reaction) คือปฏิกิริยาที่มีอันดับเท่ากับหนึ่ง ($n=1$) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



กฎของอัตราเร็ว (rate law)

$$R = \frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = k[A]^1$$

สมการที่ 29

เป็นปฏิกิริยาที่มีเพียงสาร A ดังนั้นเมื่อสาร A เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ B, $a = 1$ จึงเป็น

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad \text{สมการที่ 30}$$

อินทิเกรตได้เป็น
$$-\int \frac{d[A]}{[A]} = k \int dt \quad \text{สมการที่ 31}$$

$$-\ln[A] = kt + \text{constant} \quad \text{สมการที่ 32}$$

อินทิเกรตสมการจากจุดเริ่มต้นของเวลา $t = 0$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น A เท่ากับ $[A]_0$ จนกระทั่งถึงเวลาใด ๆ

$$-\int_{[A]_0}^{[A]_t} \frac{d[A]}{[A]} = k \int_0^t dt \quad \text{สมการที่ 33}$$

ได้เป็น
$$-(\ln[A]_t - \ln[A]_0) = kt \quad \text{สมการที่ 34}$$

ดังนั้น
$$-\ln[A]_t = kt - \ln[A]_0 \quad \text{สมการที่ 35}$$

ดังนั้นค่าคงที่คือ
$$\text{Constant} = -\ln[A]_0 \quad \text{สมการที่ 36}$$

สมการ 35 เขียนในรูปใหม่ที่นิยมใช้ได้เป็น

$$\ln\left(\frac{[A]_t}{[A]_0}\right) = -kt \quad \text{สมการที่ 37}$$

ในการทดลองหาค่าคงที่ k มักนิยมเขียนในรูปสมการ

$$\ln [A]_t = \ln [A]_0 - kt \quad \text{สมการที่ 38}$$

เทียบกับสมการได้เป็น $y = b + ax$

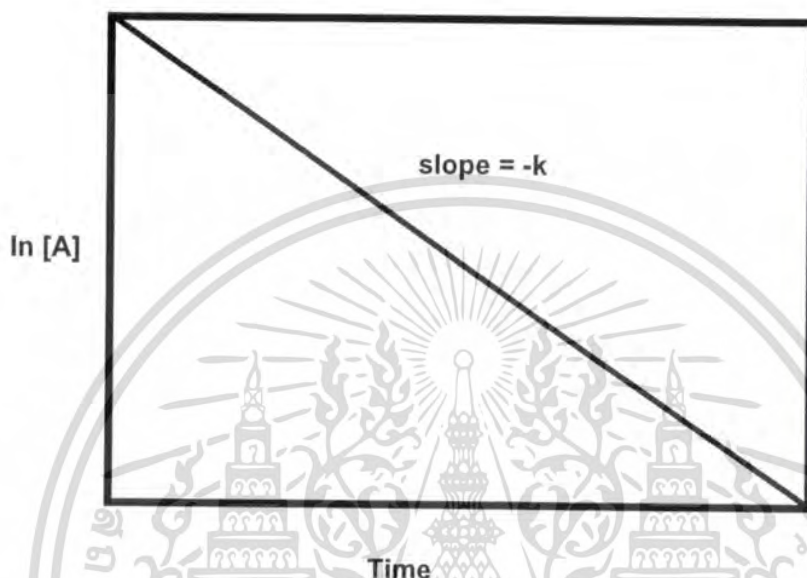
โดย

$[A]_0$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A

$[A]_t$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A ที่เวลาใด ๆ

k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[A]_t$ กับเวลา (ภาพที่ 11) เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ค่าความชันของกราฟ (a) เท่ากับค่าคงที่ $(-k)$ มีหน่วยเป็น $1/\text{เวลา}$ และจุดตัดแกน Y (b) เท่ากับ $\ln[A]_0$ โดยค่า $\ln[A]_t$ จะลดลง เมื่อเวลามากขึ้น



ภาพที่ 11 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
ที่มา : ดัดแปลงจาก Rossmann (1997) ^[565]

2.3. ปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (second order reaction) คือปฏิกิริยาที่มีอันดับเท่ากับสอง ($n=2$) อัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นปฏิภาคกับกำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีสองแบบคือ

แบบแรก เกิดจากสารประเภทเดียวกันทำปฏิกิริยากัน เช่น สาร A กับ A



กฎของอัตราเร็ว (Rate law) $R = -1/2 (d[A]/dt) = k[A]^2$ สมการที่ 40

แบบที่สอง เกิดจากสารสองประเภททำปฏิกิริยากัน เช่น สาร A กับ B



กฎของอัตราเร็ว (Rate law) $R = -d[A]/dt = k[A][B]$ สมการที่ 42

เลขชี้กำลังของ [A] เท่ากับ 1 และเลขชี้กำลังของ [B] ก็เท่ากับ 1 รวมกันแล้วเป็น 2 จึงนับเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งในส่วนของ A และอันดับที่หนึ่งในส่วนของ B ปฏิกิริยาอันดับที่สองประเภทนี้มักพบเสมอ กับปฏิกิริยาในสารละลาย

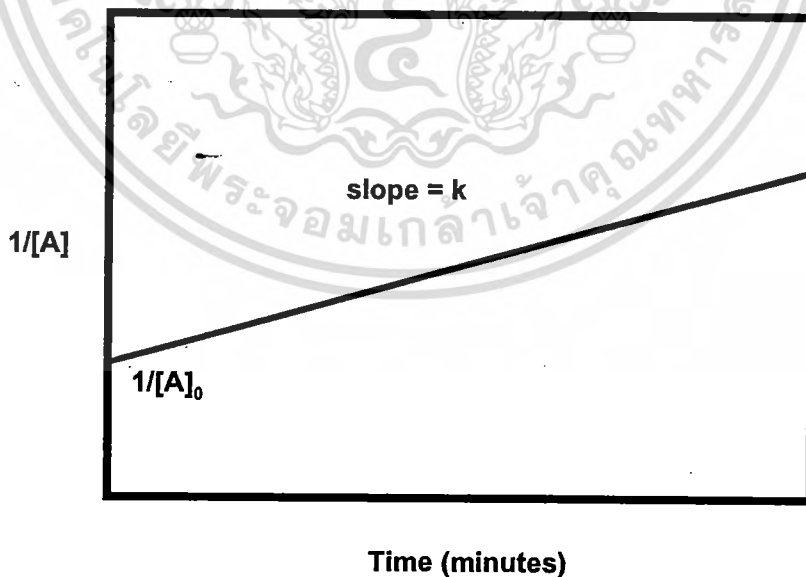
อินทิเกรตสมการ 40, จากจุดเริ่มต้นของเวลา (t_0) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $[A]_0$ จนกระทั่งถึงเวลาใด ๆ ได้เป็น

$$-\int_{[A]_0}^{[A]_t} \frac{d[A]}{[A]^2} = 2k \int_0^t dt \quad \text{สมการที่ 43}$$

$$\text{ซึ่งให้} \quad \frac{1}{[A]_t} = \frac{1}{[A]_0} + 2kt \quad \text{สมการที่ 44}$$

เทียบกับสมการเส้นตรง $y=ax+b$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ กับเวลา (ภาพที่ 12) เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ค่าความชันของกราฟ (b) เท่ากับค่าคงที่ ($2k$) มีหน่วยเป็น $1/\text{เวลา}$ และความเข้มข้นต่อเวลา และจุดตัดแกน y (b) เท่ากับ $1/[A]_0$



ภาพที่ 12 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาอันดับสอง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rossmann (1997)^[565]

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาหาอันดับของปฏิกิริยา เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายได้ ด้วยการนำข้อมูลนี้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอันดับ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3 แล้วหาอันดับของปฏิกิริยาด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลการทดลองกับรูปแบบของสมการอันดับ ด้วยค่า r^2 (correlation coefficient) ที่มีค่าเข้าใกล้ 1.0 จากสมการการสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการอันดับ

ตารางที่ 3 รูปแบบของสมการอันดับจากการอินทิเกรต

Order	rate	integrated rate equation	straight-line plot	slope of plot	units of k
0	$k[A]^0 = k$	$[A] = -kt + [A]_0$	$[A] \text{ vs } t$	$-k$	Conc/time
1	$k[A]$	$\ln[A] = -kt + \ln [A]_0$	$\ln[A] \text{ vs } t$	$-k$	1/time
2	$k[A]^2$	$1/[A] = kt + 1/[A]_0$	$1/[A] \text{ vs } t$	k	1/conc.time
pseudo 1	$k[A]$	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t$	$\log(q_e - q_t) \text{ vs } t$	k	1/time
psuedo 2	$k[A]^2$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	$t/q_t \text{ vs } t$	q_e	g/conc.time

โดยตารางที่ 3 ได้สรุปถึงอันดับของปฏิกิริยา (order) ค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate) สมการของแต่ละอันดับปฏิกิริยา (integrated rate equation) การสร้างกราฟเส้นตรงระหว่างค่าใด กับค่าใด (straight-line plot) และค่าของความชัน (slope of plot) จะหมายถึงค่าใด และหน่วยของค่าคงที่ (unit of k)

สำหรับการดูดซับโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายนั้นพบว่าได้มีการประยุกต์ใช้รูปแบบสมการเพิ่มขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการดูดซับ โดยสมการที่ได้รับการยอมรับในการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาคือ ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (pseudo first order reaction) และปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน (pseudo second order reaction)

2.4. ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (pseudo first order reaction) ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (pseudo first order) มีสมมุติฐานคืออัตราของการเข้าแทนที่หรือเข้าจับกับตำแหน่งยึดจับของการดูดซับเป็นสัดส่วนกับจำนวนของตำแหน่งยึดจับที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสดงได้ในรูปสมการคือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

สมการที่ 45

โดย

q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

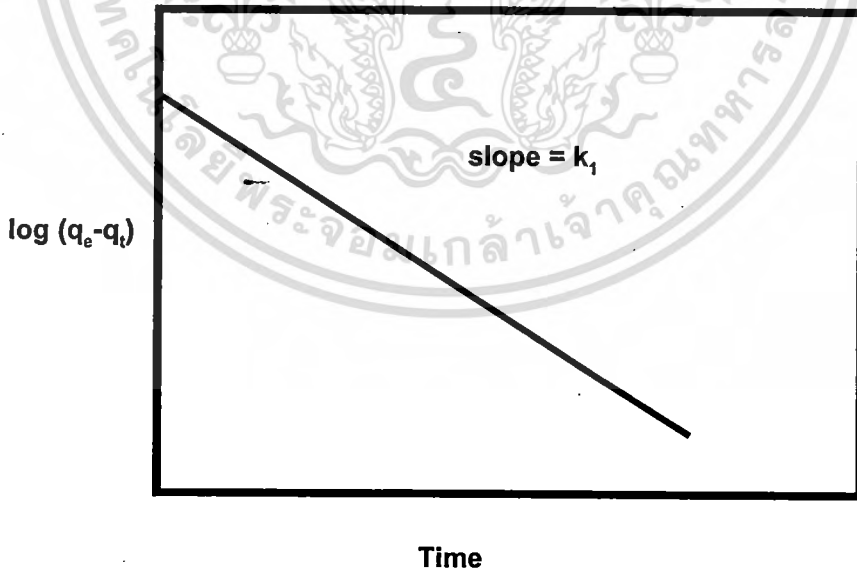
k_1 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ pseudo first-order (ลิตรต่อนาที่)

และสามารถเขียนสมการในรูปเส้นตรงได้เป็น

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t$$

สมการที่ 46

และทำการสร้างกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ เป็นแกน Y กับ t เป็นแกน X โดยค่า q_e หาได้จากจุดตัดของกราฟ และค่า k_1 หาได้จากความชันของกราฟ (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

2.5. ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือน (pseudo second order reaction) ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนมีสมมุติฐานคือ โลหะหนักเข้าไปแทนที่ไอออนต่าง ๆ ที่เกาะอยู่กับผนังเซลล์สาหร่าย เช่น ไอออนพวก Ca^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น และอัตราของการเข้าแทนที่หรือเข้าจับกับตำแหน่งยึดจับของการดูดซับเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของจำนวนของตำแหน่งยึดจับที่ว่าง

โดยแสดงได้ในรูปสมการคือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{สมการที่ 47}$$

โดย

q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ pseudo second-order (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

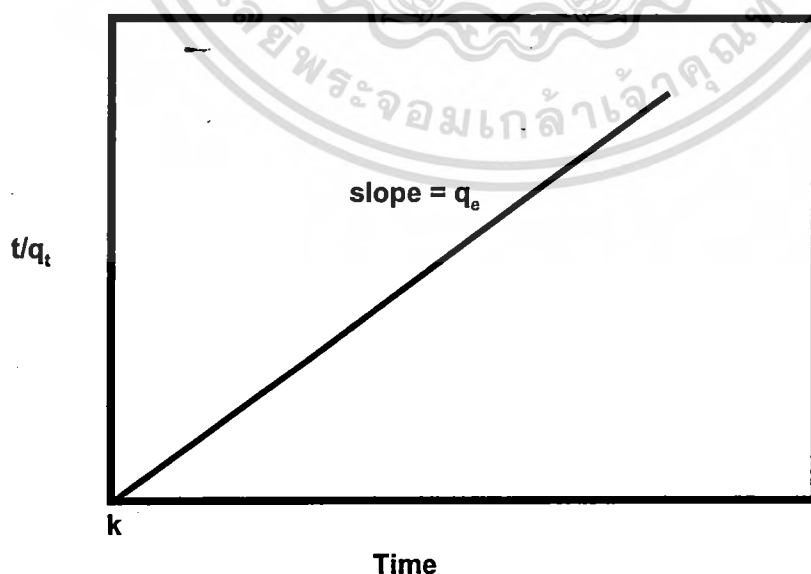
เมื่ออินทิเกรตสมการจะแสดงได้เป็น

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad \text{สมการที่ 48}$$

และสามารถเขียนสมการในรูปเส้นตรงได้เป็น

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{สมการที่ 49}$$

และทำการสร้างกราฟระหว่าง (t/q_t) เป็นแกน Y กับ t เป็นแกน X โดยค่า q_e หาได้จากความชันของกราฟ และค่า k_2 หาได้จากจุดตัดของกราฟ (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ลักษณะกราฟของปฏิกริยาอันดับสองเสมือน

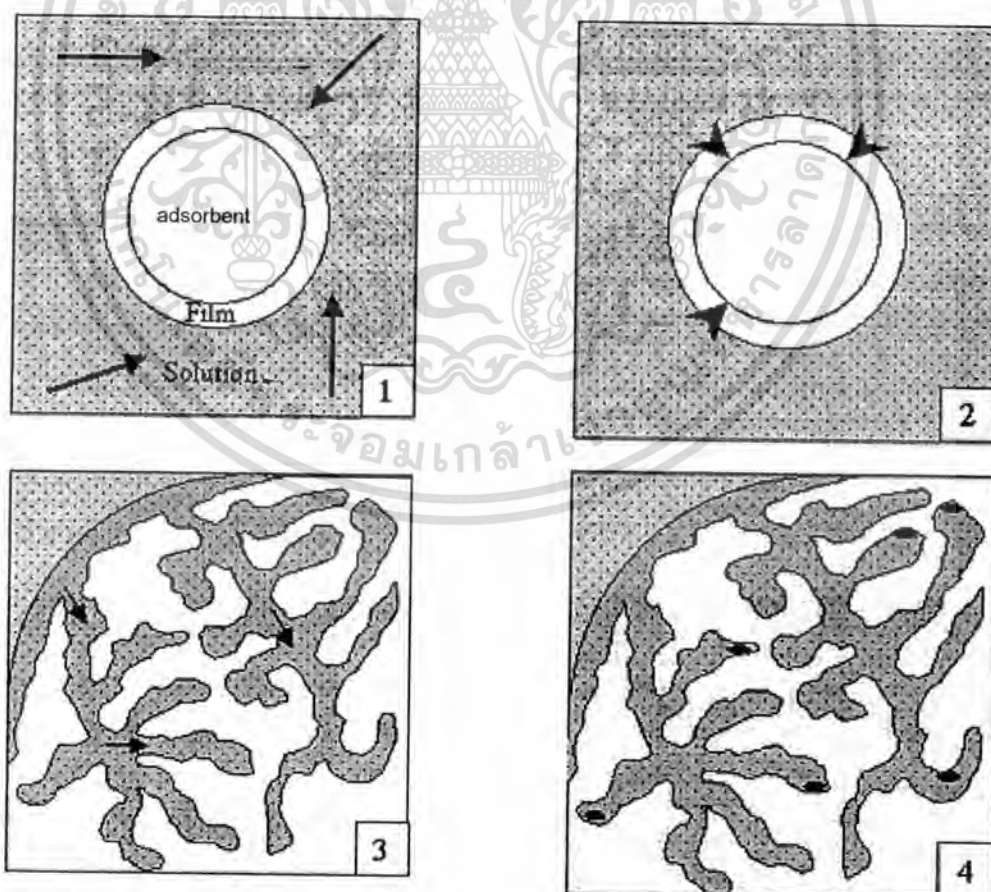
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปอย่างอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตล่วงหน้าจากผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

3. ขั้นตอนอัตราเร็วของการดูดซับ

โดยทั่วไปในการทดลองเรื่องการดูดซับโลหะหนักมักเป็นการทดลองแบบกะ (batch kinetic) คือให้ตัวดูดซับ ดูดซับโลหะหนักได้เต็มที่และจากนั้นจึงนำตัวดูดซับออกจากระบบ สำหรับขบวนการที่โลหะหนักจับกับผิวเซลล์แบบ passive ปกติจะเกิดรวดเร็ว ขั้นตอนสมดุลของการดูดซับจะเกิดเพียงไม่กี่นาที การคาย (desorption) จะต้องการระยะเวลาเท่ากับ ขบวนการดูดซับ (adsorption)

ส่วนขบวนการ การนำโลหะเข้าไปสะสมภายในเซลล์ ใช้เวลายาวกว่าจุดสมดุลเพราะ เกี่ยวกับการนำโลหะเข้าเซลล์สิ่งมีชีวิต กรณีการเกิด microprecipitation ก็ต้องใช้เวลาาน มากกว่าหลายชั่วโมงหรืออาจเป็นวัน

ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/ limiting step) คือ ขั้นตอนควบคุม อัตราเร็วของขบวนการดูดซับทั้งหมด จากกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ เข้าไปในตัวดูดซับ มีการเกิดเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอน (ภาพที่ 15) แต่ละขั้นตอนจะมีอัตรา การเกิดปฏิกิริยาเร็วและช้าต่างกัน โดยขั้นตอนย่อยที่เกิดช้าที่สุด จะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็ว ของการดูดซับ (rate determining step)



ภาพที่ 15 ขั้นตอนของกลไกการดูดซับ

ที่มา : Agrawal (1990)^[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและจะรีบแก้ไขทันที

- ขั้นตอนที่ 1 bulk transport เป็นขั้นที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ในสารละลาย (solution) ที่มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียว (homogeneous) เพื่อไปสู่ยังชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ (adsorbent)
- ขั้นตอนที่ 2 film transport (external film diffusion) เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายภายนอกผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปยังผิวของตัวดูดซับ
- ขั้นตอนที่ 3 intraparticle transport (internal pore diffusion) เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จากผิวเซลล์ของตัวดูดซับ ไปยังตำแหน่งที่มีตำแหน่งยึดจับที่อยู่ในช่องว่างของตัวดูดซับหรือเป็นการแพร่ภายในอนุภาค
- ขั้นตอนที่ 4 adsorption (chemical reaction) เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับยึดจับกับตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ ส่วนใหญ่จะคาดว่าขั้นนี้จะเกิดได้เร็วมาก จึงไม่ต้องนำขั้นตอนนี้มาพิจารณาก็ได้

ในขั้นตอนที่ 1 เมื่อมีการกวนสารละลายหรือให้ความเร็วกับระบบ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลให้ขั้นตอนนี้ไม่ใช่ขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา และในขั้นตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ binding sites หรือ active sites บนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเร็วมาก จึงทำให้ขั้นนี้ไม่ใช่ขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นขั้นตอนที่ 2 และ 3 จึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา แต่จะเป็นขั้นตอนใดนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_t) (แกน Y) กับรากที่สองของเวลา (แกน X) (ภาพที่ 16) ถ้าเส้นกราฟมีความชันมากกว่า 1 ช่วง ในช่วงแรกหรือความชันที่หนึ่งจะมีการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและภายในอนุภาคเกิดขึ้นพร้อมกัน แต่ในช่วงความชันที่ 2 จะเป็นการแพร่ภายในอนุภาคเท่านั้น และขั้นต่อไปจะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความชันของแต่ละช่วง

โดยถ้าความชันช่วงแรกมากกว่าช่วงที่ 2 แสดงว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นขั้นการแพร่ผ่านภายในอนุภาคในช่วงเวลาที่ 2 แต่ถ้าความชันช่วงแรกน้อยกว่าช่วงที่ 2 นั้นหมายถึง ขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาอาจเป็นขั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มหรือภายในอนุภาคก็ได้ ต้องวิเคราะห์ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับในช่วงแรก (initial rate) กับความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) โดยช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรงมักจะเกิดในช่วงที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นน้อย ขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นขั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งมักเกิดในช่วงที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้น ความเร็วในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำรอบผิวนอกของอนุภาคตัวดูดซับจึงไม่ใช่ตัวจำกัดความเร็ว (ตามกฎหมายของ mass diffusion) แต่เป็นขั้นการแพร่ภายในตัวดูดซับ ที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ^[581]

3.1. การหาค่าคงที่ของอัตราเร็วการแพร่ (rate constant) เมื่อกำหนดชั้นอัตราเร็วการแพร่ของการดูดซับว่าอยู่ในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มหรือชั้นการแพร่ภายในอนุภาคแล้ว จึงทำการหาค่าคงที่ของอัตราเร็วการแพร่เพื่อนำมาศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้รูปแบบของ Weber และ Morris^[673]

3.1.1. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มหรือการขนส่งภายนอก (film diffusion /external mass transfer) สมมุติให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (C_s) เป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$) และยังไม่มีการเคลื่อนที่เข้าไปภายในอนุภาคของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการดูดซับเริ่มต้นของตัวดูดซับได้ดังนี้

$$dC/dt = -\beta_L S(C_t - C_s)$$

สมการที่ 50

โดย

β_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวฟิล์ม (external mass transfer coefficient) (เมตรต่อวินาที)

C_t คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่เวลาใด ๆ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_s คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่อยู่บนตัวดูดซับ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

S คือ พื้นที่ผิวภายนอกที่มีสำหรับการถ่ายเทมวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวดูดซับ ($1/m$), ซึ่งหาได้จากสมการ

$$S = (6m)/(d_p \rho_p (1-\epsilon))$$

สมการที่ 51

โดย

$$m = w/V$$

สมการที่ 52

และ

w คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรที่ดูดซับสำหรับตัวดูดซับ (ลูกบาศก์เมตร)

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวดูดซับ (เมตร)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ϵ คือ พื้นที่ที่ยังไม่ดูดซับต่อพื้นที่ของตัวดูดซับทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

ที่เวลาเริ่มต้น เท่ากับ ศูนย์ ค่า C_s จะเป็นศูนย์ และค่า $C_t = C_0$

$t = 0, C_s \rightarrow 0$ and $C_t = C_0$ ดังนั้นสมการ 50 จึงกลายเป็น

$$[dC_t/dt]_{t=0} = -\beta_L S C_0 \quad \text{สมการที่ 53}$$

โดยให้ $t > 0$ $C_s > 0$ และ $C_t < C_0$ สมการ 53 จึงกลายเป็น

$$\{[d(C_t/C_0)]/dt\}_{t \rightarrow 0} = -\beta_L S \quad \text{สมการที่ 54}$$

การหาค่าคงที่ของอัตราเร็วการแพร่ในชั้นการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์มคือ $-\beta_L S$ (sec^{-1}) ได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณโลหะหนักหรือตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) กับเวลา (ภาพที่ 17) สามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการแพร่เมื่อตัวดูดซับมีขนาดเท่ากัน หรือไม่ทราบค่าพื้นที่ผิวสำหรับการแพร่ (S) แต่ถ้าทราบค่าพื้นที่ผิวสำหรับการแพร่ ก็สามารถหาค่า β_L เพื่อวิเคราะห์ผลของการแพร่ได้เช่นเดียวกัน

3.1.2. การแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (intraparticle diffusion, intraparticle mass transfer) ลักษณะการแพร่กระจายของอนุภาคภายในตัวดูดซับสามารถบอกได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ (q) กับรากที่สองของเวลา ($t^{0.5}$) นั่นคือ ถ้า q จะเป็นฟังก์ชันกับ $(t^{0.5})$ ถ้ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรง แสดงว่าอัตราเร็วจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ intraparticle diffusion มีค่าความชันเท่ากับ k_f ซึ่งแสดงถึงอัตราเร็วของการเกิดการแพร่ภายในอนุภาค

$$q = k_f t^{0.5} \quad \text{สมการที่ 55}$$

โดย

q คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับที่เวลาใด ๆ

t คือ เวลาในการดูดซับที่เวลาใด ๆ

k_f คือ อัตราเร็วของการเกิดการแพร่ภายในอนุภาค (intraparticle diffusion rate constant) (มิลลิกรัมของโลหะต่อกรัมตัวดูดซับต่อเวลา^{0.5})

ขั้นตอนการแพร่เข้าสู่ตัวดูดซับและการเพิ่มความเร็วในการแพร่ของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลต่อขบวนการดูดซับ สัดส่วนการดูดซับของตัวถูกดูดซับจะผันแปรตาม

$$(D^\circ t/r^2)^{0.5}$$

สมการที่ 56

โดย

D° คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง

r คือ รัศมีของตัวดูดซับ

ดังนั้น q จึงสามารถแสดงในรูปฟังก์ชันของ $t^{0.5}$

การสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $q(t)$ และ $t^{0.5}$ จะแสดงค่าอัตราเร็วที่ควบคุมโดยการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ โดยค่า k คือค่าความชันของกราฟ ซึ่งเป็นค่าอัตราเร็วของการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมของโลหะต่อกรัมตัวดูดซับต่อเวลา^{0.5}) (ภาพที่ 18)

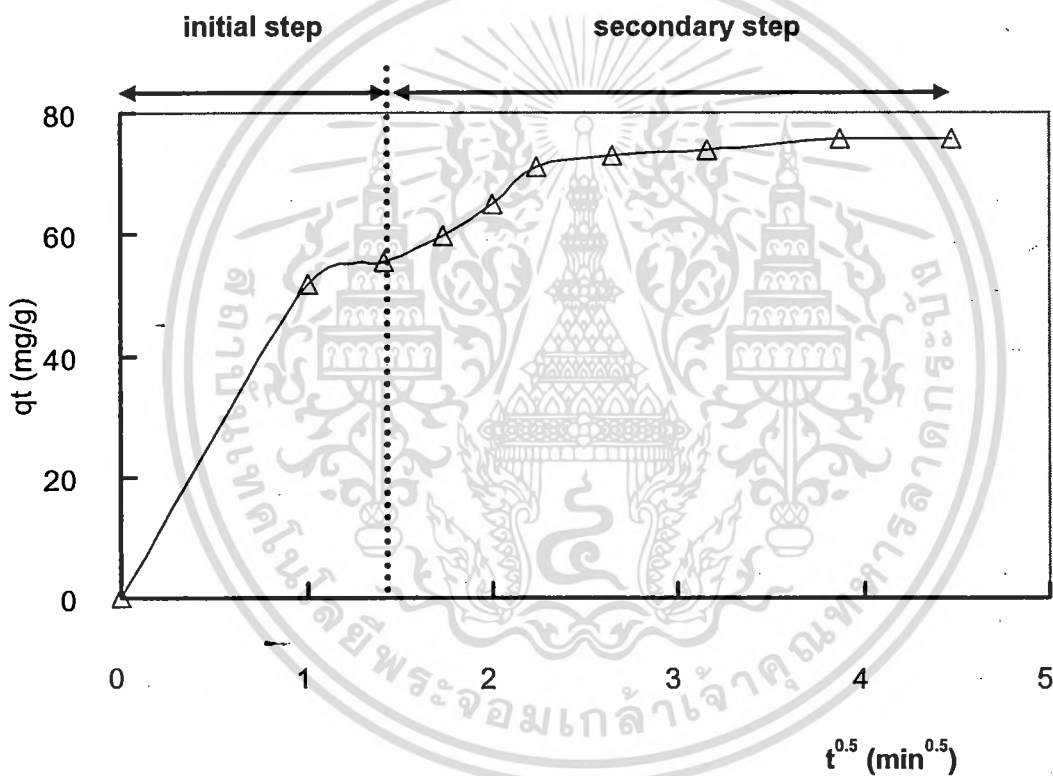
แต่อย่างไรก็ตามหากกราฟที่สร้างขึ้นไม่เป็นเส้นตรง จะอธิบายกลไกการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับได้คือมีการแพร่เข้าภายในได้หลายแบบ แสดงว่าขึ้นกับการแพร่ผ่านช่อง (pore) ของตัวดูดซับที่มีช่องหลายขนาด ค่าสัมประสิทธิ์ k คำนวณโดยสมการเส้นตรงของ $q = f(t^{0.5})$ ระหว่าง $t = 0$ และ t_{lim} ซึ่ง t_{lim} คือจุดพัก (breakpoint) ของแรงต้านที่ 1 ของการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ และจาก t_{lim} ความชันอันใหม่ คือจุดสมดุลหรือจุดที่ตัวถูกดูดซับไปสู่การแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ ของช่องว่างขนาดอื่น ๆ ในเซลล์

ตัวอย่างการหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ เมื่อทำการทดลองใช้ตัวดูดซับหรือสารละลายดูดซับโลหะหนัก โดยวัดปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับที่เวลาต่าง ๆ จากนั้นนำข้อมูลมาสร้างกราฟระหว่าง q_t กับรากที่สองของเวลา ($t^{0.5}$) (ภาพที่ 16) ซึ่งจากกราฟมีความชันของการดูดซับเป็น 2 ช่วง คือช่วงแรก (initial step) และช่วงที่สอง (secondary step) จึงต้องทำการแบ่งช่วงเพื่อหาค่าความชันในแต่ละช่วง เพื่อหาว่าขั้นตอนใดคือขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

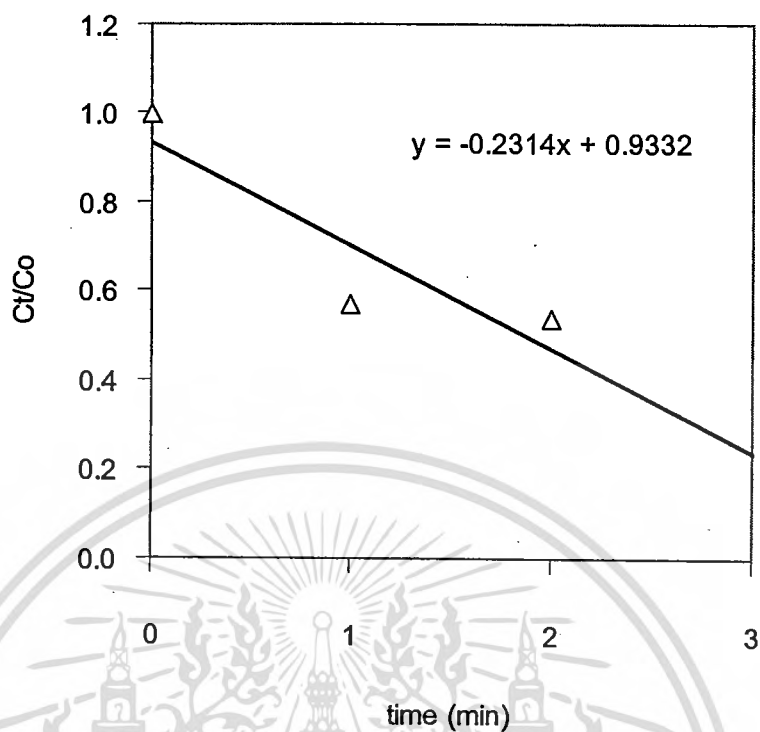
โดยเมื่อนำข้อมูลในช่วงแรก มาสร้างกราฟหาค่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม จากสมการที่ได้พบว่ามีค่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเท่ากับ 0.23 ต่อนาที (ภาพที่ 17) และเมื่อสร้างกราฟหาค่าการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ จากสมการที่ได้พบว่ามีค่าการแพร่ภายในอนุภาคตัวดูดซับเท่ากับ 13.03 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับต่อนาที (ภาพที่ 18)

และเมื่อนำข้อมูลการดูดซับในช่วงที่สอง มาสร้างกราฟหาค่าการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ จากสมการที่ได้พบว่ามีค่าการแพร่ภายในอนุภาคตัวดูดซับเท่ากับ 2.56 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับต่อนาที (ภาพที่ 19)

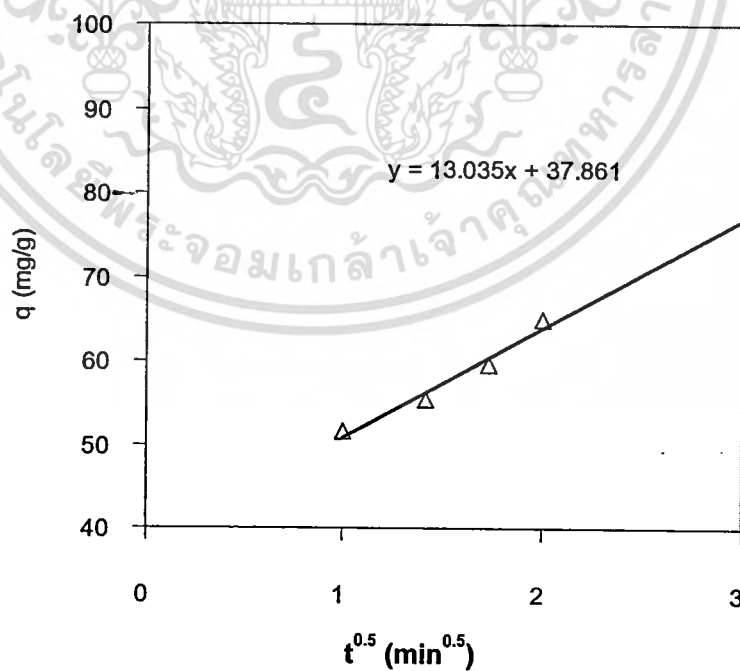
ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 16 ความชันของกราฟในช่วงแรกมากกว่าช่วงที่สอง แสดงว่า ขั้นตอนอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคในช่วงที่สอง ซึ่งเมื่อได้ทำการพิสูจน์โดยสร้างกราฟ (ภาพที่ 18 และ 19) เพื่อคำนวณค่าการแพร่ภายในอนุภาคตัวดูดซับ พบว่าค่าของการดูดซับช่วงแรก (13.03 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับต่อนาที) มีค่าสูงกว่าช่วงที่สอง (2.56 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับต่อนาที) จึงสรุปได้ว่าขั้นตอนอัตราเร็วของการดูดซับครั้งนี้คือขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ ในช่วงที่สองของการดูดซับ



ภาพที่ 16 กลไกการดูดซับโลหะหนัก (sorption kinetic)

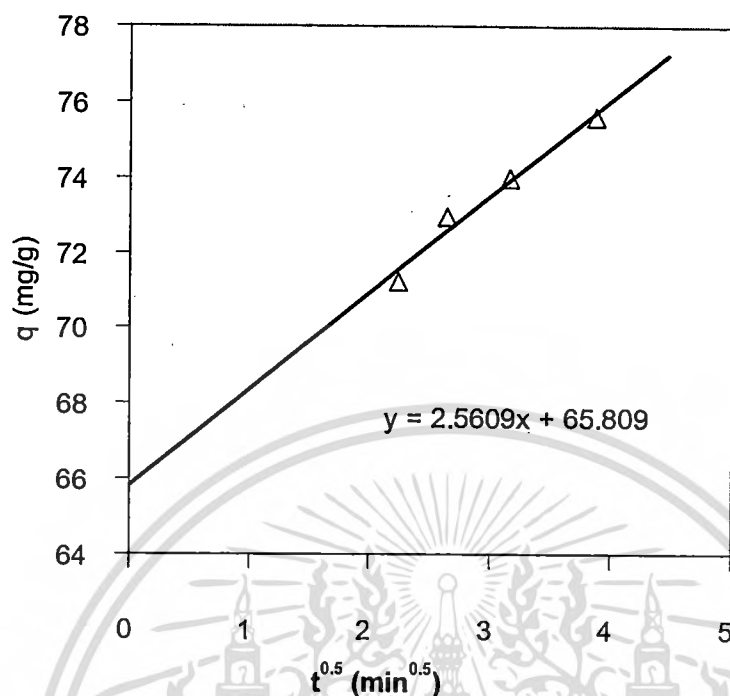


ภาพที่ 17 การหาค่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) ของการดูดซับช่วงแรก (initial step)



ภาพที่ 18 การหาค่าการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (intraparticle diffusion) ของการดูดซับช่วงแรก (initial step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 19 การหาค่าการแพร่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (intraparticle diffusion) ของการดูดซับช่วงที่สอง (secondary step)

4. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ^[565]

อัตราเร็วของการดูดซับของปฏิกริยานั้น บางปฏิกริยาเกิดขึ้นเร็ว บางปฏิกริยาช้า และบางที่ปฏิกริยาเดียวกัน เพียงแต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมต่างกันก็มีความเร็วต่างกัน จึงควรพิจารณาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกริยา โดยปัจจัยสำคัญ 2 ประการที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกริยาเป็นอย่างมาก คือ

- อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ปฏิกริยาใด ๆ จะทำให้อัตราเร็วของปฏิกริยานั้น เพิ่มขึ้น^[353]
- ความเข้มข้นของสารตั้งต้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น จะทำให้อัตราเร็วของปฏิกริยาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากปัจจัยทั้งสองประการนี้สามารถทำให้อัตราเร็วของปฏิกริยาเปลี่ยนแปลงได้มาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการชน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

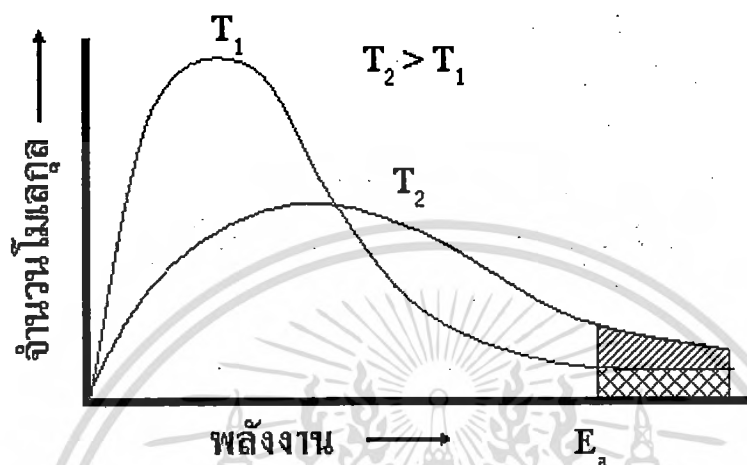
4.1. ทฤษฎีการชน (collision theory) ทฤษฎีการชน คืออัตราปฏิกิริยาที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนการชนที่มีประสิทธิภาพระหว่างสารตั้งต้นด้วยกัน ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นมาชนกัน อะตอมหรืออิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวใหม่ระหว่างการชน ทำให้พันธะเคมีบางอันแตกออกและมีการสร้างพันธะใหม่ขึ้น ชนกันแล้วต้องเกิดพลังงานขึ้นมากพอที่จะจัดเรียงอะตอมใหม่ (พลังงานจำนวนน้อยที่สุดที่ต้องมีเท่ากับพลังงานกระตุ้นจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้สารผลิตภัณฑ์) ผลของการชนทำให้พันธะเดิมของสารตั้งต้นสลายไปเกิดสร้างพันธะใหม่ของสารผลิตภัณฑ์ และการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นทุกครั้งที่ชนไม่จำเป็นต้องเกิดปฏิกิริยาเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแรงที่ชน (พลังงานของโมเลกุล) นอกจากนี้ต้องชนกันในทิศทางที่เหมาะสม และชนถูกตำแหน่งที่เหมาะสม หากชนกันในตำแหน่งและทิศทางที่ไม่เหมาะสม หรือชนกันด้วยพลังงานที่ไม่สูงพอ ผลของการชนของโมเลกุลก็ไม่เกิดสารใหม่ (ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี)

การชนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นจะต้องเป็นการชนที่มีประสิทธิภาพ คือ ชนในลักษณะที่เหมาะสม และพลังงานในการชนต้องมีค่าสูงกว่า พลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) ซึ่งคือพลังงานจำนวนน้อยที่สุดที่โมเลกุลต้องมีขณะชน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยโมเลกุลทุกโมเลกุลจะมีพลังงานจลน์อยู่ในตัวเองจึงเคลื่อนที่ตลอดเวลา เมื่อโมเลกุลวิ่งเข้าใกล้กัน ความเร็วของโมเลกุลลดลง พลังงานจลน์ เปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์เพื่อจัดตัวกันใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งโมเลกุลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง มีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นเท่านั้นที่ชนแล้วจะเกิดปฏิกิริยา มีการสลายพันธะเก่าพร้อม ๆ กับการสร้างพันธะใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ เพราะฉะนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับจำนวนการชนระหว่างสารตั้งต้นต่อเวลา และจำนวนการชนที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ จากทฤษฎีนี้สามารถนำมาอธิบายผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

4.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่โมเลกุล ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โอกาสที่จะชนกันมีมากขึ้น และเพิ่มจำนวนโมเลกุลที่ชนกันแล้วมีพลังงานศักย์ของระบบเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยามีมากขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจึงมากขึ้นตามไปด้วย

ภาพที่ 20 แกน X แสดงถึงพลังงานจลน์ แกน Y แสดงถึงจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่าง ๆ ที่จุด E_a คือจุดที่มีพลังงานเท่ากับพลังงานกระตุ้น และพื้นที่ด้านขวาหลังจุดนี้คือพื้นที่ที่โมเลกุลมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ด้านขวาหลังเส้นประของอุณหภูมิทั้งสอง คือที่อุณหภูมิห้อง (T_1) และที่อุณหภูมิสูง (T_2) จะเห็นว่าพื้นที่ของอุณหภูมิสูงมีมากกว่าพื้นที่ของอุณหภูมิห้อง แสดงว่าที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลส่วนใหญ่จะมีพลังงานในตัวน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แม้ชนกันก็ไม่เกิดปฏิกิริยา ส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยาก็คือโมเลกุลที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีอยู่จำนวนน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้นมีมากขึ้น จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิไม่ได้ทำให้

พลังงานกระตุ้นเปลี่ยนแปลง เพียงแต่ไปเพิ่มหรือลดจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้นเท่านั้น



ภาพที่ 20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้น

ที่มา: <http://www.sci.nu.ac.th> [352]

จากค่าคงที่ของอัตราเร็ว (k =rate constant) ตามสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี (สมการที่ 24) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) คือถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมาก หรืออุณหภูมิของระบบต่ำ ค่าคงที่อัตราเร็ว (k) จะน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็น้อยตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราเร็ว (k) กับค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และอุณหภูมิสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการที่เรียกว่า สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

Arrhenius equation (สมการอาร์เรเนียส) คือ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยา (rate constant) กับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) โดยมีรูปสมการความสัมพันธ์ของ k กับ T คือ

$$\text{กฎของอัตราเร็ว (rate law)} \quad R = -d[A]/dt = k[A]^n \quad \text{สมการที่ 57}$$

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad \text{สมการที่ 58}$$

โดย

k คือ ค่าคงที่อัตราเร็ว

e คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ = 2.71828

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.315 จูลต่อโมลเคลวิน)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K เคลวิน) = องศาเซลเซียส + 273.15

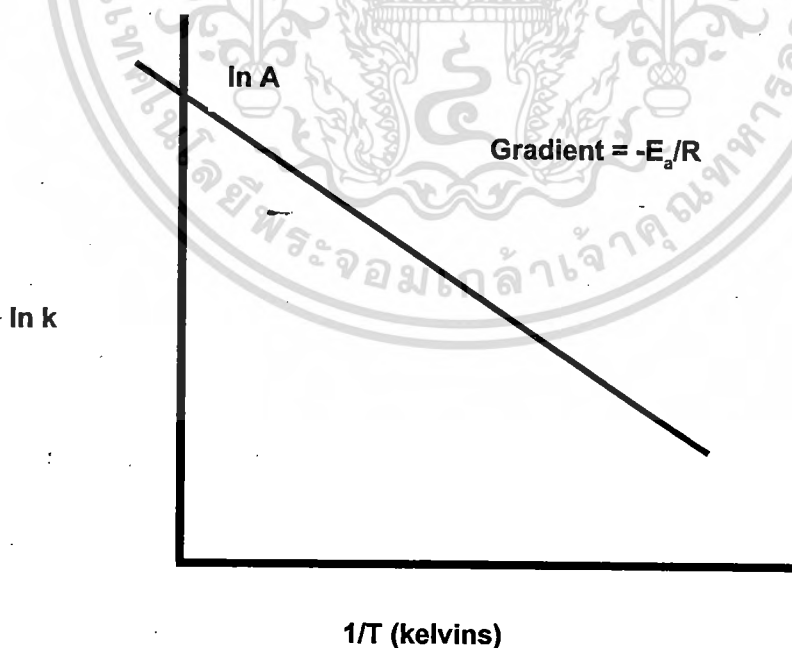
A คือ ความถี่ของการชนกันของโมเลกุล (frequency factor) เป็น อาร์รีเนียสแฟกเตอร์ เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\ln k = \ln A - [(E_a/R) \cdot (1/T)]$$

สมการที่ 59

เมื่อเขียนกราฟของ $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้เป็นเส้นตรง (เปรียบเทียบกับ $y = b + ax$)

เมื่อหาค่า k ของปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แล้วให้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-(E_a/R)$ ซึ่งสามารถหาค่า E_a ได้ และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ $\ln A$ ภาพที่ 21



ภาพที่ 21 กราฟการหาค่าพลังงานกระตุ้น

ที่มา: <http://www.sci.nu.ac.th> ^[352]

หรืออาจหาค่า E_a ได้โดยทำการทดลองหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ซึ่งทำให้ได้ค่า k_1 และ k_2 ตามลำดับ จากแทนค่าในสมการของ Arrhenius แล้วทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ ซึ่งใช้หาค่า E_a ได้

$$\text{ที่อุณหภูมิ } T_1 \quad k_1 = Ae^{-E_a/RT_1} \quad \text{สมการที่ 60}$$

$$\text{ที่อุณหภูมิ } T_2 \quad k_2 = Ae^{-E_a/RT_2} \quad \text{สมการที่ 61}$$

$$k_1/k_2 = Ae^{-E_a/RT_1} / Ae^{-E_a/RT_2} \quad \text{สมการที่ 62}$$

$$= e^{-E_a(1/T_1 - 1/T_2)/R} \quad \text{สมการที่ 63}$$

$$\ln(k_1/k_2) = -(E_a/R) \cdot [(T_2 - T_1)/(T_1 \cdot T_2)] \quad \text{สมการที่ 64}$$

จากค่า k_1 , k_2 , T_1 และ T_2 ก็สามารถคำนวณหาค่า E_a ของปฏิกิริยาได้

โดย ค่า E_a เป็นค่าเฉพาะของแต่ละปฏิกิริยาหาได้จากการทดลองเท่านั้น โดยบอกถึงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงขณะที่โมเลกุลชนกัน

E_a มีค่าต่ำแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดเร็ว

E_a มีค่าสูงแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดช้า^[352]

5. พลังงานกับการเกิดปฏิกิริยา^[192]

ในการเกิดปฏิกิริยาของสารแต่ละปฏิกิริยานั้น ต้องมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 เป็นขั้นที่ดูดพลังงานเข้าไปเพื่อสลายพันธะในสารตั้งต้น

ขั้นที่ 2 เป็นขั้นที่คายพลังงานออกมาเมื่อมีการสร้างพันธะในผลิตภัณฑ์

ปฏิกิริยาดูดความร้อน เป็นปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะมากกว่าที่คายออกมาเพื่อสร้างพันธะ โดยในปฏิกิริยาดูดความร้อนนี้สารตั้งต้นจะมีพลังงานต่ำกว่าผลิตภัณฑ์

ปฏิกิริยาคายความร้อน เป็นปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะน้อยกว่าที่คายออกมาเพื่อสร้างพันธะ โดยในปฏิกิริยาคายความร้อนนี้สารตั้งต้นจะมีพลังงานสูงกว่าผลิตภัณฑ์

5.1. เอนทัลปี (enthalpy) คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการที่ความดันคงที่ ซึ่งเราเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ H

$$H = E + PV \quad \text{สมการที่ 65}$$

โดย

H คือ เอนทัลปี (จูล)

E คือ พลังงานของระบบ (จูล)

P คือ แรงดันของระบบ (พาสคัล)

V คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและกลั่นผลึกสารการดูดซับ

เมื่อทำการทดลอง สิ่งที่ได้จริงจากการทดลอง คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี และให้นิยามว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยา (enthalpy of reaction; ΔH) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีของสารผลิตภัณฑ์กับเอนทัลปีของสารตั้งต้น

$$\Delta H = H_{\text{สารผลิตภัณฑ์}} - H_{\text{สารตั้งต้น}}$$

5.2. เอนโทรปี (entropy) คือ ปริมาณที่บอกถึงความเป็นระเบียบหรือความสับสนของระบบ ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งไม่มีวิธีที่จะหาเอนโทรปีสัมบูรณ์ (absolute entropy, S°) ของสารใด ๆ ได้ แต่จะใช้เอนโทรปีมาตรฐาน (standard entropy) เข้ามาช่วยโดยเอนโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้ง เอนทัลปี (H) และอุณหภูมิ ดังความสัมพันธ์ในสมการ

$$\Delta S^\circ = -\Delta H/T$$

สมการที่ 66

S° หมายถึงเอนโทรปีที่ 1 บรรยากาศ และ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเอนโทรปีของทั้งธาตุและสารประกอบล้วนมีค่าเป็นบวก ($S^\circ > 0$)

5.3. พลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy) พลังงานอิสระกิบส์มีสัญลักษณ์ G มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีและผลคูณของเอนโทรปีกับอุณหภูมิของระบบ ดังนี้

$$G = H - ST$$

สมการที่ 67

โดย

H คือ เอนทัลปี

S คือ เอนโทรปี

T คือ อุณหภูมิ

โดยทั่วไปพลังงานอิสระกิบส์ ใช้ทำนายทิศทางของปฏิกิริยาเคมี ถ้าพลังงานอิสระกิบส์เป็นลบปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้ ถ้าพลังงานกิบส์เป็นศูนย์แสดงว่าระบบอยู่ในสมดุล ถ้าพลังงานกิบส์เป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ (หรือเกิดขึ้นเองแบบย้อนกลับ) ต้องเป็นอุณหภูมิคงที่ในระบบปิด

5.4. การหาค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ในการดูดซับโลหะหนัก ในการทดลองใช้สาหร่ายดูดซับโลหะหนักนั้นหากเป็นการทดลองที่ทำการผันแปรอุณหภูมิในการดูดซับ จะสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปี (ΔH) และเอนโทรปี (ΔS) ในการดูดซับได้^[88] โดยใช้สมการ

$$\ln k_L = -\frac{\Delta G}{RT} = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad \text{สมการที่ 68}$$

โดย

K_L คือ ค่าคงที่ที่จุดสมดุล ซึ่งมาจากไอโซเทอร์มการดูดซับ เช่นจากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส 1.987 แคลอรีต่อโมลเคลวิน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน ซึ่งเท่ากับองศาเซลเซียส+273.15)

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_L$ เป็นแกน Y กับ $1/T$ เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรง และค่า ΔH หาได้จากความชันของกราฟ และค่า ΔS หาได้จากจุดตัดของกราฟ

โดยพบว่า ถ้ามีค่า ΔH เป็นลบนั้นคือเป็นการดูดซับแบบ exothermic คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าการดูดซับจะลดลง ถ้า ΔH เป็นบวก นั้นคือเป็นการดูดซับแบบ endothermic คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

ถ้าค่า ΔS เป็นบวก แสดงว่ามีการเพิ่มการสุมจับหรือไม่มีการเลือกตำแหน่งยึดจับระหว่างผิวตัวดูดซับกับโลหะหนักในสารละลาย

นอกจากนี้ค่าคงที่ หรือค่า K จากสมการ Langmuir ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า ΔG หรือ พลังงานอิสระกิบส์ ของการดูดซับโลหะหนักได้ โดยใช้สมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{สมการที่ 69}$$

โดยหากค่า ΔG ติดลบแสดงว่าการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายชนิดนั้นสามารถเกิดขึ้นเองได้ เพราะมีพลังงานพอในการดูดซับ

5.5 ผลของความเข้มข้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้น โอกาสของการชนมีมากขึ้น ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม ลิขสิทธิ์สงวนไว้แก่เจ้าของเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับแบบตัวดูดซับยึดติดกับที่

การดูดซับแบบให้ตัวดูดซับยึดติดกับที่ (fixed bed) เช่น การใช้ระบบตัวดูดซับแบบคอลัมน์ และการศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับกระทำโดยให้น้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนไหลอย่างต่อเนื่องผ่านเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีโลหะหนักเกาะที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อย ๆ หมดประสิทธิภาพเนื่องจากไม่มีตำแหน่งยึดจับว่าง (saturated biomass) (ภาพที่ 22) โดยตัวดูดซับที่อยู่ด้านบนจะถูกยึดจับจนเต็มก่อน ถัดลงมาเป็นตำแหน่งตัวดูดซับที่ยังสามารถจับโลหะหนักได้ เรียกว่าโซนการแยกย้ายมวล (mass transfer zone/ MTZ) คือเป็นส่วนของตัวดูดซับที่กำลังเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะหนักจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านตัวดูดซับโดยมีความเข้มข้นสูงสุดที่จุดเริ่มต้นของ MTZ และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อถึงจุดสุดท้าย เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัว การดูดซับจะเริ่มลดลง MTZ จะเคลื่อนไปตามทิศทางการไหลของน้ำเสียและในที่สุดโลหะหนักจะหลุดออกจากชั้นของตัวดูดซับ



ภาพที่ 22 การบรรจุตัวดูดซับแบบคอลัมน์ และลักษณะการดูดซับโลหะหนักในแต่ละโซนของตัวดูดซับ

ที่มา : Schiewer and Volesky (2000)^[587]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารจะถือว่าผิดกฎหมาย

และด้านล่างสุดของคอลัมน์ดูดซับคือตัวดูดซับที่ยังไม่ได้จับโลหะหนัก (fresh biomass) เนื่องจากโลหะหนักถูกจับไว้ด้านบนของคอลัมน์หมดแล้ว และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวดูดซับไปเรื่อย ๆ ตัวดูดซับจะเต็มและตำแหน่งของตัวดูดซับที่เต็มจะค่อย ๆ ไหลลงมาด้านล่างของคอลัมน์ดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ไหลผ่านตัวดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (ภาพที่ 22)

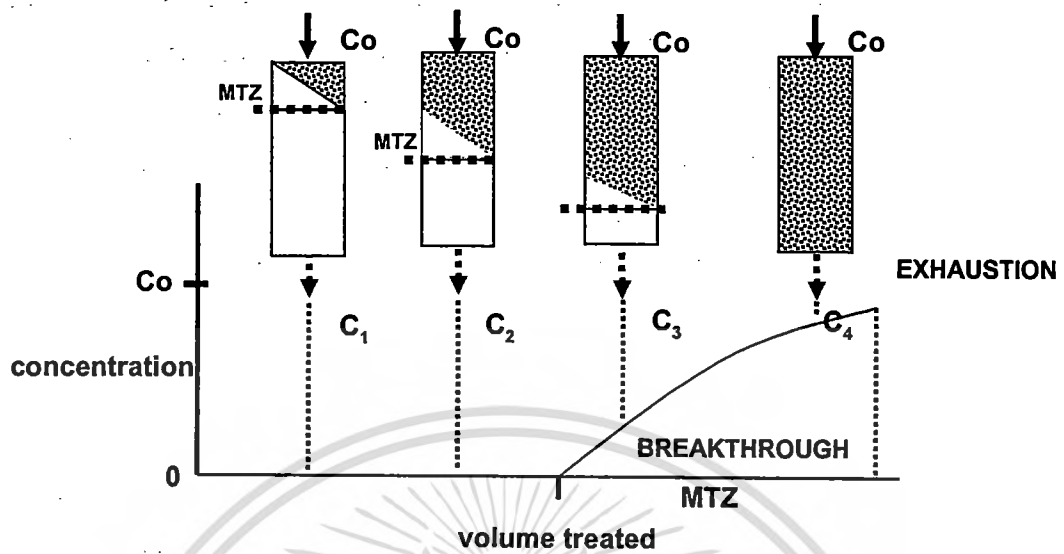
1. โซนการโยกย้ายมวลและจุดแตกหัก

โซนการโยกย้ายมวล (mass transfer zone, MTZ) เป็นโซนที่เกิดการดูดซับด้วยตัวดูดซับ เมื่อมีน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนไหลเข้าถึงบรรจุตัวดูดซับ บริเวณต้นทางจะมีการเกิดโซนการโยกย้ายมวล (MTZ) ขึ้น หลังจากที่มีน้ำเสียได้ผ่านโซน MTZ แล้ว โลหะหนักจะมีความเข้มข้นเหลือน้อยที่สุดเท่าที่ตัวดูดซับจะดูดซับได้ จะไม่มีการดูดซับโลหะหนักได้อีกหลังจากผ่านโซน MTZ แล้ว น้ำเสียที่ไหลผ่านถึงบรรจุตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้โซน MTZ เริ่มยืดยาวขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหัก (breakthrough) (ภาพที่ 23)

ขนาดความจุของถังดูดซับจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะให้มีเวลาเก็บกักพอเพียงที่จะทำให้สารปนเปื้อนสามารถถูกดูดซับในโซน MTZ ได้ หรือความลึกของถังดูดซับต้องมีมากกว่าความลึกของโซน MTZ มิฉะนั้นโลหะหนักจะไม่ถูกดูดซับตามความสามารถของตัวดูดซับ

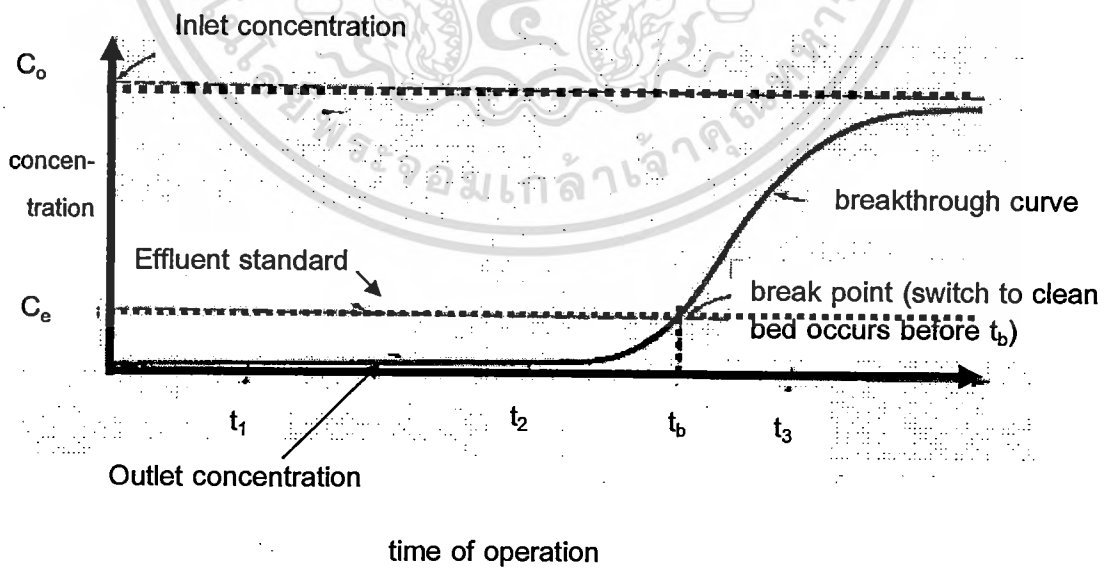
ความสูงหรือความหนาของโซน MTZ จะแปรผันตามอัตราการไหลเข้า คือมีอัตราไหลเข้ามาก จะต้องมีการโซน MTZ หนามากขึ้นตาม เพราะว่าการไหลเข้าจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ของโลหะหนัก (diffusion) การดูดซับ (adsorption) ภายในชั้นตัวดูดซับ เมื่อเลยจุดแตกหัก จะได้ค่าของเสียซึ่งเกินมาตรฐานและเหลือความหนาหรือความลึกไม่เท่าความหนาของโซน MTZ ดังนั้นถ้าต้องการที่จะใช้ความหนาของตัวดูดซับได้หมด จะต้องใช้ตัวดูดซับสองถังหรือมากกว่าวางเรียงขนานกัน

ดังนั้นหลังจากการดูดซับ ตัวดูดซับจะแบ่งเป็น 3 โซน 1) โซนในส่วนทางน้ำเข้าจะมีการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นสมดุลกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลเข้า (C_0) 2) โซน MTZ คือโซนที่ตัวดูดซับทำหน้าที่ดูดซับทำให้โลหะหนักมีปริมาณลดลง และ 3) โซนของทางน้ำออกที่มีตัวดูดซับที่ยังไม่ดูดซับโลหะหนัก ถ้าเพิ่มเวลา โซนพื้นที่การดูดซับจะเพิ่มขึ้น และเมื่อ MTZ มาถึงจุดสุดท้ายของตัวดูดซับจะเกิด breakthrough เกิดขึ้น การดูดซับจะหยุดลงถ้ามีตัวถูกดูดซับเข้ามาอีก ณ จุดนี้ต้องมีการล้างตัวดูดซับ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ้ายังไม่ล้างปริมาณของโลหะหนักที่ไหลออกจะเท่ากับปริมาณโลหะหนักก่อนผ่านตัวดูดซับ (ภาพที่ 24)



ภาพที่ 23 breakthrough curve ของตัวดูดซับแบบฟิซึเบด (fixed bed)

ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://www.activated-carbon.com> [272]



ภาพที่ 24 แสดง breakthrough curve และ break point (จุดอิ่มตัว)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000) [587]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและกลไกการดูดซับต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสารดูดซับเกิดการอิ่มตัว การดูดซับจะเริ่มลดลง MTZ จะเคลื่อนไปตามทิศทางการไหลและในที่สุดของเสียจะหลุดออกจากชั้นของสารดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากสารดูดซับกับเวลา (t) ซึ่งเรียกว่า breakthrough curve (ภาพที่ 24) ที่ช่วง breakthrough curve นี้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลออกจากถังบำบัด (C_e) จะเริ่มเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเท่ากับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลเข้า (C_0) ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีความสำคัญที่ใช้อธิบายเรื่องความสามารถในการดูดซับ จุด breakthrough curve นี้ อาจเรียกว่าเป็นจุดที่ความสามารถดูดซับเริ่มหมดไป ส่วนจุดอิ่มตัว break point (ภาพที่ 24) คือจุดที่ดูดซับโลหะหนักได้น้ำหนักของตัวดูดซับ ซึ่งอ่านได้จากค่าไอโซเทอร์มการดูดซับ

2. การหาความสามารถดูดซับที่จุด breakthrough

ความสามารถในการดูดซับที่จุดแตกหัก (breakthrough adsorption capacity) หรือจุดสิ้นสุดในทางปฏิบัติจริงจะมีเพียง 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของความสามารถดูดซับทางทฤษฎี หรือเขียนได้เป็นสมการ^[715]

$$q_b = (0.25 \text{ ถึง } 0.50) q_0$$

โดยสามารถคำนวณหาระยะเวลาที่ถึงจุดแตกหักด้วยการแก้สมการหาค่า t_b ซึ่งสามารถนำค่า t_b มาคำนวณออกแบบถังดูดซับ โดยใช้สมการ

$$q_b = X_b/M_c = Q(C_i - 0.5C_b) t_b/M_c$$

สมการที่ 70

$$t_b = q_b (M_c)/Q(C_i - 0.5C_b)$$

สมการที่ 71

โดย

q_b คือ ความสามารถดูดซับ ณ จุดแตกหักทางปฏิบัติ (กรัมต่อกรัม)

X_b คือ มวลของสารปนเปื้อนถูกดูดซับในถังดูดซับ ณ จุดแตกหัก (กรัม)

M_c คือ มวลของตัวดูดซับในถังดูดซับ (กรัม)

Q คือ อัตราไหลของน้ำเสียเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

C_i คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_b คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในจุดแตกหัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

t_b คือ ระยะเวลาที่ถึงจุดแตกหัก (วัน)

3. การหาค่า MTZ และ ค่าการดูดซับสูงสุด

การที่จะออกแบบระบบบำบัดแบบคอลัมน์ได้นั้นจะต้องสามารถทำนายค่า breakthrough และ ค่าการดูดซับสูงสุดได้ ค่า breakthrough คือค่าที่อยู่จุด breakthrough point ($C = 0.05C_0$) คือความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลออกจากถังดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.05 เท่าของความเข้มข้นโลหะหนักตั้งต้นที่ไหลเข้าถังดูดซับ และค่าการดูดซับสูงสุด (maximum uptake capacities) คือค่าจุดที่เกิดการดูดซับได้สมบูรณ์ (complete exhaustion point, $C = C_0$) คือความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลออกจากถังดูดซับมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของโลหะหนักตั้งต้นที่ไหลเข้าถังดูดซับ

ความสูงของ MTZ จะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ^[479]

$$H_{MTZ} = Z \left[\frac{V_E - V_B}{V_E - 0.5(V_E - V_B)} \right] \quad \text{สมการที่ 72}$$

โดย

H_{MTZ} คือ ความสูงของโซนการโยกย้ายมวล (mass transfer zone, เซนติเมตร)

Z คือ ความสูงของชั้นตัวดูดซับ (เซนติเมตร)

V_E คือ ปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านถึงจุดที่เกิดการดูดซับสมบูรณ์หรือโลหะหนักถูกดูดซับได้หมด exhaustion (ลิตร)

V_B คือ ปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านถึงจุด breakthrough (ลิตร)

สำหรับค่าการดูดซับสูงสุดสามารถคำนวณได้จาก Thomas model ซึ่งมีรูปแบบสมการคือ^[702]

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp(k_{Th} / Q(q_0 M - C_0 V))} \quad \text{สมการที่ 73}$$

โดย

C_0 คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ไหลเข้า (มิลลิโมล)

C คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ไหลออก (มิลลิโมล)

k_{Th} คือ ค่าคงที่ของ Thomas (Thomas rate constant, ลูกบาศก์เมตรต่อโมลต่อชั่วโมง)

Q คือ อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)

q_0 คือ ค่าการดูดซับสูงสุด (maximum biosorption capacity, มิลลิโมลต่อกรัม)

M คือ ปริมาณของตัวดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนักที่ไหลผ่านคอลัมน์ (ลิตร)

โดยสามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้คือ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_{Th} q_0 M}{Q} - \frac{k_{Th} C_0 V}{Q} \quad \text{สมการที่ 74}$$

จากนั้นทำการสร้างกราฟระหว่าง $\ln[(C_0/C) - 1]$ กับ V จะสามารถหาค่า k_{Th} และ q_0 ได้ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) กับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด (percentage errors, $\varepsilon\%$) ได้จากสมการ

$$\varepsilon\% = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{(C/C_0)_{\text{exp}} - (C/C_0)_{\text{theo}}}{(C/C_0)_{\text{exp}}} \right|}{N} \times 100 \quad \text{สมการที่ 75}$$

โดย

'exp' คือ ค่าจากการทดลอง

'theo' คือ ค่าจากการคำนวณ

N คือ จำนวนข้อมูลที่ทดลอง

ซึ่งจะทำให้สามารถระบุค่าความใกล้เคียงระหว่างข้อมูลจากการทดลองกับข้อมูลจากการใช้สมการ breakthrough curves ทำนายได้^[17]

สำหรับสมการต่าง ๆ นั้น มีเพื่ออธิบายขบวนการหรือปริมาณโลหะหนักที่จะถูกดูดซับ เพื่อที่สามารถหาสภาวะที่เหมาะสม เช่นการหาความเข้มข้นตั้งต้น ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิที่เหมาะสมและหลังจากนั้นก็สามารถคำนวณได้ว่าหลังจากผ่านการบำบัดต้องใช้เวลาเท่าไร จะเหลือโลหะหนักในน้ำเสียเท่าไร และยังช่วยในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับ ระบบบำบัดน้ำเสีย BIOSORBENT FOR WASTEWATER TREATMENT SYSTEM

การคัดเลือกตัวดูดซับชีวภาพ

ได้มีการศึกษาทดลองนำสิ่งมีชีวิตหลายชนิดมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพเพื่อดูดซับโลหะหนัก โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดแสดงความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยสามารถดูดซับโลหะหนักได้ตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม จนถึงค่าสูงกว่านี้หลายเท่า ซึ่งกลุ่มตัวดูดซับชีวภาพ (biosorbent) หลัก ๆ ที่นิยมใช้ ได้แก่ สาหร่าย ฟังไจ แบคทีเรีย หรือกลุ่มของซากพืช (peat) กลุ่มเพกติก (pectic) หรือวัสดุที่มีเซลลูโลสเช่น เศษไม้ ชีเลื้อย แดกกลุ่มหลังนี้ไม่นิยมมากนักเพราะวัสดุเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้คุ้มค่ากว่า นอกจากนี้ยังพบมีการใช้ตัวดูดซับพวก ถ่าน พืชน้ำ พืชบก กระดุกสัตว์ เปลือกกุ้ง ปู หอย กระดองหมีก เป็นต้น [20, 35, 52, 56, 61, 62, 70, 81, 83, 96, 170, 409, 425, 438, 480, 574, 577, 583, 589, 663, 713, 736]

สำหรับการพิจารณาว่าควรเลือกตัวดูดซับแบบใดนั้น มีเกณฑ์ที่ต้องเลือกตัวดูดซับที่ราคาถูก หาได้ง่าย ดูดซับโลหะหนักได้มาก มีกลไกการดูดซับที่รวดเร็ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ซึ่งสาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่มีวัตถุดิบอยู่มากตามธรรมชาติจึงสามารถนำมาใช้ได้ง่ายและมีข้อดีอีกคือขนาดของสาหร่ายจะมีขนาดใหญ่สามารถกำจัดได้ง่ายกว่ากลุ่มแบคทีเรียหรือฟังไจ การดูดซับทางชีวภาพในสาหร่ายส่วนใหญ่จะเกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ผนังเซลล์ของสาหร่ายมีโครงสร้างของเส้นใยที่รูปร่างแตกต่างกันไป ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส แต่บางทีก็เป็น mannan หรือ xylan ในสาหร่ายสีน้ำตาล ส่วนสาหร่ายสีแดงอาจมี alginic acid เป็นองค์ประกอบหลัก และมีพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งมีกลุ่มคาร์บอกซิลที่อยู่ใน uronic acid ทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักเป็นหลัก และมีกลุ่มไฮดรอกซิลซึ่งพบได้ในพอลิแซ็กคาไรด์ทุกชนิดเช่นกัน แต่จะให้ประจุลบเพื่อจับโลหะหนักได้เมื่อพีเอชมากกว่า 10 เท่านั้น

1. การคัดเลือกสาหร่ายเพื่อดูดซับโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สาหร่ายมีชีวิต

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้สาหร่ายที่มีชีวิต จำเป็นต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของโลหะหนักและค่าคุณภาพน้ำต่าง ๆ ของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด โดยค่าเหล่านี้ต้องอยู่ในระดับที่ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตอยู่ในน้ำเสียที่ทำการบำบัดนั้นได้ โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักมีผลต่อการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย^[77] มีผลทำให้รูปร่างและขนาดของสาหร่ายผิดปกติ^[530, 637] ซึ่งส่วนใหญ่หากเป็นการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนัก ปัญหาคือสาหร่ายจะถูกพิษโลหะหนักต่าง ๆ ยับยั้งการเจริญเติบโต^[52] แต่ข้อดีของสาหร่ายที่ได้เปรียบตัวดูดซับทางชีวภาพอื่น ๆ คือสาหร่ายหลายชนิดเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชต่ำ และทนพิษโลหะหนักได้สูงกว่าสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ หลายประเภท

สาหร่ายหลายชนิดที่ทนพิษของโลหะหนักได้ และสาหร่ายแต่ละชนิดทนต่อพิษโลหะหนักได้ไม่เท่ากัน เช่นการศึกษาความสามารถในการทนต่อพิษของโลหะหนัก ของไดอะตอม *Cyclotella meneghiniana* พบว่าสามารถทนพิษของทองแดงได้น้อยกว่าสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii* แต่ไดอะตอมจะกำจัดทองแดงได้มากกว่าสาหร่ายสีเขียวนี้ 5 เท่า^[677] ส่วนสาหร่ายสีเขียวสกุล *Closterium* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่เป็นกรด และดูดซับแบเรียมและสตรอนเชียมเข้าเซลล์ได้สูง ซึ่งโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้จะแสดงความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ แต่สาหร่ายสกุลนี้กลับทนได้มาก^[677]

ปริมาณแอมโมเนีย (NH_3) และพีเอชที่สูง จะส่งผลเสียต่อสาหร่ายด้วยเช่นกัน โดยพบว่าแอมโมเนียรวมที่ 15 มิลลิโมล และพีเอช 8.7 จะยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงทั้งหมดของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella sorokiniana*^[493] แต่ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ของสาหร่ายด้วยเช่นกัน เช่นพบว่าสาหร่ายสีเขียวชนิดเดียวกันนี้คือ *Chlorella sorokiniana* ที่ได้รับแอมโมเนียเข้มข้น 22 มิลลิโมล จะไม่มีผลต่อการเจริญเติบโต แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina platensis* ที่ได้รับแอมโมเนียเพียง 11 มิลลิโมล จะถูกยับยั้งการเจริญเติบโตทั้งหมด^[507]

ดังนั้นหากน้ำเสียที่ต้องการบำบัดโลหะหนักออกนั้นมีปริมาณแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่สูง หรือมีพีเอชต่ำ ควรเลือกใช้สาหร่ายที่ทนต่อแอมโมเนีย โลหะหนักและพีเอชต่ำได้ โดยสามารถพัฒนาให้สาหร่ายทนทานสภาวะเหล่านี้ได้สูง โดยการปรับปรุงลักษณะทางพันธุกรรม หรือการทำให้เซลล์สาหร่ายมีความคุ้นเคยกับสภาวะต่าง ๆ เหล่านี้ เช่นสัมผัสกับน้ำที่เป็นกรดอ่อน มีแอมโมเนียหรือโลหะหนักก่อนและค่อย ๆ ลดพีเอช เพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียหรือโลหะหนักขึ้นเรื่อย ๆ หรืออาจทำการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายมาจากแหล่งน้ำเสียที่ต้องการบำบัดโดยตรง ซึ่งจะยืนยันได้ว่าสาหร่ายนั้นสามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียที่ต้องการบำบัดได้แน่นอน และสาหร่ายนั้นได้สัมผัสกับโลหะหนักมานานแล้วไม่ต้องทำการเพิ่มความทนทานอีก^[458] เช่นมีการแยกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากดินที่มีการปนเปื้อนของ

โครเมียม เพื่อนำมาใช้ดูดซับโลหะหนัก เพราะสาหร่ายที่เจริญเติบโตอยู่ในบริเวณนี้มีความทนทานต่อโครเมียมอยู่แล้ว จึงทนต่อพิษของโครเมียมในการทดลองได้สูง

และพบว่าสาหร่ายสีเขียว *Klebsormidium fruitans* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ มีระดับพีเอช 3 และมีทองแดง 399 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการที่สาหร่ายนี้ทนต่อพิษทองแดงได้เพราะมีการปล่อยเมือกออกมาที่ผิวเซลล์และจับกับทองแดงให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่เป็นอันตรายกับเซลล์^[677] ดังนั้นหากคัดเลือกสาหร่ายนี้เพื่อนำมาใช้บำบัดโลหะหนัก จะยืนยันได้แน่นอนว่าสามารถทนทานต่อพิษของโลหะหนักได้สูง เพราะสาหร่ายเองได้มีการปรับกลไกของเซลล์ให้ทนต่อพิษของโลหะหนักอยู่แล้วตามธรรมชาติของแหล่งน้ำที่สาหร่ายนั้นอาศัยอยู่

นอกจากนี้การคัดเลือกสาหร่ายมาใช้ยังต้องคำนึงถึงผลที่จะเกิดจากกลไกต่าง ๆ ของสาหร่ายด้วย โดยสาหร่ายที่มีชีวิตจะสร้างออกซิเจน เพิ่มพีเอชของน้ำ หรืออาจหลังสารมายับยั้งการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ภายในระบบได้^[145, 177, 411, 488, 491, 493, 512] แต่อย่างไรก็ตามมักพบว่าสารที่หลั่งออกมาจากเซลล์สาหร่ายจะช่วยให้โลหะหนักถูกกำจัดออกจากระบบบำบัดได้เพิ่มมากขึ้นจึงมักเป็นผลดีต่อระบบบำบัดมากกว่าผลเสีย^[680] แต่หากต้องการใช้ระบบบำบัดที่มีสาหร่ายหลายชนิดอยู่ร่วมกัน ต้องพิจารณาเลือกชนิดสาหร่ายที่ไม่หลังสารออกมายับยั้งสาหร่ายชนิดอื่นที่อยู่ร่วมกัน หรือบางครั้งหากในน้ำเสียมีแบคทีเรียชนิดอื่นที่สามารถสร้างสารยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ อาจต้องมีการกำจัดแบคทีเรียชนิดนั้นหรือเลือกใช้สาหร่ายชนิดที่แบคทีเรียนั้นไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตได้ มาใช้ในระบบบำบัด เช่นแบคทีเรีย *Azospirillum brasilense* จะยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* โดยการสร้างสารฆ่าสาหร่าย (algicide) ขึ้นภายในเซลล์และปล่อยออกนอกเซลล์ได้^[139]

สำหรับการพิจารณาว่าจะเลือกสาหร่ายขนาดเล็กหรือสาหร่ายขนาดใหญ่ นั้น สาหร่ายขนาดเล็กมีข้อดีคือมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่าสาหร่ายขนาดใหญ่^[442] หากสาหร่ายเจริญเติบโตเร็วจะให้เซลล์ใหม่ได้มาก และสามารถสร้างออกซิเจนได้มากด้วย จึงมีผลทำให้น้ำเสียมีคุณภาพดีขึ้น สาหร่ายขนาดใหญ่จะใช้พื้นที่ในการบำบัดมากกว่า แต่สาหร่ายขนาดใหญ่จะเก็บหรือกำจัดออกจากระบบบำบัดได้ง่ายกว่าสาหร่ายขนาดเล็ก และสาหร่ายขนาดใหญ่บางชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าสาหร่ายขนาดเล็ก

การเลือกชนิดสาหร่ายไปใช้ในระบบบำบัดยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ของระบบบำบัดด้วย เช่นอุณหภูมิ ระบบน้ำแบบหมุนเวียนหรือไม่ ปริมาณสารอาหาร ฯลฯ จากนั้นจึงพิจารณาเลือกสาหร่ายที่เหมาะสมกับระบบบำบัด โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะดังกล่าว นอกจากนี้ควรเลือกสาหร่ายชนิดที่ทนต่อความเป็นพิษของสารพิษต่าง ๆ ได้สูง เพราะในน้ำเสียมักมีสารพิษอย่างอื่นปนเปื้อนด้วย และเลือกสาหร่ายที่โตเร็ว และหากมีการใช้สาหร่ายร่วมกันมากกว่าหนึ่งชนิดในระบบบำบัดต้องเลือกสาหร่ายชนิดที่ไม่ยับยั้งการเจริญเติบโตซึ่งกันและกัน^[84, 491]

2. วิธีการคัดเลือกสาหร่ายที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตสำหรับใช้ดูดซับโลหะหนัก

แม้สาหร่ายมีอยู่นับพันชนิด แต่ยังมีจำนวนไม่มากนักที่ถูกนำมาศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายแต่ละชนิด ซึ่งทำการศึกษากการดูดซับในสภาวะเดียวกัน พบว่าสาหร่ายมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักต่างกัน แม้ในสาหร่ายสกุลเดียวกัน แต่ต่างชนิดหรือต่างสายพันธุ์กัน โดยสาหร่ายหลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน เช่นพบว่าสาหร่ายชนิดหนึ่งสามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กำจัดโครเมียมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น^[677] นอกจากนี้ยังพบว่าอายุหรือระยะเวลาการเลี้ยงสาหร่าย อาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักด้วยเช่นกัน

หากเป็นสาหร่ายขนาดเล็ก วิธีการคัดเลือกชนิดสาหร่ายเพื่อใช้ดูดซับโลหะหนักก็จะเลือกชนิดที่สามารถหาหัวเชื้อได้ง่ายโดยทั่วไป ดูแลหัวเชื้อได้ง่าย และเมื่อนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อขยายให้มีปริมาณมากจะสามารถเจริญเติบโตได้เร็ว โดยเฉพาะ *Chlorella* และ *Spirulina* ซึ่งมีการเพาะขยายพันธุ์ปริมาณมากเพื่อใช้ประโยชน์ด้านอื่นอยู่แล้ว จึงนิยมนำมาศึกษาศักยภาพในการกำจัดโลหะหนักกันมาก และได้มีการใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ดูดซับชีวภาพในทางการค้า โดยใช้ชื่อการค้าว่า "Alga SORBTM" - แต่ตัวดูดซับทางชีวภาพที่เป็นการค้านี้ เมื่อนำไปใช้กำจัดโลหะหนักในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ พบว่ากำจัดโลหะหนักได้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขบวนการกำจัดโลหะหนักควรมีการเลือกชนิดสาหร่ายที่มีความเฉพาะเจาะจงกับโลหะหนักที่ต้องการกำจัดด้วย

สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ระหว่างสาหร่ายน้ำจืดกับทะเล พบว่าสาหร่ายทะเลมีข้อดีคือสาหร่ายทะเลสามารถนำประจุบวกเข้าเซลล์ได้เร็วกว่าสาหร่ายน้ำจืดถึง 20 เท่า ซึ่งเป็นเพราะสาหร่ายทะเลมีไซโตเล็มเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า แต่ถ้าพิจารณาถึงผลรวมของประจุทั้งหมดที่กำจัดได้ ยังไม่สามารถระบุได้ว่าสาหร่ายทะเลกำจัดได้ดีกว่าสาหร่ายน้ำจืด เพราะต้องพิจารณาเปรียบเทียบสาหร่ายแต่ละชนิดด้วย

โดยทั่วไปแล้วจะมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกชนิดสาหร่าย เพื่อหาสาหร่ายใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับโลหะหนักมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้เป็นเพราะมีจำนวนชนิดของสาหร่ายอยู่มาก และชนิดของโลหะหนักเองก็มากเช่นกัน และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายก็มีหลายปัจจัย ที่ส่งผลต่อการดูดซับ ทั้งชนิดสาหร่าย ชนิดโลหะหนัก แหล่งที่มาของสาหร่าย อายุสาหร่าย กลไกการดูดซับ และปัจจัยแวดล้อมอีกมาก ดังนั้นจึงยังคงมีสายพันธุ์สาหร่ายให้ทำการคัดเลือกหรือมีสิ่งที่จะต้องศึกษาอีกมาก

การคัดเลือกสาหร่ายสำหรับดูดซับโลหะหนัก จะทำโดยการนำสาหร่ายหลาย ๆ ชนิดที่ต้องการคัดเลือก มาทำการดูดซับโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งที่เป็นชนิดเดียวกัน โดยใช้สภาวะในการทดลองที่เหมือนกัน ความเข้มข้นโลหะหนักเท่ากัน^[39, 547] จากนั้นทำการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ประสิทธิภาพการดูดซับต่าง ๆ เช่น เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก ค่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมสาร หรือค่า concentration factor^[470] โดยเปรียบเทียบค่าเหล่านี้ของสารที่ต่างชนิดกัน ชนิดใดที่มีค่าเหล่านี้สูงแสดงว่ามีความเหมาะสมที่จะคัดเลือกสารชนิดนั้นมาทำการดูดซับโลหะหนักชนิดที่ทำการศึกษาไว้ ซึ่งหากต้องการนำไปใช้ดูดซับโลหะหนักที่ต่างชนิดกันไป ควรต้องมีการพิจารณาเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกสารใหม่อีกครั้ง เพราะความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสารชนิดเดียวกัน เมื่อดูดซับโลหะหนักที่ต่างชนิดกัน ความสามารถอาจจะแตกต่างกันด้วย

สารที่เป็นสกุลหรือชนิดเดียวกันแต่มาจากสถานที่ต่างกันหรือต่างสายพันธุ์กัน จะแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ต่างกัน เช่นการเปรียบเทียบการดูดซับแคดเมียมของสารสามสกุลคือ *Oscillatoria* 3 สายพันธุ์ *Synechococcus* 2 สายพันธุ์ และ *Chlorella* 19 สายพันธุ์ พบว่าไม่สามารถสรุปได้ว่าสกุลใดมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้สูงกว่ากัน เพราะมีความแตกต่างของการดูดซับของแต่ละสายพันธุ์ในสารสามสกุลเดียวกันสูงมาก^[470]

จากการที่สารมีความหลากหลายของแหล่งที่อยู่ ความหลากหลายของสายพันธุ์ จึงทำให้สามารถเลือกชนิดสารมาใช้ให้เหมาะสมกับน้ำเสียแต่ละประเภทได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคัดเลือกสายพันธุ์สารมาศึกษาศักยภาพในการกำจัดโลหะหนักเพื่อพัฒนาระบบการกำจัดโลหะหนักโดยวิธีดูดซับชีวภาพนั้นมีประโยชน์มาก และรับประกันได้ว่าตัวดูดซับที่ถูกเลือกมาใช้กำจัดโลหะหนักนั้นสามารถทำงานได้เหมาะสมกับสภาวะของระบบบำบัดน้ำเสียนั้น ๆ และกำจัดโลหะหนักชนิดที่ต้องการกำจัดได้ดี และยังคงควรที่จะมีการศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของสารชนิดใหม่ ๆ ต่อไป

3. ปัจจัยอื่น ๆ ในการพิจารณาเพื่อคัดเลือกชนิดสาร

3.1. ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ ในการพิจารณาเลือกชนิดสารเพื่อนำมาใช้ดูดซับโลหะหนัก อาจใช้ปัจจัยร่วมอื่น ๆ ในการพิจารณาเพื่อเลือกชนิดสาร เช่น พิจารณ ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาร เพราะหมู่ฟังก์ชันหลัก ที่ทำหน้าที่จับกับโลหะหนักมักอยู่ที่พอลิแซ็กคาไรด์ หากมีพอลิแซ็กคาไรด์มากมักมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้สารนั้นดูดซับโลหะหนักได้มาก โดยหากเป็นการใช้สารที่ไม่มีชีวิตมักจะพิจารณาแต่พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่หุ้มเซลล์ (CPS-capsular polysaccharide) แต่หากเป็นการใช้สารที่มีชีวิต จะต้องพิจารณาถึงพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ด้วย (EPS-exopolysaccharide) เพราะพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนนี้มีหน้าที่ช่วยกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้เช่นกัน นอกจากนี้ หากเลือกชนิดสารที่ทนทานต่อสภาวะต่าง ๆ ในน้ำเสียที่ต้องการบำบัดได้แล้ว อาจทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักให้แก่สารชนิดนั้นด้วยการหาวิธีการเลี้ยงที่สารสามารถเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ได้ ตัวอย่างของปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีในสารที่

ต่างชนิดกัน และภายใต้ระยะเวลาการเลี้ยงหรือภายใต้อุณหภูมิการเลี้ยงที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ติดกับเซลล์ (CPS-มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และส่วนที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ (EPS-มิลลิกรัมต่อลิตร) ของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาการเลี้ยงที่แตกต่างกัน

สาหร่าย	CPS (mg/g)	EPS (µg/ml)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วัน)	เอกสารอ้างอิง
<i>Microcoleus vaginatus</i>	0.2	-	28±1	60	Hu et al., 2003 ^[399]
<i>Scytonema javanicum</i>	0.17	-	28±1	60	Hu et al., 2003 ^[399]
<i>Phormidium tenu</i>	0.04	-	28±1	60	Hu et al., 2003 ^[399]
<i>Nostoc</i> sp.	0.09	-	28±1	60	Hu et al., 2003 ^[399]
<i>Spirulina</i> sp.	-	9	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Oscillatoria</i> sp.	-	1.5	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Phormidium</i> sp.	-	29	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anabaena torulosa</i>	-	3.7	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anabaena sphaeric</i>	-	1	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anabaena</i> sp. WSAF	-	55.2	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anabaena</i> sp. 7120	-	0.02	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anabaena variabilis</i>	-	3.5	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Nostoc linckia</i>	-	0.015	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Scytonema hofmanni</i>	-	4	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Tolypothrix tenuis</i>	-	7.4	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Microchaete</i> sp. 7126	-	-	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Fischerella muscicola</i>	-	1.5	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Chlorogloeopsis</i> sp. 6912	-	30	25	28	Nicolaus et al., 1999 ^[502]
<i>Anacystis nidulans</i>	-	64	25	14	Sangar and Dugan, 1972 ^[579]
	-	43	40	14	Sangar and Dugan, 1972 ^[579]
	-	366	25	21	Sangar and Dugan, 1972 ^[579]
	-	414	40	21	Sangar and Dugan, 1972 ^[579]

หมายเหตุ : “-” คือไม่ได้ทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาหร่าย	CPS (mg/g)	EPS (µg/ml)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วัน)	เอกสารอ้างอิง
<i>Nostoc commune</i>	-	600- 1800	30		Otero and Vincenzini, 2003 ^[513]
<i>Gloeocapsa - gelatinosa</i>	35.43	33.01	25	30	Ruangsomboon et al., 2004b ^[571]
<i>Gloeothoece magna</i>	15.5	-			Mohamed, 2001 ^[482]
<i>Nostoc commune</i>	493.67	242.43	35	12	สุนิรัตน์, 2549 ^[737]
<i>Nostoc commune</i>	309.19	340.40	15	18	สุนิรัตน์, 2549 ^[737]
<i>Porphyridium</i> sp.	-	125-475	24 ± 1	15	Arad et al., 1988 ^[30]
<i>Desmococcus olivaceus</i>	0.12	-	28 ± 1	60	Hu et al., 2003 ^[399]
<i>Botryococcus braunii</i>	-	250	25	-	Allard and Casadevall, 1990 ^[22]
<i>Botryococcus braunii</i>	-	4000- 4500	25	31	Lupi et al., 1991 ^[456]

หมายเหตุ : “-” คือไม่ได้ทำการวิเคราะห์

โดยผลด้านอุณหภูมิและระยะเวลาการเลี้ยงพบว่า มีผลต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย เช่นการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Nostoc commune* ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 15-40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน พบว่าปริมาณ CPS และ EPS ของสาหร่ายที่เลี้ยงในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน มีปริมาณไม่เท่ากัน รวมทั้งระยะเวลาการเลี้ยงที่ทำให้มีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์สูงสุดก็ไม่เท่ากัน (ตารางที่ 2) โดยพบว่าการเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สาหร่ายจะสร้าง CPS สูงที่สุด ส่วนการเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส สาหร่ายจะสร้าง EPS สูงสุด

ตารางที่ 2 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ติดกับเซลล์ (CPS) และส่วนที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ (EPS) และเวลาการเลี้ยงที่ให้ปริมาณสูงสุด (วัน) ของ *Nostoc commune* ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

อุณหภูมิ °C	CPS		EPS	
	ปริมาณสูงสุด (mg/g dry wt.)	เวลาการเลี้ยง (วัน)	ปริมาณสูงสุด (mg/l)	เวลาการเลี้ยง (วัน)
15	309.19 ± 14.35 ^d	4	340.40 ± 15.51 ^a	18
20	224.95 ± 11.86 ^e	2	96.64 ± 6.36 ^d	18
25	312.89 ± 15.78 ^d	2	233.90 ± 10.28 ^b	18
30	335.52 ± 8.15 ^c	2	237.61 ± 11.88 ^b	18
35	493.67 ± 14.43 ^a	12	242.43 ± 7.21 ^b	18
40	429.69 ± 16.19 ^b	12	125.89 ± 5.98 ^c	12

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกัน คือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (P<0.05)

ที่มา : สุรินทร์ (2549ข)^[37]

3.2. ปัจจัยความเข้มข้น (concentration factor) การพิจารณาคัดเลือกชนิดสาหร่ายเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักอาจพิจารณาคัดเลือกจากค่าปัจจัยความเข้มข้นหรือ concentration factor (CF) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายที่ต่างชนิดหรือต่างสายพันธุ์กัน โดยค่า CF คำนวณได้จากสมการ

$$CF = q / C_i$$

โดย

q คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่าย (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งสาหร่าย)

Ci คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

แต่พบว่ค่า CF นั้น จะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยในการทดลองหลายอย่างเช่น ผลจากค่าของพีเอช การมีไออนชนิดอื่นปนเปื้อน ฯลฯ ตัวอย่างค่า CF ของสาหร่ายบางชนิดในการดูดซับโลหะหนักแสดงในตารางที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ค่า concentration factor (CF) ของสาหร่ายบางชนิดในการดูดซับโลหะหนัก

สาหร่าย	โลหะหนัก	CF	เอกสารอ้างอิง
<i>Chroococcus paris</i>	Zn, Cu, Cd	4,000	Les and Walker, 1984 ^[444]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Cd	2,000,000	Hart and Scaife, 1977 ^[173]
	Cd	<4,000	Sakaguchi et al., 1979 ^[576]
<i>Chlorella</i> sp.	Cd	2327	Wilde and Bennemann, 1993 ^[677]
	U	4,000	Wilde and Bennemann, 1993 ^[677]
	Cu	3,056	Wilde and Bennemann, 1993 ^[677]
	Ni	849	Wilde and Bennemann, 1993 ^[677]
<i>Cladophora glomerata</i>	Pb	2,000-25,000	Vymazal, 1995 ^[664]
	Pb	16,000-20,000	Wilde and Bennemann, 1993 ^[677]

ที่มา : Wilde and Bennemann (1993)^[677]

ตารางที่ 4 ค่า concentration factor (CF) ของสาหร่ายบางชนิดในการดูดซับปรอท แคดเมียม และตะกั่ว

สาหร่าย	concentration factor (CF)		
	Hg	Cd	Pb
Division Cyanophyta			
<i>Anabaena siamensis</i>	803	1492	437
<i>A. torulosa</i>	606	1022	1284
<i>A. variabilis</i>	839	1256	678
<i>Calothrix</i> sp.	825	1722	1478
<i>C. parietina</i>	1096	1292	1784
<i>C. marchica</i>	1263	1025	338
<i>Phormidium angustissimum</i>	1967	1847	1919
<i>Gloeocapsa</i> sp.	1424	238	4154
<i>Fischerella</i> sp.	1656	1354	405
<i>Myxosarcina</i> sp.	2210	2742	422
Division Chlorophyta			
<i>Chlorella</i> sp.	857	1184	1167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ควรรับผิดชอบต่อการใช้งาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สาหร่าย	concentration factor (CF)		
	Hg	Cd	Pb
<i>Chlorella vulgaris</i> (1)	1785	2601	2293
<i>C. vulgaris</i> (2)	488	980	863
<i>Kirchneriella</i> sp.	1066	1372	1066
<i>Scenedesmus acutus</i>	3412	4591	4078
<i>S. perforatus</i>	2711	3730	3083
<i>S. vacuolatus</i> (1)	1274	1351	1358
<i>S. vacuolatus</i> (2)	1060	1537	793
<i>S. vacuolatus</i> (3)	1226	1463	1069
<i>S. vacuolatus</i> (4)	327	774	586
<i>S. vacuolatus</i> (5)	1200	1452	1149
<i>S. vacuolatus</i> (6)	1460	1878	1442

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงเล็บคือสายพันธุ์ (strain) ที่แตกต่างกัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก Inthorn (2001)^[404] ; Inthorn et al. (2002a)^[407]

3.3. ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย การพิจารณาคัดเลือกชนิดสาหร่ายเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักอาจพิจารณาคัดเลือกจากค่าการดูดซับสูงสุด (Q_m - มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งได้จากค่าที่คำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยเฉพาะการทดลองที่มีปัจจัยในการทดลองที่เหมือนกันจะทำให้เทียบได้ว่าสาหร่ายชนิดใดมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดนั้น ๆ ได้ดีมากกว่ากัน ทำให้สามารถเลือกชนิดสาหร่ายได้เหมาะสมที่สุด โดยตัวอย่างความสามารถสูงสุดของสาหร่ายแต่ละชนิดที่ได้มีการทดลองนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ในสภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าความสามารถสูงสุด (Q_m) ของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก ที่คำนวณจากการทำนายโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q_m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
Division Cyanophyta						
<i>Synechocystis</i> sp.	Cu	25-250	5	25	38.1	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	25-250	4.5	25	189.8	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>Oscillatoria angustissima</i>	Cr (IV)	25-250	2	25	153.6	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Zn	25-100	5	25 ± 2	641	Ahuja et al., 1999b ^[11]
<i>Spirulina</i> sp. -lyophilized	Cr (III)	-	7	35	185.0	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp. -heterotrophic	Cr (III)	-	7	35	43.3	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp.-mixotrophic	Cr (III)	-	7	35	38.5	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp.-photoautotrophic	Cr (III)	-	7	35	121.6	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp. -lyophilized	Cd	-	7	35	99.5	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp. -heterotrophic	Cd	-	7	35	27.1	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp.-mixotrophic	Cd	-	7	35	43.6	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp.-photoautotrophic	Cd	-	7	35	159.1	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp. -lyophilized	Cu	-	7	35	196.0	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp. -heterotrophic	Cu	-	7	35	41.9	Chojnacka et al., 2005 ^[71]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พืช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Spirulina</i> sp.-mixotrophic	Cu	-	7	35	33.4	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
	Cu	-	7	35	127.7	Chojnacka et al., 2005 ^[71]
<i>Spirulina</i> sp.-photoautotrophic	Pb	1-16	3	-	6.8	Wang et al., 1998 ^[665]
	Pb	1-16	5	-	13.60	Wang et al., 1998 ^[665]
	Pb	1-16	7	-	9.3	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cd	1-16	3	-	3.1	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cd	1-16	5	-	9.6	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cd	1-16	7	-	8.8	Wang et al., 1998 ^[665]
	Zn	1-16	3	-	5.0	Wang et al., 1998 ^[665]
	Zn	1-16	5	-	9.4	Wang et al., 1998 ^[665]
	Zn	1-16	7	-	8.7	Wang et al., 1998 ^[665]
	Ni	1-16	3	-	3.2	Wang et al., 1998 ^[665]
<i>Phormidium</i> sp.	Ni	1-16	5	-	5.7	Wang et al., 1998 ^[665]
	Ni	1-16	7	-	8.0	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cu	1-16	3	-	1.7	Wang et al., 1998 ^[665]
	Cu	1-16	5	-	10.1	Wang et al., 1998 ^[665]

เอกสารนี้เป็นเอกสารอ้างอิงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Phormidium</i> sp.	Cu	1-16	7	-	4.8	Wang et al., 1998 ^[665]
<i>P. angustissimum</i>	Pb	1-1000	3.5	25	28.57	สุธีรัตน์, 2547ก ^[734]
	Cd	1-1000	7	25	86.21	สุธีรัตน์, 2547ก ^[734]
	Pb	1-1000	4.5	RT.	93.46	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
	Cd	1-1000	6.5	RT.	116.28	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
<i>P. laminosum</i>	Cu	25-150	5.3	25-30	19.83-21.28	Blanco et al., 1999 ^[48]
	Fe	25-150	4.8	25-30	16.7-17.83	Blanco et al., 1999 ^[48]
	Ni	25-150	5.6	25-30	13.13-16.10	Blanco et al., 1999 ^[48]
	Zn	25-150	5.7	25-30	18.05-18.60	Blanco et al., 1999 ^[48]
<i>Nostoc paludosum</i>	Pb	1-1000	4	RT.	166.67	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
	Cd	1-1000	6.5	RT.	101.01	Duangkokkruad, 2002 ^[110]
<i>Calothrix marchica</i>	Pb	1-120	4	25	57.14	Ruangsomboon et al., 2004a ^[570]
Division Rhodophyta						
<i>Gelidium</i> sp.	Pb	10-300	3	20	38	Vilar et al., 2005 ^[653]
		10-300	4	20	45	Vilar et al., 2005 ^[653]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Gelidium</i> sp.	Pb	10-300	5.3	20	64	Vilar et al., 2005 ^[653]
		10-300	5.3	35	63	Vilar et al., 2005 ^[653]
<i>Gracillaria</i> sp.		10-300	5.3	20	45	Vilar et al., 2005 ^[653]
	Pb	-	5	22 ± 1	93.24	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cu	-	5	22 ± 1	37.49	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd	-	5.5	22 ± 1	33.72	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Zn	-	5.5	22 ± 1	26.16	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Ni	-	5.5	22 ± 1	16.44	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>G. changii</i>	Cd	50.5-400.1	5	25	25.85	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>G. edulis</i>	Cd	50.5-400.1	5	25	26.98	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>G. salicornia</i>	Cd	50.5-400.1	5	25	17.99	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
Division Chlorophyta						
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Pb		5		96.3	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Hg(II)	20-400	6	25	122.36	Tuzun et al., 2005 ^[644]
	Cd	20-400	6	25	77.56	Tuzun et al., 2005 ^[644]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Pb	20-400	5	25	147.11	Tuzun et al., 2005 ^[644]
<i>Chlorella</i> sp. living cell	Cd	1-5000	7.5	25	37.0	Matsunaga et al., 1999 ^[470]
<i>Chlorella</i> sp. freeze-dried cell	Cd	1-5000	7.5	25	91.0	Matsunaga et al., 1999 ^[470]
<i>C. vulgaris</i>	Ni	10-40	7.4	-	2.98	Wong et al., 2000 ^[681]
	Cd	1-1000	7	25	34.27	สุนิรัตน์, 2547ก ^[734]
	Pb	1-1000	3.5	25	44.25	สุนิรัตน์, 2547ก ^[734]
	Cu	25-250	5	25	48.2	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	25-250	4.5	25	59.7	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cr (IV)	25-250	2	25	79.3	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>C. miniata</i>	Ni	10-40	7.4	-	1.282	Wong et al., 2000 ^[681]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Cu	25-250	5	25	33.3	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Ni	25-250	4.5	25	30.2	Donmez et al., 1999 ^[109]
	Cr (IV)	25-250	2	25	58.8	Donmez et al., 1999 ^[109]
<i>S. dimorphus</i>	Pb	1-1000	3.5	25	123.46	สุนิรัตน์, 2547ข ^[735]
	Cd	1-1000	5.5	25	217.39	สุนิรัตน์, 2547ข ^[735]
<i>S. quadricauda</i>	Zn	0.5-8	-	25	5.03	Omar, 2002 ^[509]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Zn	0.5-8	-	25	6.67	Omar, 2002 ^[509]
<i>Spirogyra</i> sp. (เซลล์ 5 g/l)	Cu	50-250	5	22 ± 2	59.5	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Spirogyra</i> sp. (เซลล์ 10 g/l)	Cu	50-250	5	22 ± 2	79.4	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Spirogyra</i> sp. (เซลล์ 15 g/l)	Cu	50-250	5	22 ± 2	106.4	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Spirogyra</i> sp. (เซลล์ 20 g/l)	Cu	50-250	5	22 ± 2	133.3	Gupta et al., 2006 ^[167]
<i>Schizomeris leibleinii</i>	Fe	10-150	1.5	30	32.28	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb	10-150	3.0	30	28.29	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	4.0	30	52.06	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Cd	10-150	3.0	30	23.81	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	4.0	30	36.97	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Fe	10-150	2.5	20	96.41	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	2.5	30	101.70	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	2.5	40	70.23	Ozer et al., 1999 ^[515]
	Pb	10-150	4.5	20	50.25	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	4.5	30	63.52	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	4.5	40	49.18	Ozer et al., 1999 ^[515]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ทดสอบ (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
Schizomeris leibleinii	Cd	10-150	5	20	33.62	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	5	30	49.25	Ozer et al., 1999 ^[515]
		10-150	5	40	47.49	Ozer et al., 1999 ^[515]
Ulothrix zonata	Cu	5-50	4.5	20	176.2	Nuhoglu et al., 2002 ^[505]
Caulerpa lentillifera	Pb	0-621.6	5	20 ± 1	29.01	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
		0-621.6	4	20 ± 1	24.86	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
		0-621.6	3	20 ± 1	16.58	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
	Cu	0-621.6	1.5	20 ± 1	14.50	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
		0-190.62	5	20 ± 1	8.26	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
		0-190.62	4	20 ± 1	6.35	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
		0-190.62	3	20 ± 1	4.45	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]
Cd	0-190.62	1.5	20 ± 1	3.18	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]	
	0-337.23	5	20 ± 1	4.72	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]	
	0-337.23	4	20 ± 1	3.93	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]	
	0-337.23	3	20 ± 1	2.47	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]	
		0-337.23	1.5	20 ± 1	1.80	Apiratikul and Pavasant, 2006 ^[29]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Chaetomorpha linum</i> <i>Ulva</i> sp.	Cd	50.5-400.1	5	25	53.96	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
	Pb	-	5	22 ± 1	302.51	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cu	-	5	22 ± 1	47.66	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd	-	5.5	22 ± 1	65.20	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Zn	-	5.5	22 ± 1	35.32	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Ni	-	5.5	22 ± 1	17.02	Sheng et al., 2004 ^[594]
Division Phaeophyta						
<i>Ascophyllum nodosum</i> (1)	Pb	41.44-725.2	5	21	263.14	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	75.61	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	115.78	Yu et al., 1999 ^[705]
	Pb	41.44-725.2	5	21	238.28	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>A. nodosum</i> (2)	Cu	12.71-222.39	5	21	69.26	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	104.54	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>Cystoseira baccata</i>	Hg	20-200	4.5	25 ± 0.1	178	Herrero et al., 2005 ^[180]
	Hg	20-200	6	25 ± 0.1	329	Herrero et al., 2005 ^[180]

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ทดสอบ (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Lessonia flavicans</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	300.44	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	79.43	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	130.40	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>L. nigresense</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	302.51	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	80.06	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	123.65	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>Laminaria japonica</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	275.58	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	76.25	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	124.78	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>L. hyperbola</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	279.72	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	77.52	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	92.18	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>Ecklonia maxima</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	290.08	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cu	12.71-222.39	5	21	77.52	Yu et al., 1999 ^[705]
	Cd	22.48-393.43	5	21	129.27	Yu et al., 1999 ^[705]
<i>E. radiata</i>	Pb	41.44-725.2	5	21	261.07	Yu et al., 1999 ^[705]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11 ตัวควบคุมชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Ecklonia radiata</i>						
Cu		12.71-222.39	5	21	70.53	Yu et al., 1999 ^[705]
Cd		22.48-393.43	5	21	116.91	Yu et al., 1999 ^[705]
Pb		41.4-725.2	4.5-5.5	-	281.79	Matheickal and Yu, 1996 ^[467]
Cu		12.7-222.4	4.5-5.5	-	73.71	Matheickal and Yu, 1996 ^[467]
Cd		22.5-393.4	4.5-5.5	-	112.41	Matheickal and Yu, 1996 ^[467]
Pb		82.88-932.4	5	21 ± 2	261.07	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
Cu		25.4-285.93	5	21 ± 2	70.53	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
Pb		83-933	4	-	242.42	Percival and McDowell, 1967 ^[532]
Pb		83-933	4	-	304.58	Fourest and Roux, 1992 ^[130]
Pb		41.44-725.2	5	21	321.16	Yu et al., 1999 ^[705]
Cu		12.71-222.39	5	21	83.24	Yu et al., 1999 ^[705]
Cd		22.48-393.43	5	21	132.64	Yu et al., 1999 ^[705]
Pb		82.88-932.4	5	21 ± 2	321.16	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
Cu		25.4-285.93	5	21 ± 2	82.60	Matheickal and Yu, 1999 ^[469]
Pb		-	5	22 ± 1	259.00	Sheng et al., 2004 ^[594]
Cu		-	5	22 ± 1	72.44	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>Durvillaea potatorum</i>						
<i>Padina</i> sp.						

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สาหร่าย	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ ทดลอง (mg/l)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	Q _m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
<i>Padina</i> sp.	Cd	-	5.5	22 ± 1	84.31	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Zn	-	5.5	22 ± 1	52.97	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Ni	-	5.5	22 ± 1	36.98	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd	50.5-400.1	5	25	59.58	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>P. tetrastomatica</i>	Cd	20-2000	5.5	25	120	Cruz et al., 2004 ^[88]
	Cd	20-2000	5.5	40	103	Cruz et al., 2004 ^[88]
	Cd	20-2000	5.5	55	98	Cruz et al., 2004 ^[88]
	Pb	-	5	22 ± 1	240.35	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>Sargassum</i> sp.	Cu	-	5	22 ± 1	62.90	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Cd	-	5.5	22 ± 1	85.43	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Zn	-	5.5	22 ± 1	32.70	Sheng et al., 2004 ^[594]
	Ni	-	5.5	22 ± 1	35.81	Sheng et al., 2004 ^[594]
<i>S. baccularia</i>	Cd	50.5-400.1	5	25	83.18	Hashim and Chu, 2004 ^[175]
<i>S. siliquosum</i>	Cd	50.5-400.1	5	25	82.06	Hashim and Chu, 2004 ^[175]

หมายเหตุ : heterotrophic คือสร้างอาหารเองไม่ได้ ได้อาหารจากสารอินทรีย์, photoautotrophs คือสร้างอาหารได้เอง สังเคราะห์ด้วยแสงให้แก่ออกซิเจน และ mixotrophic คือลักษณะผสมระหว่าง photoautotrophs และ heterotrophic, "-" คือไม่พบข้อมูล, RT. คือระดับอุณหภูมิห้อง

การดัดแปลงตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

หลักจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหรือการเก็บเกี่ยวสาหร่ายมาจากธรรมชาติแล้ว อาจมีการดัดแปลงสาหร่ายหรือการจัดการกับสาหร่ายก่อนนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้หลายวิธี เช่นการใช้ความร้อน ใช้เกลือ หรือกรด ซึ่งวิธีต่าง ๆ เหล่านี้อาจช่วยทำให้สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นได้^[34]

การนำเซลล์สาหร่ายไปสัมผัสกับความร้อนจนเซลล์ถูกทำลายและอบจนเซลล์แห้งจากนั้นนำไปดูดซับโลหะหนัก พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงกว่าเซลล์สด ซึ่งเป็นเพราะความร้อนทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ จึงอาจทำให้ตำแหน่งยึดจับที่อยู่ภายในเซลล์สามารถยึดจับกับโลหะหนักได้ด้วย ค่าการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น

และพบรายงานวาระหว่างการดูดซับแคดเมียมโดยสาหร่ายสีเขียวชนิด *Scenedesmus quadricauda* จะมีการปล่อยโพแทสเซียมออกมาจากเซลล์ ดังนั้นการดัดแปลงสาหร่ายชนิดนี้โดยให้สัมผัสกับเกลือโพแทสเซียมก่อนนำไปดูดซับโลหะหนักอาจช่วยในขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น^[677]

นอกจากนี้ยังมีการทดลองนำเอาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Tolypothrix tenuis*, *Anabaena variabilis* และ *Microcystis aeruginosa* มาดัดแปลงโดยใช้ NaOH ก่อน และนำไปดูดซับแคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว พบว่าสาหร่ายสามารถกำจัดโลหะหนักได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มากกว่าเซลล์ที่ไม่ได้ทำการดัดแปลง^[497]

และมีการใช้ CaCl_2 ที่ความเข้มข้น 0.2 โมล ในการดัดแปลงสาหร่ายหลายชนิดเช่น *Durvillaea potatorum* เพื่อนำมาดูดซับแคดเมียม^[468], *Padina* sp. เพื่อนำมาดูดซับทองแดง^[417], *Ecklonia maxima* เพื่อนำมาดูดซับทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม^[123] หรือใช้ความร้อนในการดัดแปลงเซลล์เช่นใช้ความร้อน 105 องศาเซลเซียส อบสาหร่าย *Ulva lactuca* และนำไปใช้ในการดูดซับโครเมียม

1. ผลของการดัดแปลงตัวดูดซับต่อการดูดซับโลหะหนัก

การดัดแปลงตัวดูดซับหรือการปรับปรุงคุณภาพตัวดูดซับก่อนนำไปดูดซับโลหะหนัก (modification/ pretreatment) มักใช้กับตัวดูดซับที่ต้องการใช้ในรูปแบบไม่มีชีวิต การดัดแปลงทำได้โดยใช้ต่าง กรด สารชะล้าง ความร้อน หรือวิธีการอื่น ๆ หลังจากนั้นนำตัวดูดซับที่ถูกดัดแปลงไปดูดซับโลหะหนัก ผลที่ได้พบว่าอาจสามารถช่วยเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับหรืออาจลดการดูดซับก็ได้

เช่น การนำฟองไอน้ำไปผ่านหม้อนึ่งอัดไอน้ำ (autoclave) และนำไปดูดซับโลหะหนัก พบว่าทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักต่ำลงกว่าตัวดูดซับที่มีชีวิต เพราะขั้นตอนการนำโลหะหนักเข้าเซลล์ถูกทำลาย^[702] และพบว่าการใช้ความร้อนในการดัดแปลงปรับปรุงตัวดูดซับเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มอะมิโนจากผนังเซลล์ตัวดูดซับ จึงทำให้ความสามารถในการจับโลหะหนักลดลง

การใช้ต่างในการดัดแปลงตัวดูดซับพบว่าบางครั้งทำให้เซลล์เพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพราะต่างทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย จึงมีการปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์ จึงเพิ่มความสามารถในการจับโลหะหนัก

การใช้กรดในการปรับปรุงตัวดูดซับพบว่าบางครั้งจะทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะ H^+ ของกรดไปจับกับตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับเอาไว้ ทำให้ดูดซับโลหะหนักได้ลดลง แต่ในบางกรณีพบว่าการใช้กรดปรับปรุงตัวดูดซับสามารถทำให้ค่าการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับสูงขึ้น และบางครั้งพบว่าการใช้กรดดัดแปลงตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสูงกว่าการดัดแปลงตัวดูดซับด้วยวิธี autoclave หรือการอบแห้ง

ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้เป็นการใช้วิธีการดัดแปลงวิธีเดียวกัน แต่ผลการดูดซับที่ได้มีทั้งเป็นการเพิ่มและลดการดูดซับ ซึ่งการที่ตัวดูดซับแต่ละชนิด แม้ผ่านการดัดแปลงด้วยวิธีเดียวกัน แต่ให้ผลการดูดซับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะตัวดูดซับมีความแตกต่างของโครงสร้างองค์ประกอบเซลล์สายพันธุ์ ฯลฯ และวิธีการดัดแปลงวิธีหนึ่ง อาจเป็นทั้งการเพิ่มและลดความสามารถในการดูดซับของสาหร่ายชนิดนั้น เช่นการใช้ความร้อนจะทำลายผนังเซลล์ ทำให้ตำแหน่งยึดจับภายในเซลล์ช่วยจับโลหะหนักได้ แต่ความร้อนก็ทำลายหมู่อะมิโน ทำให้หมู่อะมิโนไม่สามารถจับโลหะหนักได้

จากการที่ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับที่ตายแล้ว อาจสูงกว่าเท่ากับ หรือน้อยกว่าตัวดูดซับที่มีชีวิตนั้น ขึ้นกับวิธีการในการปรับปรุงตัวดูดซับที่นำมาใช้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวิธีการที่เหมาะสมในการปรับปรุงเพื่อทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับได้ ส่วนการดัดแปลงตัวดูดซับที่ต้องการใช้ในรูปแบบที่มีชีวิตส่วนใหญ่จะดัดแปลงโดยเลี้ยงสาหร่ายให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัดเช่นทำให้สาหร่ายทนต่อพีเอชต่ำ โลหะหนักเข้มข้นสูง หรือสารพิษอื่น ๆ ที่สูงได้

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก

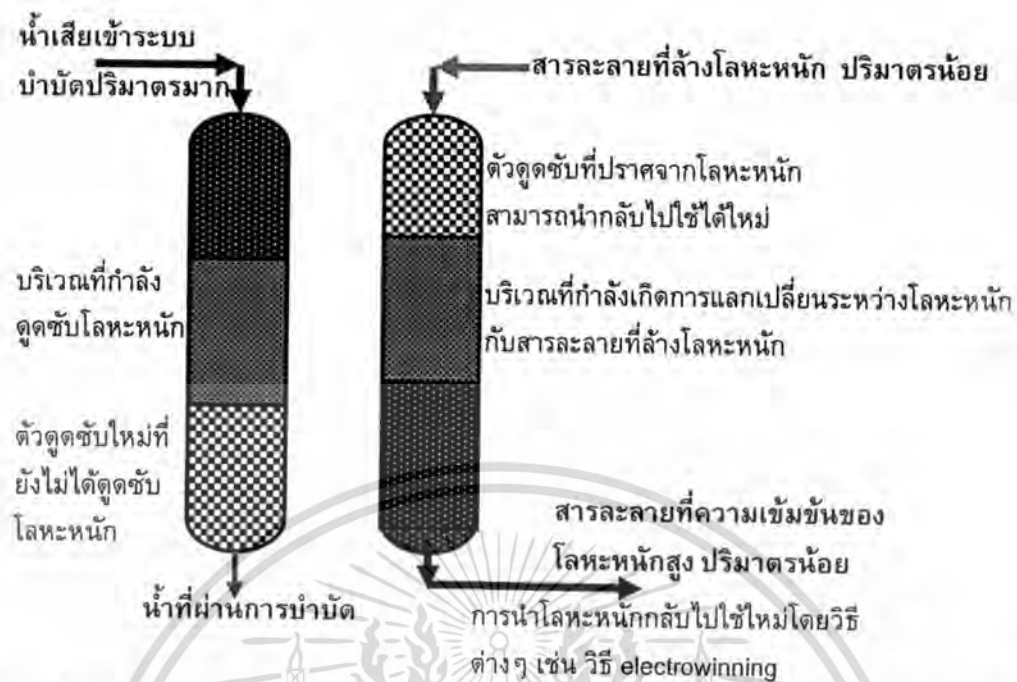
แม้การใช้สาหร่ายกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจะมีข้อดีในการดูดซับอยู่มาก แต่ในทางปฏิบัติจริงเมื่อต้องการใช้สาหร่ายในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ต้องทำการเตรียมสาหร่ายก่อนนำมาใช้ เช่นการเก็บสาหร่ายมาจากธรรมชาติ หรือการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้มีปริมาณเพียงพอ หลังจากทำการเลี้ยงสาหร่ายแล้วต้องมีการเก็บเกี่ยวหรือหลังการดูดซับต้องมีการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากระบบบำบัด แต่เนื่องจากสาหร่ายที่ใช้ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กหรือถูกบดเป็นชิ้นเล็กเพื่อให้ดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น ดังนั้นขั้นตอนการแยกสาหร่ายออกจึงยุ่งยาก ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

ทางเลือกคือควรมีการตรึงสาหร่ายไว้บนวัสดุยึดเกาะ หรือการทำ immobilization ซึ่งหมายถึง การยึดหรือตรึงสาหร่ายไว้กับที่ สำหรับสาหร่ายขนาดเล็กการใส่หรือตรึงเซลล์สาหร่ายบนวัสดุที่เหมาะสมให้อยู่ในรูปเม็ดหรือก้อนขนาดเล็ก จะสามารถพัฒนาลักษณะทางกายภาพของ สาหร่าย ช่วยให้สามารถใช้ในระบบบำบัดได้ง่ายขึ้น เช่นใช้ในการบรรจุแบบคอลัมน์ และทำให้ ระบบสามารถนำไปใช้ได้จริงซึ่งสามารถทำการการค้าได้^[17, 18, 80, 657, 658] การตรึงสาหร่ายบน วัสดุยึดเกาะจะทำให้เซลล์มีความหนาแน่นสูง และสามารถใช้ดูดซับโลหะหนักแบบระบบ คอลัมน์ได้ แต่ข้อเสียคือจะจำกัดการแพร่ของโลหะหนักบางส่วน ทำให้ตำแหน่งยึดจับบนผิว เซลล์สาหร่ายจับกับโลหะหนักได้ช้าลง^[172]

ส่วนใหญ่วัสดุยึดเกาะจะมีลักษณะเป็นวัน เจลาติน เช่น โซเดียมหรือแคลเซียมอัลจิเนต ซิลิกาเจล หรือ polyacrylamide ซึ่งวัสดุยึดเกาะพวกนี้มีศักยภาพสูงในระบบการบำบัดขนาดเล็ก และการจำกัดการแพร่ของโลหะหนักสู่ผิวเซลล์สาหร่ายมีน้อย วัสดุยึดเกาะเหล่านี้มีความ คงตัว สามารถทำเป็นเม็ดกลม ๆ ขนาดเล็ก และใช้ได้ทั้งระบบบำบัดแบบ fixed bed, fluidized-bed และ air-lift bioreactors ซึ่งเป็นระบบที่ทำงานคล้าย ๆ กับการใช้แผ่นเรซินแลกเปลี่ยน ไอออนหรือระบบถ่านกัมมันต์ดูดซับโลหะหนัก^[142] หรืออาจใช้วิธีการทำให้สาหร่ายยึดเกาะเป็น แผ่นฟิล์มชีวภาพ (biofilm/ ไบโอฟิล์ม) บนวัสดุยึดเกาะที่เหมาะสม เช่นวัสดุที่มีรูพรุน เช่นโฟม ฟองน้ำ หรืออาจใช้ทราย เป็นต้น^[103, 487, 677]

โดยได้มีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สาหร่ายไว้ หลายแบบ โดยมีข้อต้องพิจารณาในการออกแบบหลายประการเช่นประเภทของตัวดูดซับ ชีวภาพที่จะนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักในทางอุตสาหกรรม ซึ่งมีตัวดูดซับหลายชนิดที่นำมาใช้ได้ ตัวดูดซับแต่ละประเภทมีประโยชน์ที่เฉพาะเจาะจงลงไป และระบบการบำบัดน้ำเสียที่พบว่ามี การนำมาใช้บ่อยที่สุดคือ fixed bed column ซึ่งวิธีนี้มีกลไกการทำงานคล้ายกับแผ่นเรซิน แลกเปลี่ยนไอออน คือให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับทางชีวภาพไว้ ซึ่งวิธีการนี้ สามารถดูดซับโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีข้อดีคือน้ำเสียนี้จะสัมผัสกับตัวดูดซับ ใหม่ ๆ ที่อยู่ด้านล่าง และไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนการแยกเซลล์ตัวดูดซับออกจากน้ำเสีย แต่วิธี นี้มีข้อเสียคือคอลัมน์อาจจะอุดตันถ้าน้ำเสียมีตะกอนมากเกินไป (ภาพที่ 1)

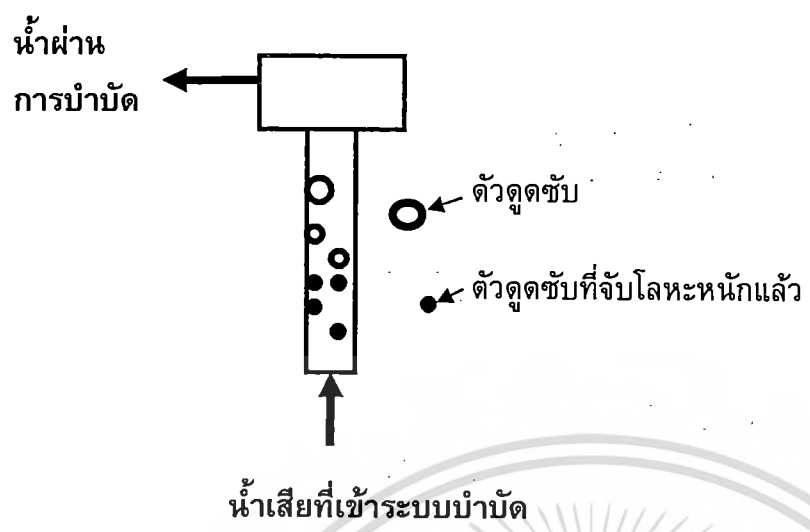


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมของระบบบำบัดโลหะหนักแบบ fixed bed column แสดงการดูดซับและการล้างโลหะหนัก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Davis et al. (2003)^[96]

1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ fluidized or expanded bed reactor

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ fluidized or expanded bed reactor ระบบนี้จะบรรจุตัวดูดซับไว้ในระบบบำบัดจากนั้นปล่อยให้ น้ำเสียไหลขึ้นด้านบนผ่านตัวดูดซับ และน้ำที่บำบัดแล้วจะไหลออกทางด้านบนของระบบ ซึ่งอัตราเร็วของการไหลต้องสมดุลกับขนาดของตัวดูดซับและความหนาแน่นของตัวดูดซับ ซึ่งวิธีนี้อัตราการไหลจะทำให้ตัวดูดซับหรือชิ้นส่วนตัวดูดซับหมุนเวียนไปสัมผัสกับสารละลายแต่ไม่พาตัวดูดซับออกจากระบบ วิธีนี้คล้าย fixed bed column คือ น้ำเสียหรือสารละลายจะสัมผัสกับตัวดูดซับที่ยังใหม่แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโลหะใน fluidized bed จะลดลงได้มากกว่า fixed bed แล้ว fluidized bed มักจะไม่มี การอุดตันเกิดขึ้น และมักพบว่าตัวดูดซับจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้มาก และตัวดูดซับที่ดูดซับโลหะหนักได้เต็มที่จะจมลงที่ก้นของระบบ จะทำให้สามารถกำจัดตัวดูดซับเหล่านั้นออกไป และแทนที่ด้วยตัวดูดซับตัวใหม่ ซึ่งการนำตัวดูดซับใหม่มาแทนที่มักแทนประมาณ 1/10 ของตัวดูดซับเก่า (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ fluidized or expanded bed reactor

2. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ stir tank

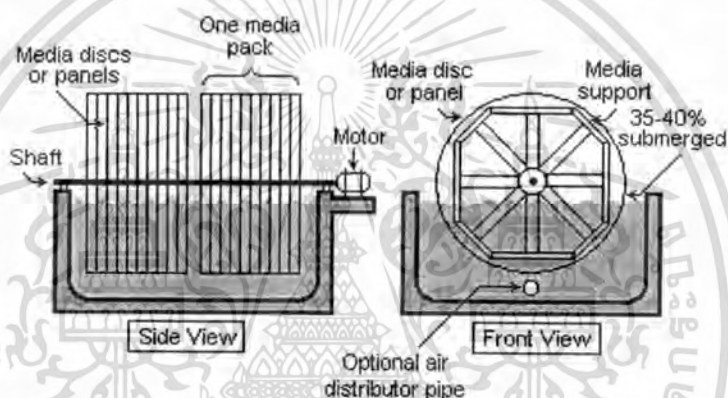
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ stir tank ระบบนี้บรรจุตัวดูดซับและมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการปั่น เพื่อแพร่กระจายตัวดูดซับไปทั่วระบบบำบัด และพบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้โลหะหนักถูกกำจัดออกจากระบบได้มากขึ้น จะทำให้น้ำเสียมีโลหะหนักปนเปื้อนน้อยลง ถ้าพบว่าตะกอนตัวดูดซับหรือชิ้นส่วนตัวดูดซับแตกออกหรือถูกทำลาย ก็จะมีการแยกตัวดูดซับออกจากระบบ โดยตัวดูดซับที่มีโลหะเกาะอยู่จะถูกแยกออกมาจากสารละลายและนำตัวดูดซับมาดกตะกอน อาจใช้วิธี บั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอนหรือการกรอง หรือใช้ระบบแม่เหล็กดึงดูดตัวดูดซับออกมาในการแยก ซึ่งการใช้ระบบแม่เหล็กตัวดูดซับต้องมีคลื่นแม่เหล็กด้วย

3. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ rotating biological contactor

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ rotating biological contactor หรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (ภาพที่ 3) ระบบนี้จะให้สาหร่ายเจริญเติบโตแบบไบโอฟิล์มอยู่บนวัตถุลักษณะทรงกระบอก และระบบจะให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางทรงกระบอกซึ่งวางจุ่มอยู่ในถังบำบัด ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้า ๆ เมื่อสาหร่ายแช่อยู่ในน้ำจะดูดซับโลหะหนักเมื่อหมุนขึ้นพ้นน้ำและสัมผัสอากาศ สาหร่ายที่อาศัยติดอยู่กับตัวกลางจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์แสงและออกซิเจน ในการเจริญเติบโต มีการหมุนสลับกันเช่นนี้ตลอดเวลา โดยการใช้ระบบนี้เพื่อดูดซับทองแดง สังกะสี แคดเมียม พบว่าการหมุนที่ 1 รอบต่อนาที อัตราการไหลของน้ำ

6.9 มิลลิลิตรต่อนาที ระดับนี้เป็นระดับที่ให้ค่าการเจริญเติบโตสูงสุดสำหรับสาหร่ายสูงที่สุด และดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด

โดยระบบบำบัดน้ำเสียนี้ได้มีการออกแบบเพื่อนำไปใช้จริงในระดับโรงงานต้นแบบ (pilot scale) โดยใช้ชื่อว่า BIOALGA^[638] โดยเป็นระบบที่ทำจากพลาสติกอะคริลิกบรรจุน้ำเสียที่ต้องการบำบัด และมีท่อทรงกระบอกที่หมุนได้อยู่ตรงกลางระบบ โดยท่อทรงกระบอกนี้จะหุ้มด้วย polyurethane หนา 0.5 มิลลิเมตร และมีสาหร่ายขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นนี้ โดยท่อทรงกระบอกนี้จะจมอยู่ใต้น้ำบางส่วนและมีการหมุนเพื่อให้สาหร่ายสัมผัสกับน้ำเสียและสัมผัสกับแสงด้านบนเพื่อสังเคราะห์แสงและแลกเปลี่ยนแก๊สได้ด้วย ซึ่งให้ผลในการกำจัดโลหะหนักได้ดี



ภาพที่ 3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ rotating biological contactor

ที่มา : <http://commons.wikimedia.org>^[203]

4. ระบบ moving-bed sand filter

ระบบ moving bed sand filter ระบบนี้มีการบรรจุทรายไว้ในระบบโดยให้มีตัวดูดซับยึดเกาะบนทราย และให้น้ำเสียไหลผ่านทรายนี้ โดยพบว่า การบรรจุทรายที่ความสูงประมาณ 2 เมตร จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักดีที่สุด แต่ระบบนี้ต้องให้สารอาหาร (ไนเตรท) และคาร์บอนกับระบบเพื่อให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ วิธีนี้สามารถทำได้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้บำบัดน้ำเกลือออกจากน้ำเสีย^[103, 542]

5. การแยกสาหร่ายออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

สำหรับการใช้สาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงตามมาคือการแยกสาหร่ายออกจากสารละลายหรือออกจากน้ำเสีย ทั้งในระบบการดูดซับแบบกะหรือดูดซับครั้งเดียวแล้วแยกสาหร่ายออก (batch) และระบบการดูดซับโดยให้น้ำเสียไหลผ่านสาหร่ายแบบต่อเนื่อง (continuous) หากการปฏิบัติในระดับห้องปฏิบัติการ จะใช้วิธีแยกเซลล์โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

กรอง หรือการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์ (centrifugation) แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้กับน้ำเสียจริงในทางอุตสาหกรรม

สำหรับสาหร่ายระบบบำบัดน้ำเสียแบบการใช้วิธีทำให้เซลล์สาหร่ายยึดติดกับวัสดุหรือบรรจุในคอลัมน์ให้น้ำเสียไหลผ่านเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพราะแยกสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วออกจากระบบได้ง่าย

สำหรับระบบบำบัดที่ใช้สาหร่ายที่มีชีวิต ในกรณีที่ใช้สาหร่ายขนาดเล็กที่ไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนหรือแผ่นเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยการเลี้ยงสาหร่ายให้เจริญเติบโตในบ่อบำบัด จะมีข้อจำกัดเนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กจะมีการแพร่กระจายของสาหร่ายไปทั่วมวลน้ำ ทำให้เป็นข้อจำกัดหลักในการที่จะกำจัดสาหร่ายขนาดเล็กนี้ออกจากระบบ เพราะทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก

วิธีแก้คือเลือกชนิดสาหร่ายที่มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม หรือเลือกใช้สาหร่ายที่มีลักษณะเป็นเส้นสายยาว จากนั้นทำการเลี้ยงสาหร่ายโดยให้สาหร่ายเจริญเติบโตจนเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหรือสานกันเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ เพราะสาหร่ายเหล่านี้มักมีเมือกหุ้มเซลล์ เมื่อมีการแบ่งเซลล์เจริญเติบโต เซลล์ใหม่ยังคงเกาะกับเซลล์เดิมไปเรื่อย ๆ ก็จะเกาะกันเป็นกลุ่ม floc หรือเป็นแผ่น ซึ่งกลุ่มเซลล์หรือแผ่นฟิล์มชีวภาพที่ดูดซับโลหะหนักจนเต็มแล้ว ไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มเติมอีก จะสามารถทำการกำจัดสาหร่ายออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ เพียงใช้วิธีการกรองด้วยผ้ากรองหรือตาข่ายขนาดช่องตาเล็ก ๆ นำผ้ากรองไปกั้นบริเวณช่องที่ปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบ และเมื่อน้ำไหลผ่านผ้ากรองก็จะแยกสาหร่ายออกจากระบบบำบัดได้ หรือเมื่อหยุดการกวนน้ำหรือการให้พองอากาศภายในบ่อ สาหร่ายจะตกตะกอนลงที่พื้นบ่อเองตามธรรมชาติซึ่งจะทำให้สามารถกำจัดออกจากบ่อบำบัดได้ง่าย

ดังนั้นข้อควรคำนึงถึงในการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียคือ แม้สาหร่ายสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้องคำนึงถึงการวางแผนการแยกสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วออกจากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งมีน้ำอยู่ปริมาณมาก ซึ่งทางเลือกหนึ่งซึ่งหลีกเลี่ยงวิธีที่ต้องแยกเซลล์สาหร่ายออกจากระบบบำบัดคือการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบการเลี้ยงสาหร่ายให้เจริญเติบโตในระบบบำบัด

6. การจัดการระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายที่มีชีวิต

ปัญหาของการใช้สาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสียจริงคือการแยกสาหร่ายออกจากระบบบำบัดจะทำได้ยาก เนื่องจากสาหร่ายมีขนาดเล็กและธรรมชาติของสาหร่ายคือกระจายทั่วมวลน้ำ และปัญหาของการใช้สาหร่ายมีชีวิตคือประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายจะจำกัดโดยพิษของโลหะหนักที่มีในน้ำเสีย จึงทำให้การดูแลหรือจัดการให้สาหร่ายยังคงมีชีวิตและมีการเจริญเติบโตอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเรื่องค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน

การเลือกใช้ระบบบำบัดที่สาหร่ายมีชีวิตหรือไม่มีชีวิตขึ้นกับลักษณะเฉพาะของระบบบำบัดที่ได้ทำการพัฒนาออกแบบขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรคิดว่าระบบที่มีชีวิตจะทำได้ยุ่งยาก และไม่นำมาพิจารณาในการออกแบบระบบบำบัด เพราะในอดีตระบบบำบัดน้ำเสียแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

เก่าหลายระบบที่ใช้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในการบำบัดเช่นกัน ซึ่งรวมถึงสาหร่ายขนาดเล็กด้วย ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าข้อจำกัดนี้ไม่เป็นปัญหาหลักที่จะจำกัดการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียโดยสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจริงได้

ระบบการเลี้ยงสาหร่ายให้เจริญเติบโตในระบบบำบัดน้ำเสียมีข้อดีคือไม่ต้องแยกสาหร่ายออกจากระบบบำบัดแต่หากในกรณีที่มีโลหะหนักที่ความเข้มข้นมากเกินไปเข้ามาในระบบอาจต้องมีการแยกสาหร่ายออกชั่วคราวเพื่อไม่ให้สาหร่ายตาย และหาวิธีลดโลหะหนักด้วยวิธีกายภาพและเคมีก่อน จนโลหะหนักลดลงในปริมาณที่ไม่เป็นพิษต่อสาหร่ายจึงนำสาหร่ายกลับเข้ามาในระบบใหม่

ได้มีการทดลองให้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักโดยการเลี้ยงสาหร่ายไว้ในระบบพบว่าน้ำเสียที่ปล่อยลงบ่อบำบัดที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้สาหร่ายมีผลผลิต 30 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน กำจัดโลหะหนักได้ 50 เปอร์เซ็นต์ และจากการคำนวณ พบว่าระบบของบ่อบำบัดสามารถรับน้ำเสียเข้ามาในระบบได้เพิ่มมากขึ้นที่ความสูงของน้ำเสีย 15 เซนติเมตรต่อวัน ซึ่งเป็นระบบที่สามารถทำได้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม^[677]

ในการศึกษาปริมาณยูเรเนียมในระบบบำบัดน้ำเสียโดยสาหร่ายมีชีวิตรอบบ่อบำบัดน้ำเสียจากเหมืองแร่ พบว่าสาหร่ายมีความสามารถสะสมยูเรเนียมได้ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ในระบบบำบัดที่มียูเรเนียมเข้ามาในระบบ 5 ดันต่อปี เมื่อคำนวณผลผลิตสาหร่ายพบว่ามีสาหร่าย 14 ดันต่อเฮกเตอร์ต่อปี ซึ่งพบว่าหากผลการบำบัดเป็นเช่นนี้จะต้องใช้บ่อที่มีพื้นที่ 175 เฮกเตอร์จึงสามารถกำจัดโลหะหนักได้ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามหากระบบสามารถผลิตสาหร่ายได้ 50 ดันต่อเฮกเตอร์ต่อปี ซึ่งก็เป็นค่าที่พบว่าสามารถผลิตได้หากมีการจัดการที่เหมาะสม และสาหร่ายในปริมาณเท่านั้นเมื่อสัมผัสกับยูเรเนียมพบที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง บางครั้งอาจพบดูดซับได้สูงถึง 300 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ถ้าสามารถจัดระบบได้เป็นเช่นนี้จะต้องการใช้พื้นที่เพียง 20 เฮกเตอร์ในการบำบัดน้ำเสียทั้งหมด ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการเลี้ยงสาหร่ายในระบบจะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักได้ และถึงแม้ขั้นสุดท้ายของระบบยังคงต้องการขั้นตอนการแยกสาหร่ายออกจากระบบ แต่พบว่าการทำให้สาหร่ายเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนและแยกออกจากระบบเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและใช้พื้นที่ขนาดเล็กเท่านั้น^[677]

เป็นจุดที่ควรสังเกตว่าในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบใช้สาหร่ายที่มีชีวิต กลไกหลักในการกำจัดโลหะหนักคือการผลิตสารอินทรีย์ (organic matter) ต่าง ๆ ขึ้น โดยสาหร่ายหรือพืชน้ำอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบ^[443] ซึ่งส่งผลให้มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ลดซัลเฟตในตะกอน และทำให้เกิดซัลไฟด์ ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนโลหะหนักกับซัลไฟด์ขึ้นมาด้วย ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นนี้แม้จัดเป็นขบวนการหนึ่งของขบวนการดูดซับชีวภาพ แต่ขบวนการนี้ไม่สามารถควบคุมได้ และยังมีผลเสียจากการที่โลหะหนักดังกล่าวอยู่ในรูปที่ไม่เสถียรและจะอยู่ในรูปที่ไม่

ละลายน้ำหรือละลายน้ำขึ้นกับคาร์ดิออกซ์ และค่าพีเอชของน้ำซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา

ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้วิธีการเลี้ยงให้สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตในระบบ พบว่า หากในบ่อบำบัดน้ำเสียนั้นมีการปลูกพืชน้ำหรือพรรณไม้หน้าอยู่ที่พื้นท้องน้ำในบ่อ จะทำให้การบำบัดน้ำเสียของระบบนี้สามารถกำจัดได้ทั้งโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและรูปที่ตกตะกอน จนในที่สุดจะไม่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในน้ำ น้ำจากบ่อบำบัดนี้จึงสามารถปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติได้โดยไม่ต้องผ่านบ่อตกตะกอนชั้นสุดท้าย (เพราะตะกอนถูกจับไว้โดยสาหร่ายและพืชน้ำแล้ว) เพียงแต่ใช้อุปกรณ์ในการกั้นไม่ให้สาหร่ายไหลปนไปกับน้ำที่ปล่อยออกจากบ่อลงสู่แหล่งน้ำเท่านั้น

การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อกำจัดโลหะหนักในบ่อบำบัด เป็นขั้นตอนการกำจัดโลหะหนักที่ได้มีการศึกษาและทดลองปฏิบัติจริงในหลายพื้นที่ เช่นการใช้สาหร่ายขนาดเล็กกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียของเมืองแรมโรว์รัฐ Missouri โดยในระบบนี้จะมีปอดกตะกอนทางกายภาพขั้นต้นและตามด้วยบ่อที่มีน้ำไหลเวียนซึ่งในบ่อนี้จะมีสาหร่ายที่ถูกตรึงให้ยึดเกาะอยู่กับที่ และทำงานร่วมกับพรรณไม้หน้า (กลุ่มที่มีลำต้นยึดเกาะกับดินและมีใบโผล่พ้นผิวน้ำ) ในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งระบบนี้พบว่า เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดตะกั่ว และได้มีการใช้ระบบบ่อบำบัดน้ำเสียที่ใช้สาหร่ายที่มีชีวิตร่วมกับการใช้ทรายเพื่อทำหน้าที่กรอง โดยให้สาหร่ายนี้มีหน้าที่แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าทำให้ราคาของระบบบ่อบำบัดต่ำมากและง่ายต่อการดูแลระบบบ่อบำบัด

การใช้สำหรับพวกที่ยึดเกาะกับวัสดุหรือเกาะตามผนังบ่อบำบัด มาเลี้ยงในบ่อบำบัด เพื่อให้ทำหน้าที่กำจัดโลหะหนัก เป็นระบบที่ถูกพิจารณาว่ามีประสิทธิภาพและศักยภาพในการบำบัดสูง เพราะสาหร่ายพวกที่ยึดเกาะวัสดุสามารถเจริญเติบโตได้ทันทีในบ่อและสามารถใช้เป็นตัวกรองชีวภาพในการแยกโลหะหนัก โดยสามารถแยกได้ทั้งโลหะหนักที่ละลายและที่ตกตะกอน

เนื่องจากคุณสมบัติโดยธรรมชาติของสาหร่ายที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้สูง และข้อดีเรื่องศักยภาพที่เด่นชัด ดังนั้นควรมีการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักให้เหมาะสมที่สุด โดยอาจใช้เป็นขั้นตอนย่อยขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนในกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่มีอยู่หลายขั้นตอนอยู่แล้ว เช่นอาจใช้ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี

การพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เทคโนโลยีในการกำจัดโลหะหนักที่ซับซ้อนในอดีตเช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน การใช้ถ่านกัมมันต์ การระเหยกลายเป็นไอ วิธีเหล่านี้ส่วนใหญ่มีราคาแพง ค่อนข้างยากต่อการปรับขนาด การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเหล่านี้มักใช้เวลานานและใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ยังอาจเกิดมลพิษทางอากาศและน้ำได้ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเหล่านี้มักใช้เวลานานและใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ยังอาจเกิดมลพิษทางอากาศและน้ำได้

ยากในการนำมาปฏิบัติจริงหากความเข้มข้นของโลหะหนักมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนขบวนการ biosorption นั้นเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ซึ่งมีสิ่งที่เป็นเหนือกว่าวิธีในอดีตคือราคาที่ต่ำ ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และสามารถนำโลหะที่มีราคาแพง กลับมาใช้ใหม่ได้^[431]

ตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดโลหะหนักพบว่า การกำจัดตะกั่วแบบดั้งเดิมหรือแบบฝังกลบ (excavation landfill) ในสหรัฐอเมริกา จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 150-350 ดอลลาร์ต่อตัน แต่ถ้าใช้วิธีการบำบัดทางชีวภาพ (bioremediation) มีค่าใช้จ่ายประมาณ 20-80 ดอลลาร์ต่อตัน^[118]

การใช้สาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Chlorella vulgaris* เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์และแผ่นเรซิน โดยราคาเรซินอยู่ที่ 100 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ ส่วนราคาสาหร่ายอยู่ที่ประมาณ 1-2 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์^[317]

1. ต้นทุนในการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่าย

สำหรับการพิจารณาด้านความคุ้มค่า หรือต้นทุนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้สาหร่ายนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เพราะในทางปฏิบัติแล้ววิธีนี้ยังใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งลักษณะรูปแบบการใช้ หรือต้นทุนจะไม่เท่ากับการนำระบบไปบำบัดจริงในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยต้นทุนบางอย่างที่พอจะสามารถนำมาพิจารณาได้ เช่น ราคาสาหร่าย

สำหรับต้นทุนราคาของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีจำหน่ายมีน้อยมาก เพราะส่วนใหญ่แล้วในการบำบัดโลหะหนักนั้น เป็นการบำบัดในระดับห้องปฏิบัติการ และแต่ละห้องปฏิบัติการได้ทำการเลี้ยงสาหร่ายเอง ไม่ได้ทำการเลี้ยงเพื่อจำหน่าย และการคำนวณต้นทุนค่อนข้างซับซ้อน เพราะไม่เพียงแต่ราคาสารเคมีที่ใช้เป็นอาหารเลี้ยงสาหร่าย แต่ยังต้องรวมถึงต้นทุนภาชนะวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมบ่ม การเลี้ยง ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า ค่าแรง ค่าเสื่อมราคา ดังนั้นในระดับห้องปฏิบัติการจึงไม่สามารถระบุต้นทุนการผลิตสาหร่ายขนาดเล็กได้ จะระบุได้เฉพาะสาหร่ายที่มีการเพาะเลี้ยงเป็นการค้าแล้วเท่านั้น

โดยพบว่าราคาจำหน่ายสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดที่มีการเพาะเลี้ยงและจำหน่ายทางการค้าในรูปของเซลล์แห้งหรือเซลล์สดที่ยังไม่ผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีรายงาน เช่น

Spirulina platensis ในรูปเซลล์แห้ง ระดับคุณภาพสำหรับเป็นอาหารสัตว์ ราคา กิโลกรัมละ 400 บาท (เป็นราคาที่ซื้อจากบริษัทที่เลี้ยงสปิรูลินาเพื่อจำหน่ายสำหรับไปผสมในอาหารปลา)

Spirulina ในรูปเซลล์แห้ง ราคาประมาณ 10,000 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน^[677]

Chlorella vulgaris ในรูปเซลล์สด ราคาขีดละ 60 บาท (เป็นราคาจำหน่ายของหัวเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร *Chlorella* เพื่อนำไปเพาะเลี้ยงต่อไป) หมายเหตุให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chlorella sp. ในรูปเซลล์แห้ง ราคาประมาณ 20,000 ดอลลาร์สหรัฐต่อดัน^[677]

แต่หากเป็นการผลิตสาหร่ายในระดับป้อนขนาดใหญ่ จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง แต่ขึ้นกับราคา ความต้องการ กลไกต่าง ๆ ของตลาด รวมทั้ง ความยาก ง่ายในการเลี้ยงสาหร่ายแต่ละชนิด ผลผลิตที่ได้จากการเพาะเลี้ยง ดังนั้นเกณฑ์หนึ่งในการเลือกชนิดสาหร่ายมาใช้กำจัดโลหะหนักนอกจากพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้สูงแล้ว ยังต้องพิจารณาสาหร่ายชนิดที่ที่สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายด้วยนั่นเอง และนอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงการนำเซลล์สาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วมาล้างโลหะหนักออก และนำกลับมาใช้ดูดซับได้ใหม่อีกหลายครั้ง ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักลงได้ด้วยเช่นกัน

สาหร่ายหลายชนิดมีต้นทุนในการเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวต่ำ โดยสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดสามารถเก็บจากธรรมชาติและนำมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้โดยไม่ต้องทำการเพาะเลี้ยงเอง เช่นสาหร่ายกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงิน *Microcystis* ซึ่งเป็นชนิดที่พบว่ามี การบลูมในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำหรือในแหล่งน้ำธรรมชาติได้บ่อย และมีปริมาณมาก สามารถใช้กรองหรือผ้ากรองขนาดช่องตาไม่ควรเกิน 60 ไมครอนเก็บได้ ส่วน *Oscillatoria* พบมีการบลูมได้ทั้งบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจืดและน้ำเค็ม โดยในน้ำเค็มมีการรวมตัวกันเป็นแผ่นขนาดใหญ่สามารถใช้สวิงหรือใช้มือเก็บได้ นอกจากนี้ยังมีสาหร่ายสีเขียวเช่น *Spirogyra*, *Cladophora* และ *Microspora* ที่พบได้ตามแหล่งน้ำ แม่น้ำธรรมชาติ มีขนาดใหญ่สามารถใช้มือเก็บได้ ซึ่งสาหร่ายที่เก็บได้เองจากธรรมชาติ ย่อมมีต้นทุนต่ำมาก มีเฉพาะค่าเดินทางในการเก็บและการนำกลับมาตากแห้ง เพื่อเก็บไว้ใช้บำบัดโลหะหนักต่อไป

สำหรับสาหร่ายขนาดใหญ่ จะพบในทะเลปริมาณมาก โดยเฉพาะกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาล เช่น *Sargassum*, *Padina* สาหร่ายสีแดง *Gracilaria* สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa* ซึ่งสาหร่ายเหล่านี้จะถูกพัดพาขึ้นมาโดยคลื่นมาติดบริเวณชายหาดเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะเมื่อถึงฤดูกาลที่สาหร่ายเหล่านี้เจริญเติบโตสูงสุด โดยพบว่าในบางสถานที่ โดยเฉพาะแหล่งท่องเที่ยวสาหร่ายเหล่านี้บดบังทัศนียภาพทั้งดงามที่ชายหาด จนต้องมีการกำจัดทิ้ง ต้องเสียค่าแรงงานในการเก็บ ค่าใช้จ่ายในการกำจัด เช่นการกำจัดสาหร่าย *Gracilaria* ออกจากชายหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี เป็นต้น ซึ่งสาหร่ายเหล่านี้สามารถเก็บมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักได้

นอกจากนี้สาหร่ายขนาดใหญ่ยังได้มีการเพาะเลี้ยงไว้ในบ่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสัตว์น้ำ เพื่อช่วยในการบำบัดน้ำ ซึ่งไม่มีต้นทุนเรื่องสารเคมีเพราะใช้ธาตุอาหารจากน้ำที่ระบายออกมาจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่นสาหร่ายสีเขียว *Ulva*, *Caulerpa*, *Chaetomorpha*, *Rhizoclonium*, *Cladophora*, *Enteromorpha* สาหร่ายสีแดง *Acanthophora*, *Gracilaria* เป็นต้น โดยสาหร่ายเหล่านี้เมื่อใช้บำบัดน้ำเสียผ่านไปสักระยะหนึ่งจะมีผลผลิตเพิ่มขึ้นมีปริมาณมากจนเกินความต้องการ เพราะสารอาหารที่มากทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดี จนหนาแน่นเกินไป เกิดการบังแสงแดดที่ส่องลงพื้นท้องน้ำ และบดบังแสงแดดระหว่างกันเอง ซึ่งจะทำให้สาหร่ายบางส่วนตายและเน่าเสียในบ่อได้ ดังนั้นเมื่อสาหร่ายมีมากเกินไปจะต้องทำการกำจัดจากบ่อบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงนำสาหร่ายเหล่านี้มาใช้บำบัดโลหะหนักได้ต่อไป โดยไม่ต้องมีต้นทุนในการเพาะเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมต่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

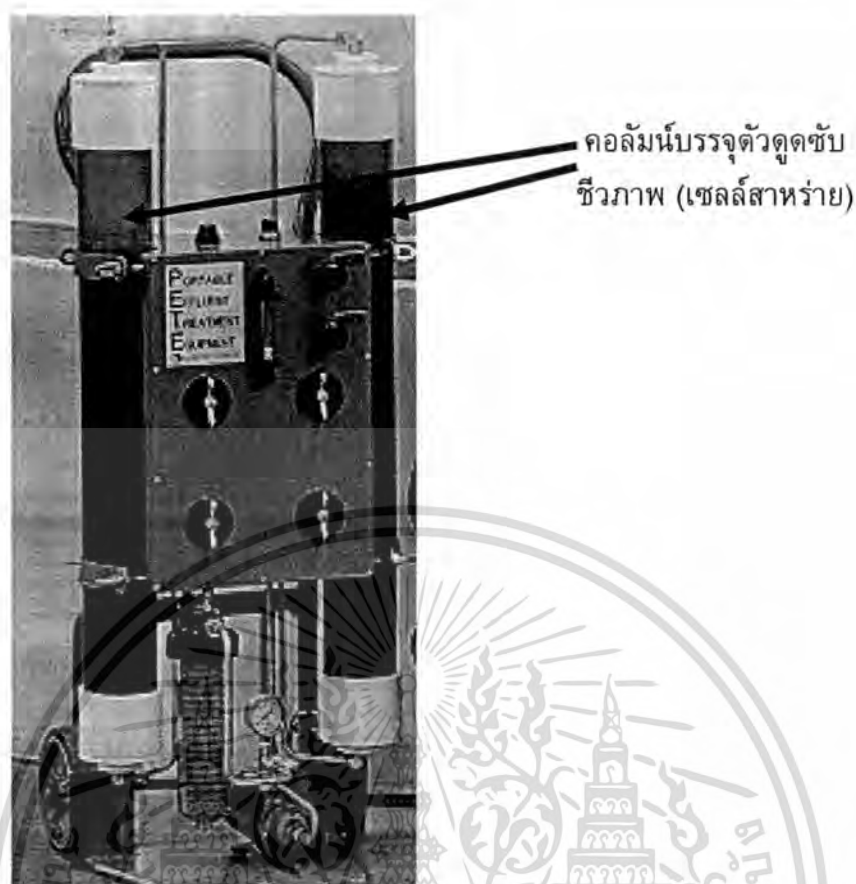
แต่ในกรณีของสาหร่ายบางชนิดที่เป็นอาหารมนุษย์ได้ หากน้ำเสียจากฟาร์มสัตว์น้ำที่ทำการบำบัดมีความปลอดภัยไม่มีสารพิษปนเปื้อนสาหร่ายเหล่านั้นจะถูกจำหน่ายเป็นอาหารมนุษย์ โดยมีราคาจำหน่ายสาหร่ายบางชนิดเช่น *Ulva* sp. สด (สาหร่ายผักกาดทะเล) คุณภาพสำหรับเป็นอาหารมนุษย์ ราคา กิโลกรัมละ 60-70 บาท^[378] *Caulerpa* sp. สด คุณภาพสำหรับเป็นอาหารมนุษย์ ราคา กิโลกรัมละ 25 บาท

โดยรวมแล้วการใช้สาหร่ายดูดซับโลหะหนักมีข้อดีคือต้นทุนต่ำ สามารถนำโลหะหนักและสาหร่ายกลับมาใช้ใหม่ได้ เหมาะกับการบำบัดโลหะหนักที่อยู่ในสารละลาย ไม่ต้องผึ่งกลบลดสารอินทรีย์ได้ สำหรับข้อเสียคือการนำสาหร่ายจากธรรมชาติมาใช้ขึ้นกับฤดูกาล การกำจัดของเสียเกิดได้ช้า ไม่สามารถกำจัดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หากเป็นระบบบำบัดที่ต้องการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตจะไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารพิษปนเปื้อน หรือหากมีโลหะหนักเข้มข้นมากจะเป็นพิษ

2. การผลิตตัวดูดซับโลหะหนักที่ทำจากสาหร่ายในทางการค้า

ปัญหาของสาหร่ายคือสาหร่ายที่กำจัดโลหะหนักได้สูงมักเป็นสาหร่ายที่มีเซลล์ขนาดเล็กหรือถูกบดเป็นแผ่นเล็ก ๆ ซึ่งทำให้กำจัดออกจากระบบบำบัดได้ยาก จึงได้มีการแก้ไขปัญหาโดยการตรึงสาหร่ายไว้ในวัสดุบางประเภทที่เหมาะสม และได้มีการผลิตจำหน่ายในทางการค้า เช่นในช่วงปี ค.ศ. 1990 ได้มีการพัฒนาการใช้ตัวดูดซับชีวภาพที่ใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับขึ้นเป็นการค้าในนาม “Alga-SORBTM” ซึ่งประกอบด้วยเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Chlorella vulgaris* ที่ตายแล้วบรรจุในซิลิกาเจลพอลิเมอร์ เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Bio-Recovery Systems, Inc.^[59] แต่พบว่าไม่ได้รับความสนใจหรือเป็นที่ยอมรับมากนัก เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ยังขาดความเข้าใจถึงขั้นตอนการทำงานในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับที่ขายอยู่ และยังขาดการเลือกประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่เหมาะสม ในการทดลองใช้จริงในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานในพื้นที่ขนาดใหญ่^[91, 431, 653]

ลักษณะของ Alga-SORBTM มี 2 แบบคือ แบบที่เคลื่อนย้ายได้และแบบระบบขนาดใหญ่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยในแบบที่เคลื่อนย้ายได้ (ภาพที่ 4) จะประกอบด้วยคอลัมน์สองคอลัมน์ที่ทำหน้าที่ในการกำจัดโลหะหนัก โดยแต่ละคอลัมน์บรรจุสาหร่ายประมาณ 0.25 คิวบิกฟุต (ประมาณ 28.31 ลิตร) ซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่อัตราการไหลของน้ำ 1 แกลลอนต่อนาที ส่วนระบบขนาดใหญ่จะบำบัดน้ำเสียได้ที่อัตราการไหล 100 แกลลอนต่อนาที^[202]



คอลัมน์บรรจุตัวดูดซับ
ชีวภาพ (เซลล์สาหร่าย)

ภาพที่ 4 ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสีย "Alga-SORB™" แบบที่เคลื่อนย้ายได้
ที่มา : <http://clu-in.org> ^[202]

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในส่วนของบริษัท BV SORBEX, Inc. โดยได้พัฒนาตัวดูดซับทางชีวภาพที่มีเฉพาะเจาะจงกับชนิดของโลหะหนักและสามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเลือกใช้ตัวดูดซับหลายชนิดที่แตกต่างกันเช่นสาหร่ายชนิด *Sargassum natans*, *Ascophyllum nodosum*, *Halimeda opuntia*, *Palmyra pamada*, *Chondrus crispus* และ *Chlorella vulgaris* ^[671]

และตัวดูดซับทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ ที่มีการผลิตขายเป็นการค้าเช่น AMT-BIOCLAIM ซึ่งใช้ชีวมวลของแบคทีเรียสกุล *Bacillus* ^[59, 657, 658]

Bio-Fix ใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพในลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งประกอบด้วยชีวมวลของสาหร่ายหลายชนิดตรึงไว้ในช่องว่างของเม็ด polypropylene ^[671] และยังมีผลิตภัณฑ์ในชื่อทางการค้าอื่น ๆ เช่น MetaGeneR และ RAHCO Bio-Beads ^[33, 150] เป็นต้น

ในระบบการทำงานของตัวดูดซับทางการค้าทั้งหมดที่กล่าวมานั้นใช้ขบวนการทำงานโดยการดูดซับชั้นพื้นฐาน คือใช้ตำแหน่งยึดจับที่เซลล์ตัวดูดซับจับกับโลหะหนัก โดยใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพบรรจุในคอลัมน์ (packed bed) และให้สัมผัสกับสารละลายที่ไหลลงทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งเป็นระบบที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้สูง ^[659] นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 11 ตัวดูดซับชีวภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับ และนำกลับมาใช้ใหม่

DESORPTION AND RECOVERY OF HEAVY METALS FROM LOADED BIOMASS

ในวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนักนั้น การทำให้เซลล์สาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วสามารถนำกลับมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้ใหม่เป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะสามารถทำให้ลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักได้ และยังเป็นการนำโลหะที่ถูกล้างออกจากเซลล์กลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย ซึ่งการที่จะทำให้เซลล์สาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักไว้เต็มแล้วกลับมาดูดซับโลหะหนักได้ใหม่ สิ่งที่ต้องทำคือการล้างโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์สาหร่ายออก จากนั้นเซลล์สาหร่ายก็สามารถนำไปดูดซับโลหะหนักได้ใหม่อีกหลายครั้ง^[661, 700] ซึ่งการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายที่ทำการดูดซับโลหะหนัก จะมีคำศัพท์ที่มีความหมายใกล้เคียงกันและมีความเกี่ยวข้องกัน ที่ต้องทำความเข้าใจก่อนคือ

- desorption หมายถึง การปล่อยออก หรือการทำให้ตัวดูดซับปล่อยสารที่ดูดซับไว้ออกไป ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงการที่โลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักไว้นั้นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่จะทำให้โลหะหนักที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้

- regeneration หมายถึง การทำให้เซลล์สาหร่ายหรือตัวดูดซับ ที่ไม่สามารถดูดซับโลหะหนักเพิ่มได้อีก เพราะตำแหน่งยึดจับบนผิวเซลล์สาหร่ายจับกับไอออนของโลหะหนักเต็มหมดแล้ว กลับมาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักใหม่ได้อีก^[333]

- recovery หมายถึง การนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงการนำโลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่บนเซลล์สาหร่ายกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการล้าง ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของการล้าง (desorption efficiency) โลหะหนักจากเซลล์สาหร่าย หากล้างได้มาก ปริมาณโลหะหนักที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่จะมีปริมาณสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการเลือกใช้ชนิดของตัวดูดซับมาดูดซับโลหะหนักนั้น ต้องคำนึงถึงขบวนการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับนั้นด้วย โดยควรต้องมีเกณฑ์ผลลัพธ์ในการล้างคือ 1) ต้องสามารถล้างโลหะหนักออกมาจากตัวดูดซับได้มาก 2) ตัวดูดซับที่ถูกล้างเพื่อนำโลหะหนักออกนั้นไม่ถูกทำลายทั้งสภาพทางกายภาพและสภาพทางเคมี และ 3) ตัวดูดซับที่ถูกล้างนำโลหะหนักออกแล้ว เมื่อนำกลับไปดูดซับโลหะหนักใหม่นั้นต้องมีประสิทธิภาพการดูดซับไม่ลดลงไปจากเดิม

ซึ่งจากเกณฑ์ดังกล่าว พบว่าการเลือกใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนักนั้นมีข้อดีตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดหลายประการด้วยกัน เช่น โลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยสาหร่ายนั้นสามารถล้างออกมาจากสาหร่ายได้ วิธีการนำโลหะหนักจากเซลล์สาหร่ายกลับมาใช้ใหม่นั้นทำได้ง่าย และสาหร่ายที่ล้างโลหะหนักออกจากเซลล์แล้วยังคงมีประสิทธิภาพสูงเมื่อนำกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่^[21, 658]

การล้างตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่

ปกติสาหร่าย (ตัวดูดซับ) ที่ผ่านการใช้งานในการดูดซับโลหะหนักและมีโลหะหนักเกาะอยู่ที่เซลล์จะต้องถูกกำจัดไปโดยการเผาด้วยความร้อนสูง (incineration)^[63] หรือการนำไปฝังกลบ แต่วิธีที่พบว่ามีคามนิยมมากที่สุดคือนำสาหร่ายนั้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเมื่อพิจารณาในขั้นตอนการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย โดยรวมคือจะประกอบด้วยขั้นตอนการดูดซับ (biosorption/ sorption) และการล้างโลหะหนักจากสาหร่าย (desorption) ซึ่งขบวนการดูดซับและการล้างจะทำหน้าที่ในการลดปริมาณของน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน จากน้ำเสียที่มีปริมาณมากจะถูกผันกลับมาเป็นโลหะหนักในรูปของแข็งในปริมาตรสารละลายเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้สามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น^[463, 517]

สำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่นั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งสาหร่าย และโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้บนสาหร่าย โดยต้องทำการล้างโลหะหนักออกมาจากสาหร่ายก่อน จากนั้นทั้งโลหะหนักที่ถูกล้างออกมาจากสาหร่าย และเซลล์สาหร่ายก็สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักที่ถูกล้างออกมาจากตัวดูดซับจะมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นเดิมจากน้ำเสียไม่ต่ำกว่า 100 เท่า ดังนั้นการดูดซับและการล้างถือเป็นการรวบรวมให้โลหะหนักเข้มข้นมากขึ้นด้วยนั่นเอง^[43, 75, 96, 435, 619]

ดังนั้นการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายหลังดูดซับโลหะหนักแล้ว จะได้สารละลายที่มีโลหะหนักเข้มข้นสูง ซึ่งการล้างมีการทำงานคล้ายขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือใช้พื้นฐานทฤษฎีการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับด้วยสารละลายที่เหมาะสม ในปริมาตรต่ำ

สารละลายโลหะหนักนี้หลังจากล้างมาจากตัวดูดซับแล้วสามารถนำกลับไปกำจัดด้วยวิธีตกตะกอนหรือแลกเปลี่ยนไอออนก็ได้ ซึ่งถ้าใช้วิธีตกตะกอนจะมีข้อเสียคือสามารถสร้างสลัดจ์ (sludge) ที่เป็นพิษ ถ้าใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออน จะทำให้น้ำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ (sludge หมายถึงของเหลวที่มีลักษณะคล้ายโคลนหรือเลน)^[196]

การเลือกชนิดสารห่วยในการดูดซับโลหะหนัก และชนิดสารละลายในการล้างโลหะหนักจากสารห่วย มีข้อควรคำนึงถึงคือต้องพิจารณาความสามารถในการเลือกจับชนิดโลหะหนักที่เฉพาะเจาะจงได้ (selectivity) โดยต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเลือกจับโลหะหนักในทุกขั้นตอนของกระบวนการในการดูดซับทั้งหมด เริ่มตั้งแต่พิจารณาว่าสารห่วยมีความสามารถในการเลือกจับโลหะหนักชนิดที่เฉพาะเจาะจงจากน้ำเสียได้หรือไม่ และพิจารณาว่าสารละลายที่จะนำมาใช้ล้างโลหะหนักออกจากสารห่วยนั้น สามารถเลือกชนิดของโลหะหนักที่จะทำการล้างออกจากสารห่วยได้อย่างเฉพาะเจาะจง คือเลือกล้างเฉพาะชนิดโลหะหนักที่สนใจได้หรือไม่ เพราะส่วนใหญ่โลหะหนักชนิดที่สนใจหรือต้องการนำกลับมาใช้ประโยชน์มักปนอยู่กับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ดังนั้นหากพิจารณาความสามารถในการเลือกชนิดโลหะหนักของระบบจะพิจารณาทั้งการเลือกดูดซับของสารห่วยและการล้างออกจากตัวสารห่วย

อย่างไรก็ตามในบางครั้งไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงว่าสารห่วยจะเลือกจับโลหะหนักชนิดใด แต่ความสามารถในการจับโลหะหนักทั้งหมดออกจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเรื่องที่สำคัญกว่า และการเลือกแยกชนิดโลหะหนักออกจากเซลล์สารห่วย อาจนำมาพิจารณาแยกในขั้นตอนการล้างโลหะหนักจากสารห่วยแทนก็ได้ โดยการเลือกใช้สารละลายในการล้างที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการล้างโลหะหนักเฉพาะชนิดที่ต้องการแยกหรือชนิดที่สนใจได้สูง

ปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสำเร็จของระบบเทคโนโลยีการดูดซับทางชีวภาพคือการที่สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยวัตถุประสงค์หลักของการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับคือต้องการล้างโลหะหนักให้มาอยู่ในสารละลายปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และการล้างต้องไม่ทำลายความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ได้หลายรอบ

การแสดงผลประสิทธิภาพของสารละลายที่ใช้ล้างโลหะหนัก มักแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลว (solid to liquid ratio, S/L) โดยของแข็งหมายถึงจำนวนของสารห่วยที่เป็นตัวดูดซับ (น้ำหนัก) ของเหลวหมายถึงปริมาณของสารละลายที่ใช้ล้างโลหะหนัก (น้ำหนัก, คิดเป็นหน่วยน้ำหนักเพื่อให้สอดคล้องกับหน่วยของสารห่วย) ถ้าค่า S/L มีค่าสูงแสดงว่าสารละลายที่ล้างโลหะหนักนั้นสามารถล้างโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์

โดยสมการที่ใช้ในการประมาณค่า S/L ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถล้างปริมาณโลหะหนักออกจากสารห่วยได้ตามปริมาณที่ต้องการหรือได้สมบูรณ์ คือ

$$\frac{S}{L} = \frac{HM}{q}$$

โดย

S/L คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสาหร่ายต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ล้างโลหะหนัก

HM คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกล้างออกจากสาหร่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ ไว้บนสาหร่ายก่อนทำการล้าง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

และการคำนวณอัตราส่วนการล้าง สามารถคำนวณได้โดยสมการ^[99]

อัตราส่วนการล้าง(%)=(ความเข้มข้นโลหะหนักที่ล้างออก/ความเข้มข้นโลหะหนักที่ดูดซับ)*100

โดยความเข้มข้นโลหะหนัก มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

และเมื่อทำการล้างและนำกลับมาใช้ใหม่หลาย ๆ รอบ จะมีการคำนวณประสิทธิภาพในการล้างที่ลดลง โดยสมการ

ประสิทธิภาพในการล้างที่ลดลง (%) = ค่าการล้างครั้งแรก (%) - ค่าการล้างครั้งสุดท้าย (%)

1. สารเคมีที่ใช้ในการล้างโลหะออกจากตัวดูดซับ

มีสารละลายหลายประเภทที่สามารถใช้ล้างโลหะหนักที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับได้ สารเคมีที่ใช้ในการล้างโลหะออกจากตัวดูดซับ (desorbing agent) เช่นกรดหรือเกลือของโลหะ (metal salt) ที่ให้ประจุบวก ซึ่งจะทำให้การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับได้โดยไปแย่งกับโลหะหนักจับกับตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ ดังนั้นก็จะผลัโลหะหนักออกจากตัวดูดซับ ซึ่งวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการล้างโลหะหนักได้สูง ก็ต่อเมื่อความแรงในการผลัโลหะหนักของสารที่ทำหน้าที่ล้าง มีความแข็งแรงมาก สามารถผลัโลหะหนักออกจากตำแหน่งยึดจับบนผิวสาหร่ายไปได้ สารละลายในการล้างที่เหมาะสม เช่นสารละลายที่มีพีเอชต่ำหรือสูง สารละลายเกลือที่ทำงานโดยลดการจับตัวของโลหะหนักกับสาหร่าย

การล้างโลหะหนักจากเซลล์สาหร่ายอีกวิธีหนึ่งคือการใช้ลิแกนด์ที่จะไปจับกับโลหะหนักที่อยู่ในสารละลาย โดยลิแกนด์นี้จะทำให้โลหะหนักที่เป็นอิสระหรือเป็นรูปไอออนในสารละลายมีปริมาณลดลง โดยวิธีนี้พอสารละลายภายนอกมีปริมาณโลหะหนักลดลง จะทำให้โลหะหนักที่ถูกจับอยู่บนตัวดูดซับ ถูกปล่อยออกมาในสารละลาย

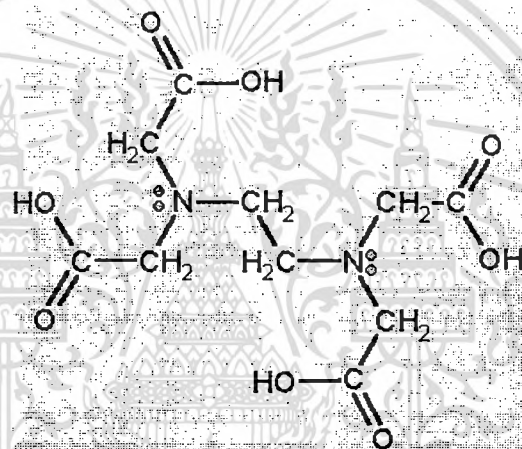
สารเคมีที่ใช้ในการล้างโลหะหนักจากสาหร่าย มีทั้งกลุ่มที่เป็นกรด เช่น acetic acid, formic acid, hydrochloric acid, sulphuric acid, nitric acid กลุ่มที่เป็นด่าง เช่น sodium hydroxide, sodium bicarbonate, sodium carbonate, potassium hydroxide, potassium carbonate กลุ่มที่เป็นรูปเกลือของโลหะ เช่น ammonium nitrate, ammonium sulphate,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

calcium chloride, potassium nitrate, potassium chloride, trisodium citrate dihydrate, sodium chloride เป็นต้น^[587]

อีดีทีเอ EDTA (ethylene diamine tetra-acetic acid) เป็นสารชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการล้างโลหะหนักออกจากสารละลายหลังการดูดซับ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวหรือเกาะตัวกันของไอออนโลหะ เรียกว่า chelating agent หรือ สารคีเลต ซึ่งเป็นสารที่รวมตัวกับโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เป็นสารประกอบที่มีจุดยึดไอออนของโลหะสองหรือมากกว่าสองจุด^[725]

โมเลกุลของอีดีทีเอประกอบด้วยไอออนของกรด ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิกแอซิด (-COOH) สี่หมู่ และหมู่เอมีน (-NH₂) สองหมู่ ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนคู่หนึ่งของอะตอมซึ่งไม่ได้มีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (lone pair electron) เป็นองค์ประกอบ^[600] ซึ่งทั้งคาร์บอกซิลิกแอซิดและหมู่เอมีนนี้จะทำหน้าที่ในการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 โมเลกุลของ EDTA (ethylene diamine tetra-acetic acid)

ที่มา : Sinex (2004)^[600]

โดย EDTA จะล้างโลหะหนักออกจากสารละลายได้มีประสิทธิภาพสูงเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมหรือปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัว (stability constant, K) ของการจับระหว่าง EDTA กับโลหะหนักด้วยเช่นกัน ปัจจัยหลักอีกอย่างหนึ่งคือระดับพีเอชของสารละลาย โดย EDTA จะสามารถทำงานได้เต็มที่ ที่พีเอชประมาณ 10-11 โดยจะทำให้มีค่าความคงตัวระหว่าง EDTA กับโลหะสูง (เป็นระดับพีเอชที่หมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่จับโลหะหนักทุกหมู่สามารถแตกตัวและอยู่ในรูปประจุลบได้เต็มที่ทั้งหมด)^[600] โดยค่าคงที่ของความคงตัวของ EDTA กับโลหะหากมีค่าสูง จะยังสามารถล้างโลหะหนักนั้นออกมาจากตัวดูดซับได้ดี เช่นพบว่า EDTA มีความสามารถในการจับไอออนของตะกั่วได้อย่างแข็งแกร่งมาก โดยมีค่าคงที่ในการจับตัวกับตะกั่วสูงถึง 1.1×10^{18} ^[600] โดยค่าคงที่ความคงตัวที่สูงนี้แสดงว่า EDTA สามารถจับหรือล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับได้ดี ซึ่งค่าคงที่ของความคงตัวของ EDTA กับโลหะชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ความคงตัวของกาเกิดคอมเพล็กซ์ระหว่าง EDTA กับประจุบวกของธาตุต่าง ๆ

ประจุบวก	ค่าคงที่ความคงตัว (K)
K ⁺	6.31
Na ⁺	45.7
Li ⁺	6.17x10 ²
Tl ⁺	3.5x10 ⁶
Ra ²⁺	1.3x10 ⁷
Ag ⁺	2.1x10 ⁷
Ba ²⁺	5.8x10 ⁷
Sr ²⁺	4.3x10 ⁸
Mg ²⁺	4.9x10 ⁸
Be ²⁺	1.6x10 ⁹
Ca ²⁺	5.0x10 ¹⁰
V ²⁺	5.0x10 ¹²
Cr ²⁺	4.0x10 ¹³
Mn ²⁺	6.2x10 ¹³
Fe ²⁺	2.1x10 ¹⁴
La ⁺	3.2x10 ¹⁵
VO ₂ ⁺	3.5x10 ¹⁵
Ce ³⁺	9.5x10 ¹⁵
Al ³⁺	1.3x10 ¹⁶
Co ²⁺	2.0x10 ¹⁶
Cd ²⁺	2.9x10 ¹⁶
Zn ²⁺	3.2x10 ¹⁶
Gd ³⁺	2.3x10 ¹⁷
Pb ²⁺	1.1x10 ¹⁸
Y ³⁺	1.2x10 ¹⁸
Sn ²⁺	2.0x10 ¹⁸
Pd ²⁺	3.2x10 ¹⁸
Ni ²⁺	4.2x10 ¹⁸
Cu ²⁺	6.3x10 ¹⁸
Hg ²⁺	6.3x10 ²¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประจุบวก	ค่าคงที่ความคงตัว (K)
Th ⁴⁺	1.6x10 ²³
Fe ³⁺	1.3x10 ²⁵
V ³⁺	7.9x10 ²⁵
Co ³⁺	2.5x10 ⁴¹

ที่มา : <http://pharmacy.kku.ac.th>^[244]

ดังนั้นเกณฑ์ในการเลือกสารที่ใช้ล้างโลหะหนักจากตัวดูดซับ มีเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาคือ มีความสามารถสูงในการล้างโลหะออกจากตัวดูดซับ โดยควรจะมีประสิทธิภาพในการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับได้ไม่ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ควรล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และควรมีความสามารถในการเลือกล้างโลหะหนักได้ ไม่ควรทำลายโครงสร้างของตัวดูดซับ และตัวดูดซับที่ถูกล้างยังคงกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพดีในการนำไปใช้ครั้งต่อไป ควรมีราคาถูก และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

แต่ยังมีเกณฑ์บางเกณฑ์ที่ยังขัดแย้งกันเอง เช่นถ้าใช้ปริมาณของสารละลายที่ทำหน้าที่ล้างในปริมาณน้อยก็จะทำให้โลหะหนักที่ถูกล้างออกมาเข้มข้นมากขึ้นตามความต้องการได้ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพในการล้างออกมาต่ำ เพราะที่ใช้ปริมาณสารละลายในการล้างน้อยนั่นเอง นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่แล้วกรดที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1-1 โมล จะมีประสิทธิภาพในการล้างได้ดี ราคาถูก โดยหากใช้ความเข้มข้นของสารที่ทำหน้าที่ล้างสูง ก็จะสามารถล้างโลหะหนักออกมาได้ดี แต่จะมีผลทำให้พีเอชสูง และพีเอชจะเป็นอันตรายต่อตัวดูดซับได้ และสารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงจะทำลายตัวดูดซับได้เช่นกัน

2. การล้างโลหะหนักออกจากสารร่ายในระบบที่ตรึงสารร่ายไว้ในคอลัมน์

โดยจากคุณสมบัติที่สารร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักได้ และสามารถล้างโลหะหนักออกจากสารร่าย จากนั้นนำสารร่ายกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่ได้ โดยโลหะหนักที่ถูกล้างออกมาอยู่ในสารละลายปริมาณน้อยและเข้มข้นสูง ซึ่งสารละลายที่ปริมาณน้อยนี้สามารถนำไปกำจัดโลหะหนักออกได้โดยวิธีตกตะกอนหรือการใช้ electrowinning ซึ่งคือการแยกโลหะหนักด้วยวิธีทางไฟฟ้า จึงได้มีการออกแบบระบบการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารร่ายแบบคอลัมน์ขึ้นมา (packed bed column) (ภาพที่ 2) ซึ่งภาพที่ 2 แสดงวงจรการดูดซับและการล้างโลหะหนัก โดยมีวัตถุประสงค์ให้น้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่มีสารร่ายบรรจุอยู่ออกมาจากคอลัมน์โดยไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน โดยเริ่มจากน้ำเสียที่ผ่าน electrowinning และมีโลหะหนักปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ไม่สูงมากไหลเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับ (adsorption) และโลหะหนักถูกดูดซับไว้โดยสาหร่ายจนหมด น้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์จึงไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน และเมื่อสาหร่ายในคอลัมน์ดูดซับโลหะหนักจนเต็ม (metal laden biosorbent) ไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มอีก จะทำการล้างโลหะหนักจากสาหร่าย (desorption) โดยใส่สารละลายในการล้าง (เช่นกรด) ลงไปเพียงเล็กน้อย น้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์จึงเป็นสารละลายที่มีโลหะหนักเข้มข้นสูง และสารละลายนี้จะนำไปผ่าน electrowinning เพื่อแยกโลหะหนักออกเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์ ซึ่งพบว่าในระบบ packed bed column สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับ (adsorption) และทำการล้างโลหะจากตัวดูดซับได้ (desorption)

การล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายในระบบที่ตรึงสาหร่ายไว้ในคอลัมน์ (fixed-bed column) โดยการใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Sargassum fluitans* ตรึงไว้ในคอลัมน์ เพื่อดูดซับยูเรเนียม พบว่าสามารถใช้ HCl 0.1 นอร์มัล ล้างยูเรเนียมออกจากสาหร่ายได้ถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์ ของยูเรเนียมที่ถูกดูดซับอยู่บนสาหร่ายทั้งหมด และคอลัมน์นี้สามารถใช้งานได้นานถึง 1 เดือน โดยมีการล้างโลหะหนักออกและนำกลับมาใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่ทั้งหมด 5 รอบ โดยพบว่าหลังการล้างครั้งแรกสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลง 7 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากการล้าง 5 ครั้ง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับสาหร่ายที่ทำการดูดซับเป็นครั้งแรก ซึ่งสำหรับสาหร่ายชนิดนี้การที่ความสามารถในการดูดซับลดลงนั้นเนื่องมาจากการสูญเสียอัลจินेटของเซลล์สาหร่ายไปในช่วงการล้างโลหะหนัก และจากการคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ถูกล้างออกกับความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ไหลเข้า เพื่อหาค่าจำนวนครั้งในการล้างและการนำสาหร่ายกลับมาดูดซับโลหะหนักใหม่ พบว่าจะล้างและนำสาหร่ายกลับมาใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่ได้ประมาณ 25 รอบ ซึ่งค่าจำนวนครั้งที่สูงนี้จะทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถลดปริมาณของของเสียที่ผลิตขึ้น หรือลดปริมาณสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักลง ทำให้ลดต้นทุนได้นั่นเอง^[703]

การใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Sargassum kjellmanianum* ดูดซับทองแดงโดยใช้สาหร่ายบรรจุไว้ในคอลัมน์ จากนั้นล้างทองแดงออกจากสาหร่าย พบว่าสารละลาย HCl เข้มข้น 0.11 นอร์มัล และ EDTA 0.10 นอร์มัล สามารถล้างทองแดงออกจากสาหร่ายได้ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และ HCl สามารถล้างทองแดงได้ดีกว่า EDTA^[709]



ภาพที่ 2 ลักษณะการออกแบบระบบการดูดซับแบบ packed bed column สำหรับการดูดซับและการล้างโลหะหนักจากตัวดูดซับ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000) ^[587]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายที่มีชีวิต

หากเป็นระบบการเลี้ยงสาหร่ายที่มีชีวิตในบ่อบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ดูดซับโลหะหนัก เมื่อต้องการนำโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์สาหร่ายเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ จะต้องเลือกใช้วิธีที่ไม่ทำลายเซลล์สาหร่าย และหลังจากล้างโลหะหนักแล้ว โลหะหนักที่ถูกล้างออกไปจะต้องอยู่ในสารละลายที่มีปริมาณน้อย หรืออยู่ในรูปของแข็งที่ตกตะกอน เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่หรือนำไปทิ้ง โดยส่วนใหญ่พบว่าสารเคมีสำหรับใช้ล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายที่มีชีวิต ที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมคือสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน เพราะไม่ต้องการให้เซลล์สาหร่ายถูกทำลาย แต่หากเป็นสาหร่ายที่ไม่มีชีวิตสามารถใช้สารเคมีที่มีความรุนแรงมากกว่าสาหร่ายที่มีชีวิตได้ เพราะไม่ต้องกังวลถึงการที่สารเคมีจะไปทำให้เซลล์ตาย

4. ตัวอย่างวิธีการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่าย

ได้มีการทดลองใช้สารเคมีหลายประเภทในการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายที่ถูกดูดซับโลหะหนัก และพบว่าสารเคมีหลายชนิดมีประสิทธิภาพสูงในการล้างโลหะหนัก เช่น

การใช้ไบคาร์บอเนตล้างยูเรเนียมออกจากสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* พบว่าสารนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการนำยูเรเนียมออกจากผิวเซลล์สาหร่าย หรือหากไม่ใช้สารเคมีในการล้างอาจใช้การปรับพีเอช เช่นในสภาวะปกติยูเรเนียมจะจับกับสาหร่ายนี้ที่พีเอช 4-6 ดังนั้นเมื่อปรับพีเอชให้มีค่าสูงกว่า 8 จะพบว่ายูเรเนียมจะไม่จับกับสาหร่ายแต่จะตกตะกอน และนอกจากนี้ยังพบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 2 อะลูมิเนียมและโครเมียมจะไม่จับกับสาหร่าย *C. vulgaris* จึงสามารถปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีพีเอชระดับนี้เพื่อล้างโลหะหนักเหล่านี้ออกจากสาหร่ายได้

และการล้างโลหะหนักในระดับพีเอชที่สูงเช่น การเติมสาร mercaptoethanol ลงในสารละลายที่พีเอช 9 หรือสูงกว่า จะทำให้ซิลเวอร์ถูกล้างออกจากสาหร่ายสีเขียว *Chlorella pyrenoidosa*, *C. vulgaris* และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina platensis* ได้^[43]

จากการเปรียบเทียบสารที่ทำหน้าที่ล้างโคบอลต์ออกจากเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Oscillatoria* โดยเปรียบเทียบตัวล้างหลายชนิด พบว่า EDTA มีประสิทธิภาพในการล้างได้มากที่สุด ซึ่งแสดงได้ถึง การล้างโลหะออกจากผิวเซลล์สาหร่ายด้วยวิธีการเคมีกายภาพ (physicochemical) ส่วน HCl และบัฟเฟอร์ (citrate buffer) ที่มีค่าพีเอช 3 ไม่สามารถล้างโคบอลต์ได้มากเท่าที่ดีที่เอ^[10] (ตารางที่ 2)

ระยะเวลาในการล้างหรือระยะเวลาที่ให้สารเคมีที่ทำหน้าที่ล้างโลหะหนักสัมผัสกับสาหร่ายมากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะสามารถล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพของสารแต่ละชนิดด้วย เช่น CaCl_2 ซึ่งพบว่าแม้เวลาในการสัมผัสกับสาหร่ายเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการล้างโลหะหนักไม่เพิ่มขึ้น โดยการใช้ CaCl_2 ในการล้างที่ระยะเวลา 60 และ 90 นาที ให้ค่าการล้างโคบอลต์ไม่ต่างกันคือ 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 60 นาที เป็นเวลาที่เพียงพอแล้วสำหรับการล้างโคบอลต์โดยใช้สาร CaCl_2 และสารชนิดนี้สามารถทำงานได้เต็มที่เพียงระดับนั้น แม้เพิ่มเวลาขึ้นประสิทธิภาพในการล้างก็ไม่เพิ่มตาม แต่ EDTA พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการล้างก็เพิ่มขึ้น โดยการใช้ EDTA ในการล้างที่เวลาในการสัมผัสกับสาหร่าย 30 นาที จะล้างโคบอลต์ได้เพียง 40.56 เปอร์เซ็นต์ แต่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 90 นาที จะล้างโคบอลต์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 66.28 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าสารนี้ยังทำงานได้ไม่เต็มที่ที่ระยะเวลาสั้น ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับสาหร่าย จะช่วยเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ถูกล้างออกจากสาหร่ายได้มากขึ้น ดังนั้นในการใช้สารที่ต่างชนิดกันในการล้างโลหะหนักจากเซลล์สาหร่าย จึงต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่เหมาะสมต่อสารชนิดนั้น ๆ ด้วย

ตารางที่ 2 การล้างโคบอลต์ออกจากสาหร่ายสกุล *Oscillatoria* โดยใช้สารในการล้างที่ต่างประเภทและระยะเวลาด่างกัน

สารละลายที่ใช้ล้าง	ความเข้มข้น	ปริมาณโคบอลต์ที่ล้างจากตัวดูดซับ (%)		
		30 นาที	60 นาที	90 นาที
EDTA (mM)	10.00	40.56	53.70	66.28
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (mM)	2.00	8.20	18.00	18.00
Na_2CO_3 (mM)	10.00	42.27	43.53	52.74
NaHCO_3 (mM)	10.00	20.76	21.22	22.61
HCl (N)	0.10	17.28	23.04	26.24
H_2SO_4 (N)	0.10	43.30	45.31	54.88
Citrate buffer (0.2M)	pH 5.0	8.26	11.56	9.25

ที่มา : Ahuja et al. (1999a)^[10]

สำหรับสาหร่ายสกุล *Oscillatoria* นั้นโดยปกติที่ระดับพีเอชต่ำในช่วง 2-4 สาหร่ายนี้ไม่สามารถดูดซับโคบอลต์ได้ นั้นหมายความว่า การล้างโคบอลต์ออกจากเซลล์สาหร่ายในกรณีนี้ไม่ใช่การใช้ประจุบวกที่ระดับพีเอชต่ำในการเข้าไปแทนที่ไอออนของโคบอลต์ แต่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งผลนี้เห็นได้ชัดเจนในการใช้อีดีทีเอและใช้ซัลเฟตไอออนในการล้างโคบอลต์ การใช้สารล้างโคบอลต์ที่มีค่าเป็นด่าง เช่น Na_2CO_3 และ NaHCO_3 สามารถล้างโคบอลต์ออกจากเซลล์ตัวดูดซับได้มากเช่นกัน (ตารางที่ 2)

ในสาหร่ายบางชนิดการใช้กรด HCl ในการล้างโลหะที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น พบว่าสามารถใช้ได้มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการใช้ HCl สามารถล้างโลหะหนักออกมาจากตัวดูดซับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใด 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่อย่างยั่งยืนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเกี่ยวข้องกับขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน^[75] เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำหรือในสารละลายที่มีกรด HCl อยู่ นั้น มีความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออน (H^+) อยู่ปริมาณมาก ซึ่ง H^+ นี้จะเข้าไปแทนที่โลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่บนเซลล์สาหร่ายด้วยขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ต้องพิจารณาชนิดสาหร่ายและชนิดโลหะหนักกว่าที่ระดับพีเอชนั้น สาหร่ายดูดซับโลหะหนักชนิดนั้นไว้ได้หรือไม่ จึงจะทำการใช้วิธีการล้างแบบนี้ได้

นอกจากนี้การใช้ HCl ในการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับ ยังอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถของกรดในการละลายหมู่ฟังก์ชันหรือองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบบนผิวเซลล์ของตัวดูดซับ ซึ่งหากค่าพีเอชของสารละลายเปลี่ยนไปจนทำให้หมู่ฟังก์ชันบางหมู่ของพอลิแซ็กคาไรด์ไม่สามารถแตกตัวให้ประจุลบได้ จะทำให้มีการปล่อยไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายกลับคืนสู่สารละลายที่ล้อมรอบ^[75] เช่นหมู่ฟังก์ชันบางหมู่ (เช่นเอมีน) แตกตัวให้ประจุลบที่พีเอชสูง เมื่อใส่กรด HCl ลงไปทำให้สารละลายมีค่าพีเอชลดลง หมู่เอมีนแตกตัวไม่ได้และกลับไปอยู่ในรูปไม่มีประจุ จึงปล่อยโลหะหนักที่จับเอาไว้ออกมา

จากการทดลองนี้หลังจากนำสาหร่ายสกุล *Oscillatoria* ไปดูดซับโลหะหนักจนได้เต็มที่ และนำสาหร่ายดังกล่าวมาล้างโลหะหนักออก พบว่าน้ำหนักของสาหร่ายจะลดลงจากค่าเริ่มต้นก่อนนำไปดูดซับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีส่วนประกอบของเซลล์สาหร่ายบางส่วนที่มีตำแหน่งยึดจับ สำหรับจับโลหะหนักนั้นถูกทำให้ละลายไปด้วย จึงทำให้เมื่อนำสาหร่ายนั้นกลับมาใช้ใหม่หลังจากมีการล้างโลหะหนักออกไปแล้วนั้น มีประสิทธิภาพต่ำลง และเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่หลาย ๆ รอบ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเรื่อย ๆ^[75]

จากการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ดูดซับตะกั่ว พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับตะกั่วไว้บนเซลล์ได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3) โดยสาหร่ายจะดูดซับตะกั่วได้ประมาณ 367.0-404.1 ไมโครกรัม และเมื่อใช้สาร EDTA ล้างตะกั่วออกจากเซลล์สาหร่าย โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคือน้ำ Milli-Q water (น้ำที่มีไอออนของแร่ธาตุต่าง ๆ ในปริมาณที่ต่ำ โดยมีค่าความต้านทานหรือค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 16-18 เมกะโอห์มต่อเซนติเมตร) โดยทำการล้างสาหร่ายทั้งหมด 3 ครั้ง โดยเปลี่ยนสารในการล้างใหม่ทุกครั้ง พบว่าในการล้างครั้งที่ 1 จะมีปริมาณตะกั่วถูกล้างออกมามากที่สุด และลดลงในครั้งที่ 2 และ 3 และเมื่อรวมปริมาณตะกั่วจากการล้างทั้งสามครั้งพบว่า EDTA สามารถล้างตะกั่วออกมาได้สูงกว่าน้ำ Milli-Q โดยสามารถล้างตะกั่วออกจากสาหร่ายได้ประมาณ 44-50 เปอร์เซ็นต์ ของตะกั่วที่ถูกดูดซับอยู่ทั้งหมด ส่วน Milli-Q จะล้างออกได้น้อยกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ ของตะกั่วที่ถูกดูดซับอยู่ทั้งหมด ซึ่งประมาณตะกั่วที่ไม่ถูกล้างออกมาบางส่วนอาจถูกนำเข้าสู่เซลล์สาหร่ายจึงไม่สามารถล้างออกมาได้ และบางส่วนอาจยังไม่สามารถล้างออกมาได้จากผิวเซลล์ ทั้งนี้เพราะในการทดลองนี้ใช้สารละลายที่ระดับพีเอช 4 ซึ่งเป็นระดับที่ EDTA ไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ ประสิทธิภาพในการล้างจึงไม่สูง และนอกจากนี้ระยะเวลาในการล้างอาจสั้นเกินไป (15 นาที) จึงยังไม่สามารถล้างตะกั่วออกจากสาหร่ายได้เต็มที่^[573]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 12 การล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 การใช้ EDTA (10mM) ล้างตะกั่วจากเซลล์ของสาหร่าย *Gloeocapsa gelatinosa* ที่ดูดซับตะกั่วไว้ที่ผิวเซลล์ (ค่าเฉลี่ย±ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

ระยะเวลาในการล้าง	ตะกั่วบนสาหร่าย (µg)	สารที่ใช้ในการล้างตะกั่ว	ปริมาณตะกั่วที่ล้างได้ (µg)			ตะกั่วที่ล้างได้รวม (µg)
			การล้างครั้งที่ 1	การล้างครั้งที่ 2	การล้างครั้งที่ 3	
60 นาที	367.0±6.2	EDTA	83.2±6.0	43.0±1.4	35.5±1.5	161.7±8.6
	369.0±0.3	Milli-Q	2.7±0.5	1.6±0.1	1.0±0.2	5.3±0.5
24 ชั่วโมง	404.1±6.0	EDTA	102.3±1.1	58.1±2.6	40.6±0.8	201.0±3.8
	401.6±0.7	Milli-Q	1.0±0.1	0.3±0.1	0.3±0.2	1.6±0.3

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

- โดยทั่วไปแล้วกลไกการดูดซับทางชีวภาพส่วนใหญ่เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นความแรงของไอออน (ionic strength) จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งหากสามารถทำนายปริมาณโลหะหนักที่จะถูกดูดซับหรือความแรงของไอออนที่จะเกี่ยวข้องกับการดูดซับและเข้าใจกระบวนการ biosorption ความรู้ทั้งหมดนี้จะทำให้สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดได้ ซึ่งรวมทั้งทำให้สามารถเลือกวิธี desorption ให้เหมาะสมกับกลไกที่เกี่ยวข้องได้ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่นหากทราบว่าโลหะที่จับบนตัวดูดซับนั้นจับอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกลุ่มของกรดจะทำให้ทราบได้ทันทีว่าโลหะนี้สามารถล้างออกจากตัวดูดซับได้ที่พีเอชต่ำ แต่ ณ ปัจจุบันกลไกการดูดซับโลหะหนักโดยสิ่งมีชีวิตก็ยังไม่สามารถทำความเข้าใจได้กระจ่างมากนัก เพราะว่าเป็นเรื่องยากที่จะทำความเข้าใจองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับชีวภาพทุกชนิดได้อย่างถ่องแท้ เนื่องจากตัวดูดซับทางชีวภาพมีลักษณะและประเภทเซลล์ที่แตกต่างกัน มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนสูง มีความแตกต่างของโมเลกุลที่แตกต่างกันซึ่งทำให้มีตำแหน่งยึดจับที่มีประเภทแตกต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้น แม้จะเป็นตำแหน่งยึดจับประเภทเดียวกันก็ยังสามารถมีกลไกการจับที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นหมู่คาร์บอกซิล สามารถจับโลหะได้ทั้งการเกิดสารเชิงซ้อน หรือการแลกเปลี่ยนประจุกับประจุบวกก็ได้

กลไกการคายตัวดูดซับที่เป็นแก๊ส^[214, 288]

สำหรับตัวดูดซับประเภทแก๊สเมื่อถูกดูดซับโดยตัวดูดซับที่เป็นของแข็งจะมีการคายหรือ desorption เช่นกัน (สำหรับคำว่า desorption ในหัวข้อนี้จะใช้คำว่า “คาย” ไม่ใช่คำว่า “ล้าง” เพราะเป็นการปล่อยตัวดูดซับออกโดยไม่ต้องใช้สารใด ๆ มาทำการล้าง) ซึ่งการศึกษา กลไกการคาย (desorption kinetics) แก๊สของตัวดูดซับ จะสามารถทำให้ทำความเข้าใจและนำ ข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับการศึกษากลไกการล้างโลหะหนักออกจากตัวดูดซับได้เพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปเมื่อตัวดูดซับถูกจับไว้บนผิวของตัวดูดซับจะมีการคายหรือการนำตัวดูดซับนี้ออกจากตัวดูดซับ ซึ่งสามารถทำความเข้าใจถึงกลไกการคายจากตัวดูดซับได้ดังนี้

อัตราของการคายตัวดูดซับ (rate of desorption - R_{des}) ออกจากผิวของตัวดูดซับ สามารถแสดงในรูปสมการได้คือ

$$R_{des} = kN^x$$

โดย

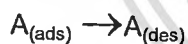
x คือ อันดับของการล้างหรือการคาย (kinetic order of desorption)

k คือ ค่าคงที่ของขบวนการคาย (rate constant for the desorption process)

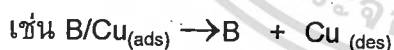
N คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับ ที่อยู่บนผิวเซลล์ตัวดูดซับ

โดยอันดับของการคายสามารถทำนายได้ เพราะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนของปฏิกิริยา คือ

1. การคายอะตอมหรือการคายโมเลกุลอย่างง่าย (atomic or simple molecular desorption)

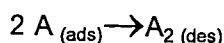


จะเป็นขบวนการล้างอันดับหนึ่ง ($x = 1$)

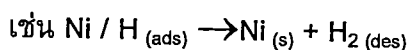


การล้างอะตอมของ Cu ออกจากผิวตัวดูดซับ B

2. การคายแล้วรวมเป็นโมเลกุล (recombinative molecular desorption)



จะเป็นขบวนการล้างอันดับสอง ($x = 2$)



การล้างอะตอมของ H ออกมาในรูป H_2 จากผิวของ Ni

ค่าคงที่ของการคายสามารถแสดงในรูปของ Arrhenius

$$k_{\text{des}} = A \exp (-E_a^{\text{des}} / RT)$$

โดย

E_a^{des} คือ พลังงานในการกระตุ้นการคาย

$A \exp$ คือ ความพยายามในการเอาชนะแรงยึดเกาะเพื่อให้สามารถคายตัวถูก
ดูดซับออกมาได้ (V - attempt frequency)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส 8.314 จูลต่อโมล เคลวิน

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

ดังนั้นสมการอัตราเร็วของการคาย R_{des} โดยทั่วไปคือ

$$R_{\text{des}} = V \cdot N^x \cdot \exp (-E_a^{\text{des}} / RT)$$

ซึ่งในกรณีของการดูดซับโมเลกุลแบบง่าย ๆ ค่า $A \exp$ (pre-exponential/ frequency factor - V) จะเท่ากับค่าของการสั่นของพันธะระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ เพราะทุกครั้งที่ความยาวพันธะยืดออกระหว่างการสั่น นั่นคือความพยายามในการทำให้พันธะนั้นแตกออก หรือความพยายามในการคายนั่นเอง

บทที่ 13 การกำจัดของเสียอันตราย

และตัวดูดซับโลหะหนัก

HAZARDOUS WASTES AND

BIOSORBENT DISPOSAL

ของเสียอันตราย

ปัญหาเรื่องกากของเสียอันตรายหรือขยะที่มีพิษ (hazardous waste) เป็นปัญหาที่มีความรุนแรง เพราะไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิต หรือการกำจัดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการกำจัดของเสียแล้วล้วนแต่ก่อให้เกิดกากของเสียทั้งสิ้น ซึ่งกากของเสียเหล่านี้มีความเข้มข้นของสารมลพิษค่อนข้างสูง ซึ่งวิธีที่ดีที่สุดคือต้องจัดการกระบวนการผลิตให้มีของเสียอันตรายเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยปกติได้มีคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการจัดการเรื่องปัญหาของเสียอันตรายสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ซึ่งหากสามารถปฏิบัติตามแนวทางดังกล่าวได้ ของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยมาก และไม่ก่อให้เกิดปัญหาที่รุนแรงตามมา

แนวทางในการจัดการปัญหากากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น เน้นที่การควบคุมและป้องกันที่แหล่งกำเนิด ซึ่งจะต้องประกอบด้วยมาตรการที่สำคัญดังนี้^{193, 94, 291}

- ในกระบวนการผลิตจะต้องหลีกเลี่ยงการก่อให้เกิดกากของเสีย หรือก่อให้เกิดกากของเสียในปริมาณน้อยที่สุด
- การนำกากของเสียอันตรายกลับมาใช้ใหม่
- การเก็บกักกากของเสียอันตราย ณ แหล่งกำเนิด (inhouse storage) โดยจะต้องพิจารณาถึงความถูกต้องตามหลักวิชาการอย่างเคร่งครัดและต้องคำนึงถึงขนาดของภาชนะรองรับ สถานที่ตั้ง วิธีการเก็บรวบรวมและการตรวจสอบการรั่วซึม เป็นต้น
- การเก็บรวบรวมและขนส่งจากสถานที่ตั้งไปยังสถานที่บำบัด หรือกำจัดกากของเสียในขั้นตอนสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 13 การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนัก เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การบำบัดกากของเสียอันตรายและการนำกากของเสียอันตรายมาใช้ประโยชน์ใหม่ (treatment recycling) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เนื่องจากช่วยลดปริมาณสารพิษ และเปลี่ยนสารพิษ ให้เป็นสารไม่มีพิษก่อนนำไปกำจัดขั้นสุดท้าย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วิธี ทำลายฤทธิ์ด้วยวิธีเคมีและกายภาพทำให้หมดฤทธิ์ที่จะก่อปฏิกิริยา หลังจากนั้นจึง เปลี่ยนสภาพเป็นตะกอนคงรูปที่ไม่ละลายน้ำก่อนนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักวิชาการ
- การกำจัดสุดท้าย วิธีที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ การฝังกลบอย่างถูกหลักความปลอดภัย (secured land fill) การนำไปทิ้งลงทะเล (dumping at sea) และการอัดฉีดลงใต้ดิน (well injection) เป็นต้น
- การวางแผนปฏิบัติการ คือการนำมาตรการทางเทคนิคทุกขั้นตอนมาผสมผสานกันในส่วนที่เหมาะสม สามารถปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ต้องครอบคลุม มาตรการทางกฎหมาย เช่นพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ.2535 เป็นต้น

ในการเลือกวิธีการจัดการกากของเสียที่เหมาะสมจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทกากของเสียก่อนว่าเข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายหรือไม่ หากพบว่ากากของเสีย นั้น ๆ เป็นกากของเสียอันตรายก็จำเป็นต้องนำกากของเสียเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการลด ความเป็นพิษลงก่อน จากนั้นจึงนำไปบำบัดขั้นสุดท้ายเพื่อป้องกันการละลายหรือลดการ เคลื่อนที่ของสารเคมีที่เป็นของเสียอันตรายที่จะปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม หรือการทำปฏิกิริยา ของกากของเสียกับสิ่งแวดล้อม^[268] ซึ่งโดยทั่วไปวิธีจัดการกับกากของเสียหรือขยะพิษ ได้แก่ การเผาด้วยความร้อนสูง การฝังกลบ การทิ้งลงทะเล และการทำให้เป็นก้อนแข็งหรือการ บรรจุในกล่องคอนกรีต

เกณฑ์ของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในของเสียได้กำหนดไว้ในตารางที่ 1 โดยหากของเสียมี ปริมาณโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามตารางที่ 1 ของเสียนั้นจะถูกจัด ว่าเป็นของเสียอันตราย เช่นของเสียหากมีปริมาณตะกั่วเกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะจัดว่าของ เสียเป็นของเสียอันตราย

สำหรับประเทศไทย กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับ ลักษณะสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 โดยกำหนดสมบัติของสารมีพิษ ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร และวิเคราะห์ ปริมาณโลหะหนักชนิด arsenic, cadmium, chromium, lead, mercury ในน้ำสกัดแล้วหากมี ปริมาณโลหะหนักค่าใดค่าหนึ่งเกินจากตารางที่ 1 ถือว่าเป็นสารมีพิษ^[232]

ตารางที่ 1 เกณฑ์ปริมาณโลหะหนักที่กำหนดในของเสียอันตราย

โลหะหนัก	ความเข้มข้นสูงสุด (mg/l)
arsenic	5.0
barium	100.0
cadmium	1.0
chromium	5.0
lead	5.0
mercury	0.2
selenium	1.0
silver	5.0

ที่มา : ดัดแปลงจาก Datta (1997)^[93]; Calvin (1993)^[63]

การกำจัดของเสียอันตราย^[217]

สำหรับการกำจัดของเสียอันตราย (hazardous wastes disposal) นั้น ต้องพิจารณาถึงประเภทของของเสียอันตรายด้วย โดยของเสียที่มีสารอันตรายปนเปื้อนแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มคือ^[93]

- กัมมันตรังสี (radioactive substance) ได้แก่วัตถุทั้งหมดที่สามารถปล่อยรังสีได้^[348]
- สารเคมี (chemical) ได้แก่โลหะอินทรีย์สังเคราะห์ โลหะอนินทรีย์สังเคราะห์ โลหะหนัก เกลือ กรด ต่าง
- ของเสียชีวภาพ (biological waste) ได้แก่ของเสียที่มาจากโรงพยาบาลหรือหน่วยงานวิจัยทางด้านชีววิทยา
- ของเสียที่ติดไฟได้ (flammable waste) ของเสียประเภทนี้อาจอยู่ในรูปของของแข็งของเหลวหรือแก๊สก็ได้ เช่นตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน พลาสติก และสแลตจอินทรีย์
- ของเสียที่ระเบิดได้ (explosive) ได้แก่ของเสียที่มาจากโรงงานผลิตอาวุธ หรือวัตถุระเบิด รวมถึงพลุ ดอกไม้ไฟ และโรงงานแก๊ส

ซึ่งแต่ละกลุ่มก็มีหลักในการบำบัดหรือกำจัดแตกต่างกันออกไป ดังนี้

1. การทำลายฤทธิ์ด้วยวิธีเคมี – กายภาพ

เป็นการทำให้ของเสียเป็นกลางหรือทำให้หมดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้กลายเป็นตะกอนหรือเกลือกึ่งรูปไม่ละลายน้ำ หลังจากนั้นตะกอนเกลือกึ่งรูป ไม่มีฤทธิ์ และไม่ละลายน้ำ ก็จะถูกนำไปฝังกลบตามหลักวิชาการต่อไป ของเสียที่เหมาะสมกับการทำลายฤทธิ์ด้วยวิธีนี้ได้แก่ พวกโลหะหนัก กรด ด่าง และสารละลายเกลือกึ่งรูป

2. การทำลายฤทธิ์ด้วยการเผาด้วยอุณหภูมิสูง

การเผาโดยระบบเตาเผา (incineration) เหมาะสำหรับของเสียอันตรายที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีการปรับเสถียรและฝังกลบได้โดยทันที^[63] ของเสียที่นำมาเผาคงต้องมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง เช่น น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ตัวทำละลาย สารกำจัดศัตรูพืช (รวมทั้งภาชนะปนเปื้อน) เป็นต้น เพราะในของเสียอันตรายบางประเภทการทำลายฤทธิ์ด้วยวิธีเคมีกายภาพตามที่กล่าวมาแล้วไม่สามารถทำลายฤทธิ์สารจำพวกน้ำมัน ยาฆ่าแมลง สีสังเคราะห์ หรือสารทำละลายได้ดี เพราะจะไม่ทำปฏิกิริยากัน จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจสูงตั้งแต่ 1,000 ถึง 2,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ของเสียถูกออกซิไดซ์ไปเป็นก๊าซหรือเกลือกึ่งรูป ปริมาณก๊าซหรือกากตะกอนที่เกิดขึ้น แม้มีเพียงเล็กน้อยก็ต้องนำไปฝังกลบ และในบางกรณีอาจต้องทำให้ครึ่งรูปไม่ละลายน้ำก่อนนำไปฝังกลบ

การเผาของเสียด้วยเตาเผาขยะมีความเหมาะสมมากที่จะใช้ในการกำจัดของเสียพิเศษบางชนิด เช่น ของเสียที่มีการปนเปื้อนของเชื้อโรคและสารพิษ แต่การเผาด้วยอุณหภูมิสูงนี้ไม่เหมาะกับของเสียที่สามารถจัดการโดยวิธีอื่นได้ เพราะเตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีเครื่องฟอกไอแก๊สที่มีประสิทธิภาพนั้น มีราคาแพงมาก ยกเว้น เมื่อการขนส่งของเสียมีราคาแพงขึ้นและไม่มีที่ฝังกลบแล้ว อย่างไรก็ตามต้องตระหนักอยู่เสมอว่า เตาเผาบางประเภทไม่เหมาะสมสำหรับเผาของเสียบางชนิด อาทิของเสียที่มีตะกั่ว ปรอท แคดเมียม หรืออาร์เซนิกปนเปื้อน เพราะเตาเผาบางประเภทอาจมีระบบฟอกอากาศที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะดักจับไอควีน เขม่าของสารเหล่านี้ได้หมด

ข้อดีของวิธีนี้คือใช้พื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับวิธีการฝังกลบ สามารถกำจัดของเสียได้เกือบทุกชนิด และก๊าซที่เหลือจากการเผามีน้อยไม่มีปัญหาในการกำจัดขั้นต่อไป หากเป็นเตาเผาขนาดใหญ่ ไม่จำเป็นต้องอาศัยเชื้อเพลิงอย่างอื่นเข้ามาช่วย สามารถก่อสร้างเตาเผาไว้ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดของของเสียได้ ทำให้ประหยัดค่าขนส่ง สามารถนำพลังงานความร้อนจากเตามาใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า

ข้อเสียของวิธีนี้คือค่าลงทุนในการก่อสร้างสูงมากโดยเฉพาะเตาเผาขนาดใหญ่ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมบำรุงรักษาค่อนข้างสูง รวมทั้งมีความร้อนสูง จึงทำให้เกิดการสึกหรองง่าย การดูแลรักษาค่อนข้างสูง ต้องแยกของเสียที่เผาไหม้ได้และที่เผาไหม้ไม่ได้ออกจากกัน และการเผา

ของเสียย่อมก่อให้เกิดอากาศเสียขึ้น อย่างไรก็ตามการกำจัดของเสียโดยการเผาในเตาเผา อุณหภูมิสูงนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะเป็นวิธีการกำจัดของเสียที่ดีที่สุดเท่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

3. การฝังกลบ^[93, 94, 553]

เป็นกระบวนการในอันดับที่ต่อจาก 2 วิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพราะการทำลายฤทธิ์ของเสียอันตรายด้วยกระบวนการทางเคมีกายภาพและการเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นการเปลี่ยนสภาพของเสียอันตรายให้อยู่ในสภาพที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง หรือมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งอยู่ในรูปตะกอนเกลือกที่คงรูปไม่ละลายน้ำ หรือซีเมนต์ กาก ตะกอน ที่จำเป็นจะต้องนำไปฝังกลบ (landfill) ให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป วิธีนี้เหมาะสำหรับของเสียอันตรายที่เป็นของแข็งหรือกากตะกอน เช่น กรดและด่าง ของแข็งปนเปื้อนโลหะหนัก ถ่านไฟฉาย สารเคมีที่เป็นพิษต่าง ๆ^[334]

สำหรับการฝังกลบโลหะหนัก ต้องทำการเปลี่ยนโลหะหนักให้เป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือละลายน้ำได้น้อยลงก่อน โดยการปรับค่าพีเอชหรือการเติมสารเคมี แล้วตกตะกอนสารประกอบโลหะหนัก จากนั้นแยกตะกอนโลหะหนักออกมาทำให้แห้ง นำไปปรับให้เสถียร (stabilization/solidification) ก่อน แล้วจึงนำไปทำการฝังกลบอย่างปลอดภัยต่อไป

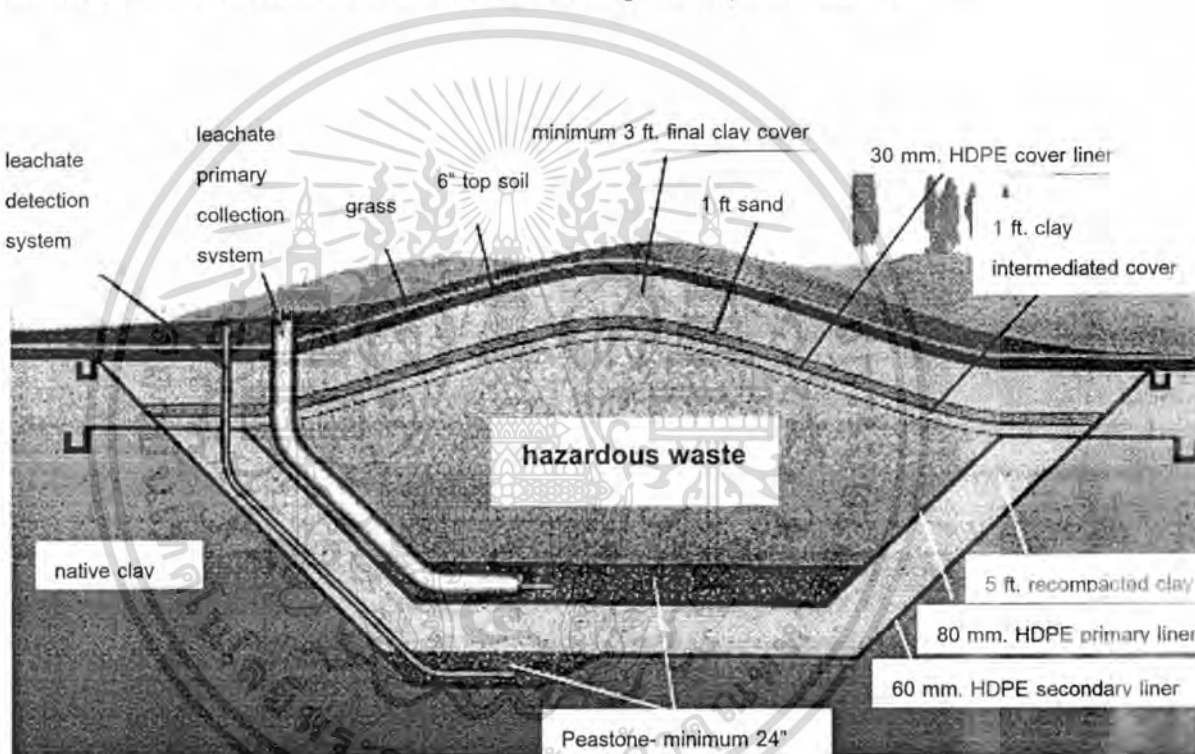
โครงสร้างของหลุมฝังกลบนั้น จะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและสารอันตรายอย่างรัดกุม ที่ก้นหลุมและด้านข้างหลุม ต้องมีการบดอัดด้วยดินเหนียว ซึ่งมีอัตราการไหลซึมของน้ำต่ำ ต่อจากนั้นจึงปูด้วยแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติก เช่นแผ่น HDPE (high density polyethylene) จำนวน 2 ชั้น เหนือชั้นแผ่นยางแต่ละชั้นเป็นชั้นระบายน้ำ ซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลลงมา น้ำเหล่านี้จะไหลลงท่อ เพื่อรวบรวมนำมาบำบัดภายนอกต่อไป เมื่อฝังกลบกากของเสียจนเต็มหลุมแล้วต้องทำการปิดหลุมด้วยดินอัดแน่น ต่อจากนั้น ปูแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติกสังเคราะห์ ปูทับด้วยดินอีกชั้น แล้วปลูกพืชคลุมดินไว้ เพื่อลดการชะล้างพังทลายของหน้าดิน นอกจากนั้นด้านบนของหลุมฝังกลบจะต้องมีที่ระบายอากาศ เพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดตัวของแก๊สจนดันหลุมฝังกลบให้มีรอยแตกได้ ด้านข้างของหลุมฝังกลบทั้ง 2 ด้าน ต้องมีบ่อบาดาลเป็นบ่อสังเกตการณ์การรั่วไหลออกสู่ภายนอก โดยต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อมาตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อนอยู่เสมอ

ทั้งนี้การควบคุมของเสียอันตรายที่ทิ้งลงพื้นที่ฝังกลบต้องมีมาตรการต่าง ๆ ในการดำเนินงานเพื่อป้องกันและควบคุมมิให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยปกติแล้วของเสียอันตรายที่จะทิ้งลงบริเวณพื้นที่ฝังกลบได้ต้องมีการควบคุมตามมาตรการกำจัดโดยวิธีการพิเศษตามลักษณะของเสีย นั้น ๆ การฝังกลบต้องอยู่ห่างไกลชุมชนพอสมควร ต้องมีการควบคุมให้ของเสียที่ฝังกลบถูกจำกัดอยู่เฉพาะภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ ทั้งบนพื้นผิวดินและใต้ดิน ต้องคำนึงถึงทัศนียภาพของพื้นดินและบริเวณใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 13 การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนัก

ข้อดีของวิธีนี้คือ ถ้ามีพื้นที่อยู่แล้วจะเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุด ค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรกถูกกว่าวิธีอื่น สามารถใช้ได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว กำจัดของเสียได้เกือบทุกชนิด ได้พื้นที่ดินไปทำประโยชน์อื่นเมื่อฝังกลบเสร็จแล้วและง่ายต่อการดำเนินงาน

ข้อเสียของวิธีนี้คือ หาสถานที่ยากเพราะไม่มีชุมชนใดต้องการให้อยู่ใกล้ ต้องควบคุมการดำเนินงานฝังกลบให้ถูกต้อง น้ำชะของเสียอาจทำให้เกิดอันตรายได้ พื้นที่ฝังกลบบางแห่งต้องหาดินมาจากที่อื่นทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย วิธีนี้มีปัญหาตามมามากคล้ายกับการเทของเสียกองไว้ และปัญหาที่อันตรายอีกคือการทำลายระบบนิเวศน์โดยทำให้มีน้ำขังในระบบซึ่งน้ำที่ขังนี้เกิดจากการทับถมของกองของเสีย และจากน้ำชะจากกองของเสียที่มีความเป็นกรดสูง มีสารพิษปนเปื้อน จะแพร่กระจายไปตามน้ำที่ท่วมขังอยู่ทำให้ที่ลุ่มตรงนั้นสกปรก^[381]



ภาพที่ 1 การสร้างหลุมฝังกลบของเสียอันตราย

ที่มา : <http://www.etc.org>^[303]

ตัวอย่างเกณฑ์ในการสร้างหลุมฝังกลบของเสียอันตรายของสหรัฐอเมริกา (ภาพที่ 1) โดยหลุมฝังกลบมีการรองกันหลุมล่างสุดด้วยกรวดขนาดเล็ก (peastone) หนาน้อย 24 นิ้ว ซึ่งบริเวณนี้เป็นชั้นที่ฝังท่อสำหรับตรวจสอบน้ำชะละลายของเสีย (leachate) ถัดขึ้นมาเป็นชั้นของ HDPE (high density polyethylene) หนาน้อย 60 มิลลิเมตร ถัดขึ้นไปเป็นชั้นของดินเหนียว (clay) อัดแน่น หนา 5 ฟุต ถัดขึ้นไปเป็นชั้นของ HDPE หนา 80 มิลลิเมตร และเหนือชั้นนี้เป็นชั้นของ peastone ที่หนา 24 นิ้ว อยู่ที่ก้นหลุม บริเวณนี้มีการต่อท่อเพื่อตรวจสอบน้ำชะละลายของเสีย จากชั้นนี้ขึ้นไปเป็นชั้นของของเสียอันตราย จากนั้นคลุมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้เอกสารนี้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียอันตรายด้วยดินเหนียวหนา 1 ฟุต ถัดขึ้นมาคลุมด้วย HDPE หนา 30 มิลลิเมตร ถัดขึ้นมาคลุมด้วยทราย (sand) 1 ฟุต และคลุมด้วยดินเหนียวอีกอย่างน้อย 3 ฟุต จากนั้นใช้ดินคลุมทับอีก 6 นิ้ว และทำการปลูกหญ้าคลุมด้านบน

โดยการสร้างหลุมฝังกลบต้องสร้างให้ตรงตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดอย่างเคร่งครัด และต้องมีการควบคุมสถานที่ในการสร้าง การออกแบบ การก่อสร้าง การดำเนินการทิ้งของเสีย และการปิดหลุมฝังกลบ โดยของเสียอันตรายต้องมีการตรวจสอบปริมาณพิษก่อนว่าเหมาะสมที่จะทิ้งด้วยวิธีนี้หรือไม่ หากไม่เหมาะสมต้องมีการลดพิษของของเสียนั้นก่อนจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่จะทิ้งของเสียอันตรายในพื้นที่ฝังกลบได้

4. การนำของเสียไปทิ้งทะเล

ตามปกติพื้นที่ท้องน้ำแหล่งต่าง ๆ โดยเฉพาะทะเล มหาสมุทร เป็นที่ที่บดบังสิ่งปฏิกูลตามธรรมชาติได้อย่างมาก และในปัจจุบันพื้นที่บนแผ่นดินมีน้อยลงและมีค่ามากขึ้น การนำของเสียไปทิ้งในทะเลและมหาสมุทร (dumping at sea / ocean disposal) จึงนิยมทำกันในบางประเทศ เช่น ในสหรัฐอเมริกา โดยของเสียที่นิยมนำไปทิ้งในทะเลและมหาสมุทร ได้แก่ สิ่งปฏิกูลจากโรงงานอุตสาหกรรม สารพิษต่าง ๆ กากสารกัมมันตรังสี และวัสดุแข็งอื่น ๆ

ลักษณะของการทิ้งของเสียลงในทะเลมีทั้งการทิ้งลงโดยตรงในทะเลลึกและการทิ้งคล้ายลักษณะการฝังกลบบนแผ่นดิน การทิ้งโดยตรงลงทะเลลึกจะบรรจุของเสียในภาชนะที่แข็งแรงก่อนทิ้งลงทะเล โดยตัวอย่างเช่นมีการทิ้งของเสียอันตรายเช่นแก๊สทำลายระบบประสาท อาร์เซนิก, mustard gas (แก๊สพิษทำจากคลอรีนเมื่อถูกผิวหนังจะทำให้เป็นแผลรุนแรง) สารเคมีที่มีอันตรายถึงขั้นทำให้มนุษย์เสียชีวิตและสารเคมีที่มีอันตรายสูง ลงในทะเลที่ความลึก 12,600 ฟุต ห่างจากชายฝั่ง 100 ไมล์ แต่พบว่าในบางครั้งมีการทิ้งห่างจากฝั่งเพียง 12 ไมล์^[382]



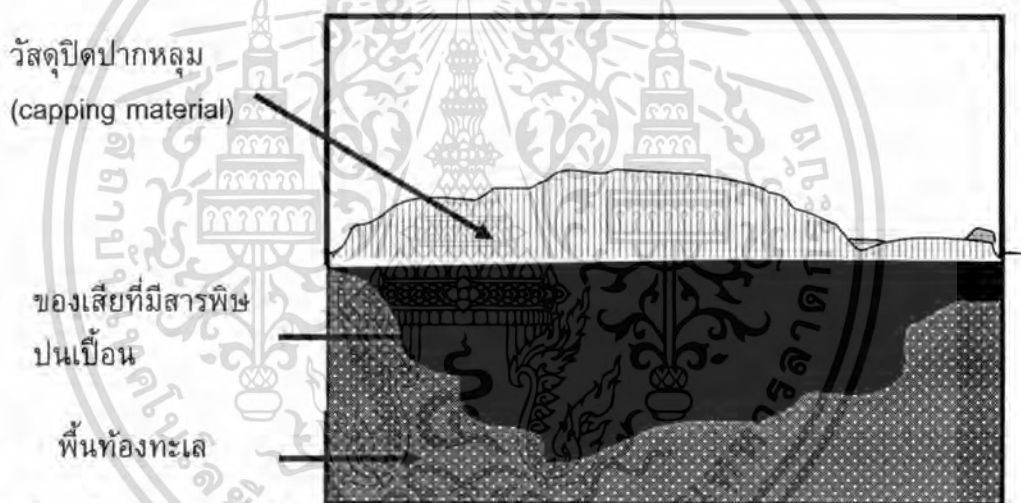
ภาพที่ 2 การทิ้งของเสียอันตรายลงทะเล (dumping at sea)

ที่มา : <http://www.celsias.com>^[286]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใบที่ 13: การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนัก

ส่วนวิธีการทิ้งของเสียลงทะเลแบบที่มีลักษณะคล้ายการฝังกลบ คือวิธี capped disposal ซึ่งมีวิธีการคือนำของเสียไปไว้ที่พื้นทะเล หรือมีการขุดหลุมลึก ๆ ที่พื้นทะเลก่อนมีการทิ้งของเสีย เมื่อทิ้งของเสียแล้วจะปิดหลุมของเสียด้วยวัสดุที่แข็งแรงเพื่อป้องกันไม่ให้พิษของของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยวิธีนี้การที่จะหาวัสดุปิดด้านบนของหลุมของเสีย ต้องคำนึงถึงความแรงของกระแสน้ำ คลื่น รวมทั้งลักษณะโครงสร้างของพื้นทะเลที่ทำการขุดหลุมฝังของเสีย ว่ามีความแข็งแรงหรือหนาแน่นพอหรือไม่ที่จะไม่ทำให้พิษของของเสียไหลรั่วออกไปจากพื้นที่นี้ได้ และลักษณะของวัสดุที่ปิดหลุมของเสียด้านบน (capping material) ต้องมีความหนาแน่นแข็งแรง ไม่หลุดออกจากหลุมของเสียที่ปิดได้ โดยเฉพาะหากเป็นของเสียที่มีพิษการออกแบบหลุมฝังหรือวัสดุที่คลุมต้องพิจารณาสูงมากเป็นพิเศษ รวมทั้งต้องมีการตรวจสอบวัสดุที่คลุมหลุมของเสียเป็นระยะ ๆ เพราะต้องระวังถึงการรบกวนของตะกอนที่อยู่ใต้ทะเลด้วย (ภาพที่ 3) วิธีนี้มักใช้ในทะเลที่ไม่ลึกมากนัก

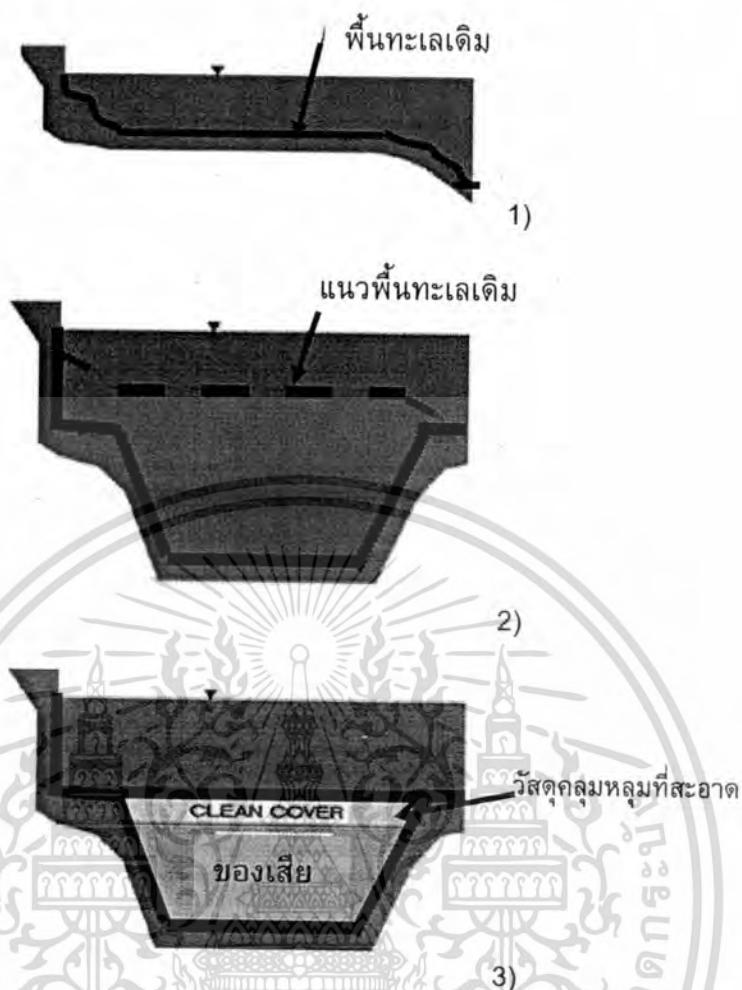


ภาพที่ 3 ลักษณะการทิ้งของเสียในทะเลแบบ capped disposal
ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://education.usace.army.mil> ^[228]

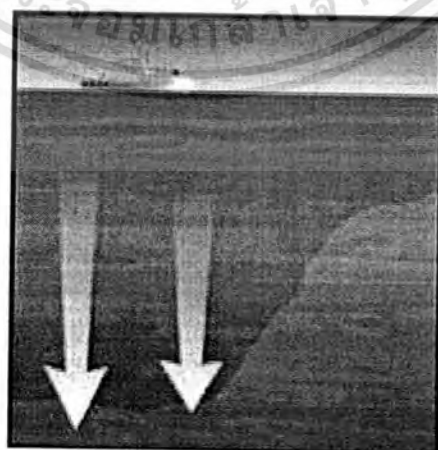
ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการขุดหลุมเพื่อฝังของเสียในทะเล โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการคือ 1) การเลือกพื้นที่ 2) ทำการขุดหลุม และ 3) ทิ้งของเสียลงในหลุมและปิดด้านบนของหลุมด้วยวัสดุที่สะอาด หรือวัสดุที่แข็งแรง

การทิ้งของเสียลงทะเลอีกแบบหนึ่งคือการทิ้งในทะเลลึก (sub-seabed disposal) (ภาพที่ 5) โดยมีการขุดหลุมลึกและฝังของเสียกัมมันตรังสีลงใต้พื้นทะเล วิธีนี้มีข้อเสียเพราะการทิ้งของเสียลงหลุมในทะเลลึกจะปิดปากหลุมของเสียได้ยาก การตรวจสอบการรั่วซึมของพิษใต้ทะเลลึกทำได้ยากและอันตราย ซึ่งในประเทศอังกฤษได้มีการห้ามทิ้งของเสียกัมมันตรังสีลงทะเลลึกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดที่ 13 การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนักต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการขุดหลุมฝังของเสียในทะเลแบบ capped disposal
ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://dredgemanagementsolutions.com> [208]



ภาพที่ 5 การทิ้งของเสียในทะเลลึก (sub-seabed disposal)

ที่มา : <http://courses.bio.psu.edu> [205]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 13 การกำจัดของเสียอันตรายและตัวดูดซับโลหะหนัก

ข้อดีของการกำจัดของเสียโดยนำไปทิ้งทะเลถือเป็นวิธีที่ง่าย เพราะทะเลและมหาสมุทรมีพื้นที่กว้างใหญ่จึงรับของเสียได้มาก อย่างไรก็ตามการนำของเสียและสิ่งปฏิกูลไปทิ้งในทะเลหรือมหาสมุทร ปรากฏว่าเกิดการแพร่กระจายของสารพิษเข้าสู่องค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบนิเวศทางทะเลทั้งสิ่งไม่มีชีวิต พืช และสัตว์ เช่นมีการแพร่กระจายและสะสมของสารพิษในดินตะกอน แพลงก์ตอน สาหร่าย หอย ปลา หรือสัตว์น้ำอื่น ๆ และสารพิษนี้ยังแพร่กระจายไปได้ทั่วท้องทะเล ดังนั้นสถาบันป้องกันสารพิษสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency) จึงออกกฎหมายห้ามนำสารพิษหลายชนิดไปทิ้งในทะเลหรือมหาสมุทร^[382]

5. การทิ้งของเสียอันตรายในหลุมลึก

การทิ้งของเสียอันตรายในหลุมลึก (deep-hole disposal) วิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดของเสียอันตรายพวกที่มีกัมมันตรังสีอันตรายร้ายแรง โดยบรรจุของเสียอันตรายเหล่านี้ในหลุมที่ขุดลึกลงไปใต้ดินมากกว่า 6 ไมล์ (ประมาณ 9.6 กิโลเมตร) ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วกัมมันตรังสีจะถูกทำให้สลายไป (decayed) จนถึงระดับที่ไม่เป็นพิษ วิธีนี้มีข้อดีคือป้องกันการปนเปื้อนของพิษในน้ำใต้ดิน ส่วนข้อเสียของวิธีนี้คือไม่สามารถทราบถึงปฏิกิริยาที่แน่นอนที่จะเกิดขึ้นของกัมมันตรังสีที่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงในหลุมลึกได้^[228]

6. การบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน^[268]

เทคโนโลยีการบำบัดกากของเสียขั้นสุดท้าย ก่อนการนำไปทิ้งที่นิยมใช้และรู้จักกันเป็นอย่างดีแพร่หลาย คือกระบวนการทำให้เป็นก้อน (solidification) วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้คือเพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียว ที่ให้น้ำซึมผ่านได้น้อย มีโครงสร้างมั่นคงแข็งแรง และก้อนหล่อแข็งที่ได้ต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด กระบวนการทำให้เป็นก้อนแบ่งเป็นหลายประเภทด้วยกัน ในการเลือกวิธีการบำบัดของเสียควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของของเสีย และคุณลักษณะเฉพาะของของเสีย ประเภทของกระบวนการทำให้เป็นก้อนต่างๆ ได้แก่ cement based, pozzolanic (lime based), thermoplastic, organic polymer, surface encapsulation, self-cementing และ glassification and production of synthetic minerals or ceramics

ซึ่งรายละเอียดของการทำให้เป็นก้อนแต่ละวิธีมีดังนี้^[1232]

- cement based วิธีนี้ของเสียจะถูกผสมลงไปในซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอย่างอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
- pozzolanic (lime based) วิธีนี้ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน เช่น ถ้ำลอย ผงซีเมนต์ที่เตาเผาเป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว

- thermoplastic วิธีนี้จะนำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น bitumen, paraffin หรือ polyethylene ปลอຍให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
- organic polymer วิธีนี้ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารพอลิเมอร์ (gelling agents หรือ formaldehyde) และเติมสารคะตะลิสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่จะสารพอลิเมอร์แข็งตัว
- surface encapsulation วิธีนี้ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น แล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเหนียว เช่น polyethylene หรือ organic resins
- self-cementing วิธีนี้จะใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลเฟต และแคลเซียมซิลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
- glassification and production of synthetic minerals or ceramics วิธีนี้ใช้กับสารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้ว หรือ synthetic silicate mineral เพื่อป้องกันไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ และสามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุครั้งที่ 2

สำหรับโลหะหนักหรือตัวดูดซับโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดได้หลายวิธีเช่น cement based, pozzolanic (lime based), thermoplastic, organic polymer, surface encapsulation และ glassification เช่นการหล่อของเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนที่มาจากเตาเผาความร้อนสูง โดยหลังจากที่กากของเสียผ่านกระบวนการหล่อแข็งแล้ว จะถูกนำไปทดสอบค่าการชะละลายของโลหะในน้ำสกัด ความสามารถในการรับกำลังอัด และอื่น ๆ จนมีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน ก้อนหล่อแข็ง จึงสามารถนำก้อนหล่อแข็งเหล่านั้น ไปดำเนินการฝังกลบอย่างปลอดภัยด้วยวิธีพิเศษ ที่เรียกว่า secure landfill cement based โดย pozzolanic (lime based) เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่นิยมนำมาปฏิบัติในประเทศไทย

ตัวอย่างการหล่อแข็งโลหะหนักเช่น การทำการหล่อแข็งกากตะกอนปรอทซิลไฟด์ โดยใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะซึ่งสามารถรีไซเคิลได้ โดยเมื่อเติมกากตะกอนปรอทซิลไฟด์ 50 ไมโครกรัมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง ก้อนหล่อแข็งดังกล่าวให้ค่าการชะละลายของปรอทอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และยังได้มีการทำการศึกษาการหล่อแข็งโลหะหนักประเภทอื่น ๆ อยู่ในปัจจุบัน หากการทดลองประสบผลสำเร็จ ข้อมูลที่ได้จะทำให้สามารถแก้ไขปัญหาหนี้เสียจากห้องปฏิบัติการได้ระดับหนึ่ง และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการบำบัดกากอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีปริมาณสารโลหะหนักสูง

สำหรับการจัดการกับของเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน มีตัวอย่างที่ดำเนินการในประเทศไทยคือการกำจัดแบริเตนเตอริโทรศัพทที่มีือถือที่เสื่อมสภาพ ซึ่งวิธีการกำจัดคือทำการปรับเสถียรทำเป็นก้อน และฝังกลบ โดยกระบวนการจะประกอบด้วย 1) การนำแบริเตนเตอริโทรศัพทที่เก็บรวบรวมได้มาทำการบดทำลายให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อให้สารโลหะหนักที่อยู่ในแบริเตนเตอริโทรศัพทสามารถทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงกับสารเคมีที่จะถูกเติมเข้ามา 2) จากนั้นทำการเติมสารเคมีเพื่อควบคุมโลหะหนัก (กระบวนการปรับเสถียร) โดยสารเคมีดังกล่าวนี้จะต้องมีคุณสมบัติในการควบคุมความเป็นพิษของโลหะหนักได้ 3) และจากนั้นทำให้กลายเป็นของแข็ง โดยการใส่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) ลงในส่วนผสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งจะช่วยให้สารโลหะหนักให้เป็นก้อนเพื่อเป็นการจำกัดขอบเขตของสารโลหะหนักที่เป็นพิษให้อยู่ในวงจำกัด จากนั้น 4) ทดสอบระบบน้ำชะกากด้วยการนำของแข็งที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 3 ไปทำการทดสอบระบบน้ำชะกาก โดยการผ่านกระบวนการทางห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบว่าน้ำที่ชะออกมามีปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐานที่หน่วยงานราชการกำหนดไว้หรือไม่ และ 5) นำของเสียที่ผ่านการทดสอบน้ำชะกากแล้วไปฝังยังหลุมฝังกลบนิรภัยที่มีระบบพื้นฟูป้องกัน 2 ชั้น (double liners) เพื่อสร้างความมั่นใจได้ว่าจะควบคุมไม่ให้สารโลหะหนักเหล่านี้หลุดออกมาสร้างผลกระทบต่อให้กับสภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต

การกำจัดสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนัก

สำหรับการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน วิธีหนึ่งคือการใช้สาหร่ายดูดซับโลหะหนักก่อนปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีนี้มีประโยชน์จากการใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนักคือ สามารถรวบรวมโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำและมีอยู่ในมวลน้ำปริมาณมาก ให้มาอยู่ที่เซลล์สาหร่ายในปริมาณโลหะหนักที่เข้มข้นกว่าน้ำที่ล้อมรอบ เพราะโลหะหนักที่เข้มข้นต่ำในน้ำเสียปริมาณมากนั้นไม่เหมาะกับการกำจัดด้วยวิธีตกตะกอนเคมี เพราะต้องใช้สารเคมีปริมาณสูง

แต่หลังจากการดูดซับสิ่งที่ตามมาก็คือสาหร่ายที่มีโลหะหนักเข้มข้นสูงปนเปื้อนอยู่บนเซลล์ ซึ่งสาหร่ายนี้จึงกลายเป็นของเสียอันตรายหรือขยะพิษชิ้นหนึ่งนั่นเอง โดยวิธีที่ดีที่สุดในการจัดการกับสาหร่ายที่มีโลหะหนักปนเปื้อนคือการล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายและนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่ อาจใช้การรวบรวมโลหะหนักออกจากสารละลายที่ใช้ล้างสาหร่ายโดยการตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสารละลายที่ล้างโลหะหนักออกจากสาหร่ายนั้นจะใช้ในปริมาณน้อย ดังนั้นการตกตะกอนโลหะหนักจึงใช้สารเคมีปริมาณน้อยและมีความคุ้มค่า นอกจากนี้สาหร่ายที่ถูกล้างโลหะหนักออกแล้ว ก็สามารถนำกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักได้ใหม่ จะทำให้ไม่เกิดของเสียอันตรายขึ้น เป็นผลดีทั้งในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม แต่ในกรณีที่

ไม่ต้องการนำโลหะหนักหรือสารร้ายกลับไปใช้ใหม่ จำเป็นต้องมีการกำจัดสารร้ายที่มีโลหะหนักอยู่บนเซลล์ด้วยวิธีที่เหมาะสม เพราะสารร้ายนี้จัดเป็นของเสียอันตราย

สำหรับรายงานการกำจัดของเสียที่มีโลหะหนักบนเป็อนได้มีตัวอย่างการกำจัดเช่นการเผาด้วยความร้อนสูง การฝังกลบ การทิ้งลงทะเล และการทำให้เป็นก้อน เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้กำจัดสารร้ายที่ดูดซับโลหะหนักได้เช่นกัน โดยวิธีที่เหมาะสมคือการกำจัดโดยระบบเตาเผา โดยการเผาดูดซับโลหะหนักด้วยเตาเผาจะควรมีความร้อนระหว่าง 1,100-1200 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้น แต่ขึ้นกับชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับด้วยเช่นกัน^[217]

หลังจากการเผาดูดซับโลหะหนักแล้วจะได้เถ้าออกมา ซึ่งเถ้านี้ต้องทำให้เสถียรหรือทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษโดยใช้ chelating agent และนำไปทิ้งยังพื้นที่ฝังกลบตามมาตรฐานของการกำจัดโลหะหนัก โดยก่อนการนำไปฝังกลบต้องมีการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ หรือคอนกรีตในส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้โลหะหนักรั่วซึมออกจากก้อนซีเมนต์ และเพื่อป้องกันพิษโลหะหนักออกจากพื้นที่ฝังกลบไปทำลายสิ่งแวดล้อม โดยต้องทำการทดสอบพิษที่รั่วซึมออกจากก้อนของเสียโลหะหนักนี้ก่อนทิ้งลงพื้นที่ฝังกลบ ซึ่งต้องผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณโลหะหนักกำหนดไว้ด้วย^[253, 355]

โดยตัวอย่างเกณฑ์มาตรฐานของของเสียที่จะทิ้งลงที่พื้นที่ฝังกลบระบุไว้ว่าต้องมีปริมาณตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม ปรีท นิกเกิล ไม่เกิน 3.0, 0.3, 1.5 , 0.05 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ (ข้อมูลจาก Chinese standards for hazardous waste landfill control)^[379]

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการกำจัดสารร้ายที่ดูดซับโลหะหนักทั้งเป็นวิธีที่ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะสาเหตุที่เลือกสารร้ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนักนั้น เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีที่สุดของสารร้ายคือสามารถล้างโลหะหนักออกจากสารร้าย และนำโลหะหนักและสารร้ายนี้กลับไปได้ใหม่ ซึ่งการทำเช่นนี้จะทำให้ไม่มีของเสียอันตรายเกิดขึ้นจากการดูดซับโลหะหนัก จึงไม่จำเป็นต้องทิ้งตัวดูดซับโลหะหนักเหล่านี้ และทำให้ไม่เป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม

แต่หากจำเป็นต้องกำจัดสารร้ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้ว ก็ยังพบว่าสารร้ายมีข้อดีกว่าการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยวิธีอื่น เพราะสารร้ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้ว สามารถทำให้ลดขนาดลงได้ด้วยการทำแห้งที่ไม่แพง เช่นการตากสารร้ายให้แห้งก็สามารถลดขนาดหรือปริมาตรได้แล้ว (การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจะทำให้เซลล์แห้งของสารร้ายพองขึ้น มีปริมาตรเพิ่มขึ้น) นอกจากนี้ยังพบว่าการกำจัดสารร้ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วด้วยวิธีการเผาที่ความร้อนสูงนั้น มีความสะดวกและเหมาะสมมากกว่าการนำโลหะหนักที่มาจากการตกตะกอนทางเคมีหรือการนำแผ่นเรซินที่จับโลหะหนักมากำจัด^[186, 677]

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็น ตัวดูดซับชีวภาพ ALGAL CULTURE FOR BIOSORBENT

การเลี้ยงสาหร่าย^[442, 728]

การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักมี 2 แบบ หลัก ๆ คือ การเลี้ยงเพื่อรักษาไว้เป็นหัวเชื้อในห้องปฏิบัติการและการเลี้ยงเพื่อขยายให้มีปริมาณมากเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตนำไปใช้ดูดซับโลหะหนัก โดยถ้าเป็นสาหร่ายขนาดเล็กจะต้องเริ่มเลี้ยงจากหัวเชื้อเซลล์เดียวในห้องปฏิบัติการก่อนจึงขยายออกสู่ภายนอก ถ้าเป็นสาหร่ายขนาดใหญ่สามารถเลี้ยงภายนอกได้ทันทีแต่จะต้องมีบางส่วนที่เก็บรักษาไว้ในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นพ่อแม่พันธุ์สำหรับชุดถัดไป เพราะถ้าใช้เพียงแต่ต้นพันธุ์จากการเลี้ยงภายนอกขยายต่อไปเรื่อย ๆ สาหร่ายที่ได้มักมีการปนกับสาหร่ายชนิดอื่นระหว่างการเลี้ยง ซึ่งสาหร่ายที่ขึ้นปนระหว่างการเลี้ยงอาจเป็นสาหร่ายที่เป็นพิษ หรือเป็นสาหร่ายซึ่งสามารถสร้างสารยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายชนิดที่เราต้องการเลี้ยง ซึ่งจะต้องทำการกำจัดสาหร่ายเหล่านั้นออกไปจากระบบการเลี้ยง^[87]

1. ระยะเวลาของการเลี้ยงสาหร่าย

การแบ่งการเลี้ยงสาหร่ายตามระยะเวลาที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่าย แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1.1. การเลี้ยงระยะยาว การเลี้ยงแบบนี้จะเลี้ยงสาหร่ายได้นาน 3-12 เดือน โดยไม่ต้องการถ่ายหัวเชื้อไปเลี้ยงในอาหารใหม่เพื่อรักษาให้มีชีวิต (subculture) โดยวัตถุประสงค์ของการเลี้ยงระยะยาวนั้นเพื่อเก็บรักษาหัวเชื้อสาหร่ายในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้สำหรับการเพาะสาหร่ายครั้งต่อไป (stock culture) โดยการเลี้ยงต้องเป็นแบบ axenic culture คือไม่มีแบคทีเรียปน หรือเลี้ยงเพื่อผลิตเป็นอุตสาหกรรมโดยแบ่งเป็นการเลี้ยงแบบเก็บผลผลิตครั้งเดียวหมด (batch culture) ผลผลิตที่ได้จากการเลี้ยงวิธีนี้จะสะอาด เหมาะสำหรับการเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้เป็นอาหารมนุษย์ อีกวิธีคือการเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่อง (continuous culture) คือเก็บผลผลิตของสาหร่ายเพียงบางส่วน และปล่อยให้สาหร่ายที่เหลือเจริญต่อไปจนได้ปริมาณ

ที่มากจึงทำการเก็บผลผลิตบางส่วนอีกและเลี้ยงต่อไป วิธีนี้จะทำให้สามารถเก็บสาหร่ายได้เรื่อย ๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่ผลผลิตจะไม่สะอาด

1.2. การเลี้ยงระยะสั้น การเลี้ยงสาหร่ายวิธีนี้เหมาะกับการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อทำการศึกษาในห้องเรียนหรือการทำอุตสาหกรรมระยะสั้น ทำให้สาหร่ายโตเร็วได้ปริมาณมากตามที่ต้องการ ใช้เวลาในการเลี้ยงน้อยแต่ได้ผลผลิตรวดเร็วและมาก

2. อาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย

โดยทั่วไปอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายจะมี 2 แบบคือ

2.1. อาหารเหลว น้ำที่นำมาใช้เตรียมอาหาร อาจเป็นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ น้ำจืดหรือน้ำเค็ม หรือน้ำที่เตรียมได้จากการละลายดินที่มีแร่ธาตุอาหารสูง อาหารเหลวจะทำให้สาหร่ายเติบโตได้เร็วกว่าอาหารแข็ง เหมาะกับการเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณให้รวดเร็วเพราะสามารถนำไปเลี้ยงขยายต่อในภาชนะที่ใหญ่ขึ้นได้เรื่อย ๆ ไม่ต้องมีการปรับตัวของสาหร่ายมาก

2.2. อาหารแข็งหรืออาหารวัน ทำโดยเตรียมอาหารเหลวที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายแล้วนำมาเติมผงวันลงไป 1.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณวันอาจเพิ่มหรือลดตามความต้องการความแข็งของอาหาร อาหารวันมักเตรียมใส่ขวดไวด์ราวเดียวปริมาณค่อนข้างมากโดยปริมาตรจะอยู่ประมาณ 3/4 ของภาชนะหรือขวดที่ใส่อาหาร และห่อกระดาษตะกั่วเก็บใส่ตู้เย็น เมื่อต้องการใช้จึงนำมาหลอมในหม้ออบไอน้ำความดัน (autoclave) 10-15 นาที อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว รอให้เย็น 45-50 องศาเซลเซียส จึงเทอาหารบนจาน ซึ่งวิธีนี้จะใช้เวลาน้อยกว่าการเตรียมอาหารวันใหม่ตั้งแต่ต้น

3. หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้นิตอาหาร

การเลือกใช้นิตอาหารให้พิจารณาจากลักษณะของสาหร่ายที่จะเลี้ยง โดยถ้าเป็นสาหร่ายขนาดเล็กพวกที่มีหนวดควรใช้อาหารเหลวและทำการถ่ายเชื้อลงอาหารใหม่ทุก 3-4 เดือน ถ้าเป็นสาหร่ายที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย หรือเป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่ไม่มีหนวดควรใช้อาหารเหลว และมีการถ่ายเชื้อลงอาหารใหม่ทุก 6-12 เดือน ถ้าเลี้ยงสาหร่ายที่เก็บเป็นหัวเชื้อหรือต้องการแยกเชื้อสาหร่ายที่ต้องการเพียงชนิดเดียว (isolate) ควรใช้อาหารแข็ง หรืออาหารวัน เพราะสาหร่ายจะเติบโตช้า ๆ จึงทำให้สามารถอยู่ได้นาน ไม่จำเป็นต้องมีการถ่ายเชื้อลงอาหารใหม่บ่อยนัก

4. น้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย

4.1. น้ำจืด โดยทั่วไปใช้น้ำกรองตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง หรือใช้น้ำกลั่น น้ำบาดาล หรือน้ำปลอดวัตถุดิบพิษ วิธีเตรียมน้ำที่ดีคือการกรองทำโดยกรองผ่านผงถ่าน (activated charcoal) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน อัตราส่วนถ่าน 2 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากันนาน 1 ชั่วโมง แล้วกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า
ใบความรู้เรื่องน้ำจืดและน้ำเค็มที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบชีวภาพ

ถ้ากรองน้ำด้วยระบบ de-ionize น้ำประเภนี้สามารถนำไปกรองใช้ได้โดยไม่ต้องตั้งทิ้งไว้ โดยกรองซ้ำด้วยผงถ่านจะได้ผลดียิ่งขึ้น และไม่นิยมใช้น้ำประปาเพราะมีสารคลอรีนตกค้างเจือปนอยู่ ซึ่งสารคลอรีนเป็นสารที่เป็นพิษต่อสาหร่ายทุกชนิด หรือหากต้องการใช้น้ำประปาให้น้ำน้ำประปาใส่ภาชนะเปิดตั้งทิ้งไว้ 3-4 วัน เพื่อพักน้ำให้คลอรีนลดปริมาณลง หรืออาจมีการบ่มให้ฟองอากาศในน้ำที่พักไว้ เพื่อเร่งการลดลงของปริมาณคลอรีน จากนั้นจึงนำน้ำมาใช้เลี้ยงสาหร่ายได้

4.2. น้ำทะเล ถ้าเป็นน้ำธรรมชาติควรเก็บไว้ในที่มืด อุณหภูมิต่ำ นานประมาณ 6 เดือน หรือใช้น้ำทะเลเทียมแต่ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าน้ำทะเลธรรมชาติ น้ำทะเลธรรมชาติควรผสมธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยมีในรูปทั้งอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร เช่นเกลือไนเตรดและฟอสเฟตของโซเดียมและโพแทสเซียม น้ำสกัดจากดิน และยังมีสารประกอบที่เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตที่พืชต้องการเล็กน้อยเช่น เหล็ก แมกนีเซียม และซิลิกา โดยทั่วไปน้ำทะเลเทียมเหมาะกับการเลี้ยงสาหร่ายจำวนน้อย

5. เทคนิคการแยกเชื้อและการทำให้เชื้อบริสุทธิ์

การศึกษาความสามารถของสาหร่ายในการดูดซับโลหะหนัก เนื่องจากสาหร่ายมีอยู่มากมายในธรรมชาติ และหลายชนิดยังไม่มีผู้นำมาเลี้ยงไว้เป็นหัวเชื้อ ดังนั้นหากต้องการค้นหาชนิดสาหร่ายใหม่ ๆ ที่อาจดูดซับโลหะหนักได้สูง จำเป็นต้องทำการแยกเชื้อ (isolation) สาหร่ายจากธรรมชาติมาทำการเพาะเลี้ยง โดยอาจเก็บน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย หรือน้ำเค็ม และหากต้องการได้สาหร่ายที่มีความทนทานต่อพิษของโลหะหนัก หรือสาหร่ายที่สามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียที่ต้องการบำบัดได้ จะทำการแยกเชื้อสาหร่ายจากแหล่งน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน หรือน้ำเสียที่เราต้องการบำบัดโดยตรง

โดยการเก็บเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่ล่องลอยในน้ำโดยใช้ถุงกรองแพลงก์ตอนหรือถ้าเป็นสาหร่ายขนาดใหญ่พวกที่เป็นเส้นสายหรือเป็นทลัสส์จะใช้วิธีชูด ดัด หรือดึงออกจากวัสดุต่าง ๆ ที่สาหร่ายนั้นยึดเกาะ และทำการศึกษารูปร่างลักษณะทันทีหลังการเก็บเพื่อทำการเก็บข้อมูลเบื้องต้นก่อนทำการเก็บรักษาตัวอย่าง ถ้ายังไม่สามารถแยกสาหร่ายเซลล์เดี่ยว ๆ มาเลี้ยงได้ทันทีอาจเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 4 องศาเซลเซียส แต่ถ้าจะให้ได้ผลดีควรทำการแยกเชื้อสาหร่ายทันที

อีกวิธีหนึ่งคือการเก็บเชื้อสาหร่ายจากดินหรือทรายที่อยู่บริเวณชายน้ำ เมื่อเก็บมาแล้วทำการฝังในที่ร่มให้แห้งสนิท ใส่ดินที่แห้งลงในจานเลี้ยงเชื้อหรือ petri dish จากนั้นหยดน้ำลงบนดินเล็กน้อย วางจานแก้วในที่ที่มีแสงสว่างเหมาะสม ทิ้งไว้สักกระยะหนึ่งจะพบว่า มีสาหร่ายหรือโปรโตซัวเกิดขึ้น จากนั้นจึงทำการแยกสาหร่ายที่เกิดขึ้นต่อไป การเก็บดินหรือทรายจากชายน้ำสามารถเก็บรักษาสาหร่ายในสภาพ spore หรือ zygote ฯลฯ ได้นาน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ฝังแห้งแล้วลงในขวดแก้วหรือถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

5.1. การแยกเชื้อ (isolation) เป็นเทคนิคเพื่อให้ได้สาหร่ายเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด อาจเรียกเป็นเทคนิค clone culture เทคนิคนี้เป็นการเลี้ยงสาหร่ายชนิดเดียว ตั้งต้นจากเซลล์สาหร่ายเพียง 1-3 เซลล์ เทคนิคในการแยกเชื้อมีหลายวิธี ดังนี้

5.1.1. การล้างเซลล์สาหร่ายให้สะอาดโดยการใช้ micropipette (micropipette washing) เป็นวิธีที่ง่ายในการใช้ เหมาะกับสาหร่ายขนาดเล็ก โดยหยดตัวอย่างน้ำที่มีสาหร่ายที่ต้องการบนสไลด์ ดูดด้วยกล้องจุลทรรศน์ หาดำแหน่งสาหร่ายที่ต้องการ ใช้ micropipette ดูดสาหร่ายที่ต้องการที่ละเซลล์หรือไม่มาก แล้วนำตัวอย่างสาหร่ายที่ดูดมาไปใส่ในหยดน้ำที่สะอาดไม่มีสิ่งอื่นเจือปน แล้วทำการดูดสาหร่ายที่ต้องการนั้นอีก แล้วไปใส่ในหยดน้ำหยดใหม่ที่สะอาด ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเหลือสาหร่ายที่ต้องการเพียงชนิดเดียวไม่มีสาหร่ายอื่นปน แล้วล้างสิ่งสกปรกออกจากสาหร่ายด้วยน้ำ หลาย ๆ ครั้งโดยใช้วิธีดูดสาหร่ายไปใส่หยดน้ำหยดใหม่ จากนั้นนำ 1 เซลล์สาหร่ายที่ได้ใส่ในหลอดแก้วที่บรรจุอาหารไว้เรียบรื้อแล้วสำหรับเลี้ยง วางหลอดแก้วในที่ที่มีแสงสว่างเหมาะสมกับชนิดสาหร่ายเพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโต ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3-6 สัปดาห์ สาหร่ายที่เป็นเส้นสายอาจทำหลอดแก้วให้เป็นปลายตะขอสแล้วเกี่ยวเส้นสาหร่าย ล้างน้ำ จุ่มในวุ้นนุ่ม ๆ (ใส่ผงวุ้นประมาณ 0.5-0.75 เปอร์เซ็นต์) เพื่อขจัดพีชีอิงอาศัย (epiphyte) ที่ติดอยู่แล้วจึงนำไปเลี้ยง โดยวิธีนี้มีข้อควรระวังคือ หยดน้ำที่ใช้แยกเชื้อสาหร่าย หรือใช้ทำความสะอาดสาหร่ายต้องมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำที่สาหร่ายอาศัยอยู่ในธรรมชาติเช่น ความเค็ม อุณหภูมิ สารเคมี เพื่อป้องกันการทำลายเซลล์ของสาหร่ายที่เราต้องการ หรืออาจใช้อาหารที่จะใช้เลี้ยงสาหร่ายมาเป็นหยดน้ำที่ใช้แยกสาหร่าย ทำความสะอาดสาหร่ายโดยตรงเลยก็ได้

5.1.2. atomizer technique เป็นวิธีการที่ค่อนข้างง่ายเหมาะกับสาหร่ายขนาดเล็ก สามารถใช้ได้ทั้งการแยกเชื้อ และการทำให้เชื้อบริสุทธิ์ โดยนำตัวอย่างสาหร่าย 8-9 มิลลิลิตร เข้าเครื่อง centrifuge โดยปั่นที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เวลาในการปั่นประมาณ 45-90 วินาที แล้วล้างด้วยสารละลายที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วโดยรินน้ำใสส่วนบนออกจนเหลือไว้แต่สาหร่ายที่ก้นหลอด แล้วใส่สารละลายที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วลงไป ในหลอดค่อย ๆ เขย่าให้สาหร่ายกระจายทั่วไปทั้งหลอด จากนั้นนำไปปั่นเพื่อทำความสะอาดใหม่ ทำซ้ำเช่นนี้ประมาณ 12 ครั้ง เมื่อได้สาหร่ายที่สะอาดดีแล้วให้จุ่มหลอด micropipette ลงในหลอดแก้วโดยให้ปลายของ micropipetteแตะก้นหลอดพอดี นำสำลีอุดให้ micropipette อยู่กับที่ ดึงหลอดหัวเชื้อสาหร่ายกับขวดให้อยู่กับที่ แล้วพ่นอากาศผ่านปลาย micropipette โดยให้ละอองน้ำที่ออกจากปลาย micropipette พ่นลงในจานอาหารวุ้น โดยจานอาหารวุ้นควรวางห่างจากปลายหลอด

micropipette ประมาณ 25 เซนติเมตร จากนั้นนำจานอาหารวันที่มีหัวเชื้อสาหร่ายไปเลี้ยงในที่มืดเหมาะสมต่อสาหร่ายประมาณ 5-7 วัน สาหร่ายจะเจริญเติบโตขึ้นมา ทำการเก็บเซลล์สาหร่ายที่ต้องการใส่ในหลอดแก้วที่มีอาหารเหลวขยายพันธุ์ต่อไป

5.1.3. การเลือกใช้สูตรอาหาร (selective media) เหมาะกับสาหร่ายขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายทะเล ทำได้โดยทำการเลือกชิ้นส่วนสาหร่ายที่ต้องการจัดสิ่งมีชีวิตที่เกาะอยู่บนสาหร่ายโดยอาจใช้แปรงเล็ก ๆ เชี่ยวทำความสะอาดหรือใช้ตะขอก็กี่ยวสาหร่ายนำไปล้างในน้ำทะเลที่ฆ่าเชื้อ แล้วใส่ตัวอย่างสาหร่ายที่ต้องการเลี้ยงในอาหารที่ผสม germanium dioxide 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดไดอะตอมหรือสาหร่ายกลุ่มที่ต้องการใช้ซิลิกาเพราะในน้ำทะเลมักมีสาหร่ายกลุ่มนี้ปนมามาก

5.1.4. การเพาะสาหร่ายบนอาหารวัน (agar pour plate) โดยทำการผสมน้ำตัวอย่างที่มีสาหร่ายที่ต้องการลงในอาหารวันที่ยังไม่แข็งตัวดี เขย่าให้เข้ากัน เทอาหารวันนั้นลงจานเลี้ยง ทิ้งให้วันแข็งตัว ประมาณ 5-7 วัน สาหร่ายจะขึ้นบนอยู่ในเนื้อของอาหารวันและที่ผิวอาหารวันเป็นบางส่วน ใช้มีดที่สะอาดตัดวันที่มีสาหร่ายที่ต้องการขึ้นอยู่เป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปเลี้ยงในหลอดแก้วที่มีอาหารเหลวหรือใช้วิธี streak ตัวอย่างน้ำที่มีสาหร่ายที่ต้องการเลี้ยงลงบนอาหารวัน โดยใช้แท่งแก้ว หรือ loop ที่ใช้ในการเขี่ยเชื้อ ทำการเผาฆ่าเชื้อและจุ่ม loop ลงในตัวอย่างน้ำที่มีสาหร่ายที่ต้องการ จากนั้นนำเชื้อสาหร่ายมาเขี่ยลงที่ผิวของอาหารวัน และนำไปวางไว้ในที่ที่มีแสงเหมาะสม ประมาณ 1-2 สัปดาห์ สาหร่ายจะขึ้นที่บริเวณผิวของอาหารวัน ทำการแยกสาหร่ายที่ต้องการจากผิวของอาหารวันไปใส่ในหลอดแก้วที่มีอาหารเหลวและทำการเลี้ยงต่อไป วิธีนี้จะไม่มีส่วนของวันปนไปกับสาหร่ายจึงทำให้มีความสะอาดมากกว่าและสาหร่ายโตได้ดีกว่า

5.1.5. ความสมดุลทางออสโมติก (osmotic balance) โดยใช้เทคนิคความแตกต่างของแรงดัน osmotic หรือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของของเหลวภายในเซลล์สาหร่ายกับภายนอกเซลล์ โดยล้างสาหร่ายด้วยสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นของแร่ธาตุต่างกัน สลับกับการล้างตัวอย่างสาหร่ายในน้ำกลั่น จะทำให้สามารถแยกโปรโตซัวออกจากสาหร่ายพวกที่มีหนวด และไม่มีผนังหุ้มเซลล์ได้ วิธีนี้มีข้อควรระวังคือในการล้างสาหร่ายแต่ละครั้งต้องทำอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์ของสาหร่ายเสื่อมคุณภาพ

5.1.6. โครงสร้างของการสืบพันธุ์ (reproductive structures) โดยใช้โครงสร้างในการสืบพันธุ์ของสาหร่าย เช่น spore, cyst, zygote ในการแยกเชื้อ เพื่อใช้ทำให้

เชื้อสาหร่ายบริสุทธิ์ โดยอาจเก็บจากในธรรมชาติ นำมาแยก cyst ออกมา และนำ cyst มาเลี้ยงในอาหาร

5.2. การทำเชื้อสาหร่ายให้บริสุทธิ์ (purification) เมื่อทำการแยกเชื้อจนได้สาหร่ายที่ต้องการเพียงชนิดเดียวแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือทำให้ปลอดแบคทีเรีย (axenic culture) เพื่อนำสาหร่ายไปใช้ในการศึกษา หรืองานวิจัยต่าง ๆ โดยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

5.2.1. การล้างด้วยเทคนิคการปั่นให้ตกตะกอน (washing by centrifugating technique) โดยนำตัวอย่างสาหร่ายมาปั่นให้ตกตะกอน ปั่นที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที นาน 45-90 วินาที จากนั้นรินน้ำใสต่อนบนออก ล้างเซลล์สาหร่ายที่เหลือกันหลุดด้วยสารละลายที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยเติมสารละลายที่ผ่านการฆ่าเชื้อลงไป เขย่าให้เซลล์สาหร่ายที่ตกตะกอนกันหลุดขึ้นมาผสมกับสารละลาย และนำไปปั่นใหม่ ทำซ้ำเช่นนี้หลายหลายครั้ง (อย่างน้อยประมาณ 12 ครั้ง) แล้วเทตะกอนของสาหร่ายลงในหลอดที่มีสารละลายฆ่าเชื้อแล้ว 1 มิลลิลิตร ใช้ pipette ดูดสาหร่าย 2-3 หยด หยดลงบนอาหารวุ้น หรือใช้วิธีการ streak plate เลี้ยงไว้ 5-7 วัน เลือกเก็บสาหร่ายที่ปลอดเชื้อ ถ่ายลงเลี้ยงในอาหารวุ้นที่เทแบบเอียง (agar slants)

5.2.2. เทคนิคทางปฏิชีวนะ (antibiotics technique) โดยใช้ยา penicillin, streptomycin, tetracyclin, ganamycin ฯลฯ ใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ปนในอาหารเลี้ยงสาหร่าย แต่ต้องใช้ในขนาดที่เหมาะสมจะได้ไม่เป็นอันตรายต่อสาหร่ายเอง โดยสูตรของยาที่ใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่นิยมใช้มี 2 สูตรคือ

สูตร 1 สารละลายสต็อก ประกอบด้วย	pennicilin G	0.6 กรัม
	streptomycin	1.0 กรัม
	น้ำกลั่น	200 มิลลิลิตร

นำส่วนผสมทั้งสามมาผสมให้เข้ากัน กรองเอาตะกอนออก นำไปนิ่งฆ่าเชื้อโดยหม้ออบไอน้ำความดัน เก็บสต็อกในลักษณะแช่แข็ง เมื่อต้องการนำมาใช้ให้นำสต็อก 1 มิลลิลิตร ผสมอาหาร 100 มิลลิลิตร และย้ายสาหร่ายลงในอาหารนี้ ทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อสาหร่ายลงไปเลี้ยงในอาหารใหม่ซึ่งไม่เติมยาปฏิชีวนะ

สูตร 2 สารละลายสต็อก ประกอบด้วย	K- pennicilin	12,000 หน่วย
	chloramphenicol	50 ไมโครกรัม
	polymycin	50 ไมโครกรัม
	peomycin	60 ไมโครกรัม

นำด้วยยาทั้งสี่มาผสมให้เข้ากันจะได้สารละลายประมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นกรองตะกอนออก นำสารละลายสต็อกไปหนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้ออบไอน้ำความดัน เมื่อต้องการนำมาใช้ให้ผสมสต็อก 1.5 มิลลิลิตร ลงในอาหาร 100 มิลลิลิตร เลี้ยงสาหร่ายที่ต้องการฆ่าเชื้อในอาหารนี้นาน 7 วัน จากนั้นจึงย้ายสาหร่ายลงอาหารปกติ อาหารนี้ช่วยกำจัดแบคทีเรียของสาหร่ายที่มีเมือกหุ้ม แต่อาจทำให้รูปร่างของเซลล์เปลี่ยนไปได้

5.2.3. เทคนิคการใช้แสงอุลตราไวโอเลต (UV light technique) วิธีนี้ใช้สำหรับกำจัดแบคทีเรีย ซึ่งสาหร่ายสามารถทนแสงนี้ได้ดีในระดับหนึ่งซึ่งขึ้นกับชนิดสาหร่ายด้วย โดยใช้แสง UV ขนาด 2750 อังสตรอม วางหลอดแสง UV เหนือภาชนะเลี้ยงสาหร่ายประมาณ 25 เซนติเมตร ใช้เวลานาน 8-16 นาที จากนั้นย้ายสาหร่ายจากจานวันไปเลี้ยงในอาหารเหลว ส่วนใหญ่แล้วจะฆ่าเชื้อสาหร่ายที่เลี้ยงบนจานอาหารวัน เพราะสาหร่ายจะอยู่ในระนาบเดียวกัน และได้รับแสงในระดับใกล้เคียงกัน แต่ถ้าสาหร่ายเลี้ยงในหลอดจะไม่เหมาะสมกับวิธีนี้ เพราะสาหร่ายจะอยู่ในระดับความลึกที่ต่างกันหลายระดับ จึงได้รับแสงที่ไม่เท่ากัน แสงอาจมากเกินไปสำหรับสาหร่ายที่อยู่ใกล้ปากหลอด และอาจน้อยเกินไปต่อสาหร่ายที่อยู่ก้นหลอด จึงทำให้การคำนวณระยะเวลาในการให้แสง UV ทำได้ยาก

5.2.4. เทคนิคการกรอง (filtration technique) ใช้ membrane filter แยกสาหร่ายเส้นสายออกจากแบคทีเรีย โดยตัดสาหร่ายเป็นท่อนสั้น ๆ ใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว และนำไปใส่ในกรวยกรองที่มีกระดาษกรองขนาด 8 ไมครอน อุปกรณ์นี้ต่อกับปั๊มสุญญากาศ ทำการกรอง นำสาหร่ายที่ใส่ติดบนกระดาษกรองไปใส่ในอาหารที่สะอาด ล้าง และทำการกรองใหม่โดยใช้กระดาษกรองอันใหม่ ทำซ้ำจนสาหร่ายสะอาด นำสาหร่ายที่สะอาดแล้วใส่ในฟลาสก์อาหารวันที่ยังเหลว เขย่าให้สาหร่ายกระจาย จากนั้นเทอาหารวันลง petri dish ทิ้งไว้ 2-3 วัน ตัดวันที่มีสาหร่ายขึ้นอยู่ออกเป็นชิ้น ย้ายไปใส่อาหารเหลวทำการเลี้ยงต่อไป

6. การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเชื้อสาหร่าย

เพื่อตรวจสอบว่าสาหร่ายสะอาดปราศจากแบคทีเรียเจือปน (testing for purify) วิธีการทำได้โดยเลี้ยงสาหร่ายในอาหารมาตรฐานสำหรับเลี้ยงแบคทีเรีย 6 ชนิด อาหารแบคทีเรียได้แก่ nutrient broth, yeast-dextrose agar, proteose peptone agar, malt agar, sodium casinate agar และ thioglycollate agar จากนั้นดูการเปลี่ยนแปลงของอาหารเลี้ยงแบคทีเรียว่ามีแบคทีเรียขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่มีแบคทีเรียขึ้นแสดงว่าสาหร่ายสะอาดพอนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที แต่ถ้าอาหารเลี้ยงเชื้อมีการเปลี่ยนแปลงเช่นมีแบคทีเรียขึ้นบนอาหารวัน หรือมีฟองอากาศ

เอกสารนี้เผยแพร่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของกรมวิทยาศาสตร์สาธารณสุข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

อาหารเหลวมีความชุ่มแสดงว่ายังมีแบคทีเรียปนอยู่กับสาหร่าย ซึ่งต้องนำสาหร่ายไปทำการฆ่าเชื้อใหม่อีกครั้งหนึ่ง ส่วนการตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียที่ปนนั้นมีวิธีการที่เฉพาะลงไป (อ่านได้จากคู่มือวิชาโรคสัตว์น้ำ ซึ่งในทางสาหร่ายไม่จำเป็นต้องทราบว่าแบคทีเรียที่ปนคือชนิดใดก็ได้)

7. การฆ่าเชื้อ

ในการเลี้ยงสาหร่ายนั้นภาชนะทุกชิ้นที่ใช้ทั้งหมด micropipette ที่ใช้แยกสาหร่าย แผ่นสไลด์ที่ใส่หยดน้ำ หลอดเลี้ยงสาหร่าย สารอาหาร ต้องทำการฆ่าเชื้อ (sterilization) โดยใช้หม้ออบไอน้ำความดัน ที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อป้องกันการปนของแบคทีเรีย และเทคนิคทุกขั้นตอนที่ใช้ต้องเป็นแบบปลอดเชื้อ (aseptic technique)

8. การเก็บรักษาเชื้อสาหร่าย

สำหรับการเก็บรักษาเชื้อสาหร่าย (culture maintenance) นั้นต้องเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายและอุปกรณ์เครื่องใช้ในการแยกเชื้อและการเลี้ยงสาหร่ายให้พร้อม ในกรณีที่ไม่ได้แยกหัวเชื้อโดยตนเองแต่ไปขอหัวเชื้อสาหร่ายมาจากแหล่งอื่นที่ได้ทำการแยกหัวเชื้อไว้เรียบร้อยแล้ว การขนส่งหัวเชื้อต้องใส่ในภาชนะแก้วที่ปิดสนิทและควรมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับแหล่งที่เลี้ยงหัวเชื้อเดิม เมื่อนำหัวเชื้อมาถึงห้องปฏิบัติการให้นำขวดหัวเชื้อมาคลายจุกที่ปิดออก ทิ้งไว้ในที่สลัวหรือรีบเปลี่ยนอาหารทันที โดยใช้อาหารเลี้ยงสาหร่ายที่เป็นสูตรเดิมกับที่เลี้ยงหัวเชื้อไว้ และอาหารควรเจือจางกว่าปกติเพื่อให้สาหร่ายค่อย ๆ ปรับตัวหลังจากถูกเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมระหว่างการขนส่งและสาหร่ายจะสามารถปรับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยความเข้มข้นอาหารควรเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของปกติ การเก็บรักษาหัวเชื้อพันธุ์สาหร่ายทำโดยค่อยเปลี่ยนน้ำเลี้ยงเมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตเต็มที่ถ้าไม่ทำการเปลี่ยนอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายจะตายหมด ซึ่งโดยปกติแล้วควรเปลี่ยนอาหารสาหร่ายใหม่ทุก 2 สัปดาห์ อาจทำให้ชำรุดได้โดยเลี้ยงที่อุณหภูมิประมาณ 5-10 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงประมาณ 200-500 ลักซ์ หรือใช้อาหารที่เจือจางกว่าปกติ การเลี้ยงบนอาหารวันจะเก็บในตู้เย็นได้นาน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงสาหร่าย

1. ปัจจัยทางกายภาพ

1.1. แสงสว่าง เป็นปัจจัยที่ช่วยให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี สาหร่ายในแต่ละกลุ่ม แต่ละชนิดมีความต้องการแสงในปริมาณที่ไม่เท่ากัน สาหร่ายบางชนิดได้รับแสง 24 ชั่วโมง จะเจริญได้ดีที่สุด สาหร่ายบางชนิดได้รับแสง 12 ชั่วโมงและมีมืด 12 ชั่วโมงจะเจริญได้ดี และในชนิดอื่นก็จะต่างกันไป สำหรับความเข้มแสงสาหร่ายแต่ละชนิดมีความต้องการในระดับที่ต่างกัน บางกลุ่มอาจต้องการความเข้มแสงที่ 300 ลักซ์ แต่บางกลุ่มอาจต้องการถึง 5000 ลักซ์ ดังนั้นในการเลี้ยงสาหร่ายแต่ละชนิดต้องมีการหาข้อมูลความเหมาะสมของสาหร่ายของแต่ละกลุ่มก่อน สำหรับการถ่ายเชื้อสาหร่ายจากสต็อก (stock) ไปเลี้ยงในที่ใหม่ควรใช้หัวเชื้อในปริมาณน้อย วางหลอดในที่ที่มีแสงประมาณ 4300 ลักซ์ นาน 7-10 วัน เพื่อให้เจริญเติบโตเต็มที่ ในช่วงเริ่มต้นจากนั้นจึงย้ายหลอดเลี้ยงสาหร่ายไปวางในที่ที่มีแสงน้อยลงกว่าเดิม เพื่อให้การเจริญเติบโตลดลงและเก็บหัวเชื้อได้นาน

1.2. อุณหภูมิ ในการเลี้ยงสาหร่ายนั้นอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กำหนดการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งสาหร่ายในแต่ละชนิดแต่ละกลุ่มก็จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกันไป ซึ่งต้องทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง แต่ส่วนใหญ่สาหร่ายชนิดที่ทำการศึกษาไว้แล้วจะเป็นสาหร่ายที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจเท่านั้น ดังนั้นถ้าเลี้ยงสาหร่ายบางชนิดที่ยังไม่มีการศึกษาค่าที่เหมาะสมไว้ให้พิจารณาจากประเภทของสาหร่าย โดยถ้าเป็นสาหร่ายน้ำจืดจะเหมาะกับการเลี้ยงที่อุณหภูมิประมาณ 15-25 องศาเซลเซียส และถ้าเป็นสาหร่ายน้ำเค็มจะเหมาะกับการเลี้ยงที่ประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส

1.3. วัสดุยึดเกาะหรือ substrate เป็นปัจจัยกายภาพที่มีผลต่อสาหร่ายขนาดใหญ่ ซึ่งพบว่าชนิดสาหร่ายแปรผันตามชนิดที่ยึดเกาะต่าง ๆ เช่น ลักษณะเป็นหิน กรวด ทราย โคลน ชากพืช ดังนั้นในการเลี้ยงต้องเลือกประเภทที่ยึดเกาะให้เหมาะสมกับสาหร่าย โดยต้องพิจารณาจากแหล่งธรรมชาติว่าสาหร่ายนั้นเจริญเติบโตอยู่ในบริเวณใด ใช้วัสดุยึดเกาะแบบใด และนำมาดัดแปลงในบ่อเลี้ยง

1.4. แรงดัน (pressure) พบว่าสาหร่ายขนาดใหญ่พวกที่มี air bladder/ pneumatocyst จะอยู่ได้ในที่ลึกที่ระดับจำกัดช่วงระยะความลึกหนึ่งเท่านั้น ถ้าลึกเกินไปแรงดันน้ำจะดันแก๊สใน pneumatocyst บางชนิดรูปร่างของ pneumatocyst จะเปลี่ยนตามระดับความลึก โดยถ้าอยู่ในที่ตื้นจะมีลักษณะกลม ถ้าอยู่ในที่ลึกจะมีลักษณะเป็นรูปลูกแพร์ ดังนั้นน้ำในบ่อเลี้ยงควรอยู่ในระดับความลึกที่เหมาะสมกับสาหร่ายแต่ละชนิด

2. ปัจจัยทางเคมี

เป็นปัจจัยที่เกี่ยวกับธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการและปัจจัยทางเคมีอื่น ๆ เช่นพีเอช ความเค็ม โดยการเติบโตของสาหร่ายขึ้นกับอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเป็นหลักซึ่งต่างกันไปตาม ชนิดของสาหร่าย ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบ่งเป็น 2 กลุ่ม หลัก ๆ คือ

2.1. ธาตุอาหารหลัก (macronutrients) เป็นส่วนที่จะประกอบเป็นโครงสร้างของสาหร่าย จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก (หน่วยมักเป็นกรัมต่อลิตร)

C - คาร์บอนที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่ายจะใช้ในรูปอนินทรีย์คาร์บอน ซึ่งคาร์บอนจะอยู่ในรูปใดนั้นขึ้นกับระดับพีเอชของอาหารด้วย อนินทรีย์คาร์บอนที่ใช้จะอยู่ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ (พีเอชของน้ำประมาณ 5) กลีโคคาร์บอเนต (พีเอชของน้ำมากกว่า 9.5) และไบคาร์บอเนต (พีเอชของน้ำประมาณ 7-9) และใช้คาร์บอนในรูปอินทรีย์คาร์บอนด้วย โดยอินทรีย์คาร์บอนจะช่วยให้การเจริญเติบโต อินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ เช่นน้ำตาลซูโครส กลูโคส กาแลกโตส ปกติแล้วสาหร่ายต้องการอินทรีย์คาร์บอนในสภาพไร้แสง และไร้อากาศ

N - ไนโตรเจน มีหน้าที่หลักคือช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสง สร้างรงควัตถุ ช่วยในกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ โดยทั่วไปไนโตรเจนมีประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ (ยกเว้นไดอะตอมจะมีน้อยกว่ากลุ่มอื่น) สาหร่ายที่ขาดไนโตรเจนจะสร้างสารประกอบคาร์บอนขึ้นมาทดแทน เช่นสร้างขึ้นมาในรูปของน้ำมัน หรือแป้ง การใช้ไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงสาหร่ายจะใช้ในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น urea, amide, glutamine, asparagine, amino (รูปอื่น ๆ เช่น กรดอะมิโน กรดกลูตามิก และกรดแอสพาทิก) และในรูปอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น กลีโคโนเตรท ไนไตรท์ (สาหร่ายต้องการในปริมาณน้อย) แอมโมเนีย (อนินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียจะทำให้ระดับพีเอชลดลงเร็ว) และรูปแก๊สไนโตรเจน (เฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเท่านั้นที่สามารถนำไปใช้ได้)

P - ฟอสฟอรัส เกี่ยวข้องกับขบวนการถ่ายทอดพลังงาน ขบวนการสร้างกรดนิวคลีอิกของสาหร่าย โดยทั่วไปสาหร่ายต้องการใช้ฟอสฟอรัสในรูปของอนินทรีย์ฟอสฟอรัส (แต่ในน้ำธรรมชาติมีอยู่ในรูปของอินทรีย์ฟอสฟอรัสมากกว่า) ถ้าขาดฟอสฟอรัสจะทำให้ปริมาณโปรตีน คลอโรฟิลล์-เอ RNA, DNA ของสาหร่ายลดลง ส่วนปริมาณแป้ง คาร์โบไฮเดรตจะเพิ่มขึ้น ทำให้รูปร่างเซลล์ของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงไป

S - ซัลเฟอร์มีความจำเป็นต่อสาหร่ายทุกชนิด ซัลเฟอร์ในสาหร่ายจะอยู่ในกรดอะมิโน vitamin-B, pantothenic acid, lipoic acid ส่วนใหญ่สาหร่ายจะใช้ซัลเฟอร์ในรูปสารอนินทรีย์คือใช้รูปกลีโธของ ซัลเฟต ซัลไฟท์ ซัลไฟด์โยชน์ด้านการค้า

Ca - แคลเซียม มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ไดอะตอม โดยใช้แคลเซียมในการสร้าง scale สร้างโครงสร้างของเซลล์สาหร่ายโดยเฉพาะสาหร่ายน้ำเค็ม และสร้างผนังเซลล์ สืบพันธุ์ของเพศผู้ ปริมาณแคลเซียมที่สาหร่ายต้องการขึ้นกับปริมาณธาตุอาหารอื่นด้วย เช่น Mg, Fe, Zn, Co, Cu, Mo, Ni, Al, Na, Hg, Ag, Pb

Na, K, Cl₂ : Na - โซเดียม สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินต้องการโซเดียมมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น โดยใช้เกี่ยวกับกิจกรรมของเอนไซม์ (ในกรณีที่แหล่งน้ำขาด K สามารถใช้ Na แทน K ได้); K - โพแทสเซียม ใช้เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ของสาหร่าย ซึ่งอัตราส่วนของ Na:K มีผลต่อการใช้ Cl₂ คลอรีน ของสาหร่าย

Mg - แมกนีเซียม มีผลเกี่ยวกับขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์สาหร่าย

2.2. ธาตุอาหารรอง (micronutrients) สาหร่ายต้องการใช้ในปริมาณน้อย (มักมีหน่วยที่ใช้เป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) โดยธาตุอาหารรองแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1. ธาตุรองอนินทรีย์ (inorganic micronutrients)

Fe - เหล็ก ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจนของสาหร่าย ช่วยในขบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ช่วยสร้างคลอโรฟิลล์-เอ phycocyanin ถ้าสาหร่ายขาดเหล็กจะมีผลต่อการเจริญเติบโต และสีเขียวของเซลล์ โดยทั่วไปเหล็กมักตกตะกอนในสารละลายจึงต้องใส่สารกันการตกตะกอน (chelating agent) เช่น EDTA, citric acid เพื่อกันไม่ให้เหล็กตกตะกอน สาหร่ายจึงนำไปใช้ได้

Bo - โบรอน ยังไม่ทราบหน้าที่ที่แน่ชัดของโบรอนแต่พบว่าเมื่อใส่โบรอนลงไปในการเลี้ยงสาหร่ายแล้วสาหร่ายบางชนิดเจริญเติบโตได้ดีกว่าอาหารที่ไม่ได้ใส่โบรอนมาก โดยใช้โบรอนในสาหร่ายบางกลุ่มเท่านั้นเช่น สาหร่ายพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ไดอะตอมต้องการใช้

Mn, Cu, Zn : แมงกานีส ทองแดง สังกะสี เป็นองค์ประกอบสำคัญของการสังเคราะห์ด้วยแสง องค์ประกอบเอนไซม์ ถ้าขาดสารอาหารพวกนี้จะทำให้มีการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายลดลง การหายใจเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีสารอาหารพวกนี้มากเกินไปสาหร่ายจะตาย (เมื่อมีการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงอาหารที่สร้างขึ้นของสาหร่ายจะลดลง สาหร่ายไม่สามารถเจริญเติบโตหรือขยายพันธุ์ได้)

Mo, Va, Co, Ni : Mo-โมลิบดีนัม มีหน้าที่ตรึงไนโตรเจน (ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) เป็นส่วนประกอบเอนไซม์ในการสังเคราะห์ด้วยแสง Va-วานาเดียม มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของ *Spirulina* (ใช้แทน Mo ในการตรึง N ได้) Co-โคบอล เป็นส่วนประกอบสำคัญของ vitamin B 12 ซึ่งมีความสำคัญ

ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย Ni-นิกเกิล มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์ยูเรียของสาหร่ายบางชนิด เช่น ไดอะตอมและสาหร่ายสีเขียวบางสกุล เช่น *Tetraselmis*

- Si - ซิลิกา จำเป็นต่อสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมโดยนำไปใช้ในการสร้างผนังเซลล์
- Se - เซเลเนียม สาหร่ายบางชนิดต้องการใช้เซเลเนียมเพื่อการเจริญเติบโต เช่น สาหร่ายพวกไดโนแฟลเจลเลตน้ำจืด ในแหล่งน้ำธรรมชาติถ้ามีปริมาณเซเลเนียมมากจะพบว่ามีสาหร่ายในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และไดอะตอมน้อย

2.2.2. ธาตุรองอินทรีย์ (organic micronutrient) เป็นส่วนที่เรียกว่า trace metal เป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อสาหร่าย มี 4 กลุ่มย่อย ได้แก่

- carbohydrate - คาร์โบไฮเดรต ได้แก่พวกน้ำตาลต่าง ๆ เช่นน้ำตาล dextrose ใช้ 0.2-0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยการใส่ในอาหารเลี้ยงสาหร่ายจะต้องใส่หลังจากการนิ่งฆ่าเชื้อแล้วมิฉะนั้นสารอาหารพวกนี้จะสลายตัวไปไม่ได้ใช้ประโยชน์
- เกลืออินทรีย์หรือสารประกอบที่มีเกลืออินทรีย์ เช่น เกลืออะซิเตท โซเดียมอะซิเตท โพแทสเซียมอะซิเตท โดยใช้ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์
- vitamin - B1, B12, B-complex วิตามินพวกนี้จะเติมในอาหารเลี้ยงสาหร่ายหลังการนิ่งฆ่าเชื้อแล้วเพื่อไม่ให้เสื่อมคุณภาพไปในระหว่างนิ่งฆ่าเชื้อ
- อาหารเสริม (growth factor) เช่นพวก
 - adenin (ละลายได้ดีในโซเดียมไบคาร์บอเนต)
 - kinetin, gibberellic acid (ละลายน้ำ)
 - indol acetic acid (IAA) - ละลายได้เล็กน้อยในน้ำร้อนและสลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกแสงสว่าง

2.3. ระดับของพีเอชของอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยเมื่อจะเลี้ยงสาหร่ายใดจะต้องทำการศึกษาหรือตรวจสอบเอกสารก่อนว่าสาหร่ายนั้นต้องการค่าพีเอชที่ระดับใดเพื่อให้สาหร่ายเจริญได้ดี เพราะค่าพีเอชมีผลต่อการใช้สารอาหารจากอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายด้วย โดยพบว่าในอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายในหลาย ๆ สูตร ต้องทำการปรับค่าพีเอชให้ได้ในระดับหนึ่งเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำสารอาหารไปใช้ของสาหร่าย โดยทั่วไปแล้วสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเจริญเติบโตได้ดีที่ พีเอช 6.5-7.5 ส่วนสาหร่ายในกลุ่ม desmid จะเจริญเติบโตได้ดีที่ พีเอช ประมาณ 5.5-6.5 สาหร่ายอื่น ๆ ส่วนมากจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่เป็นต่าง

2.4. ความเค็ม สาหร่ายทะเลส่วนใหญ่จะเลี้ยงในความเค็มที่เหมาะสมคือ 28-30 พีพีที หรือเลี้ยงที่ระดับความเค็มเดียวกับจากแหล่งในธรรมชาติที่เราทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายมา ส่วนสาหร่ายน้ำจืดจะเลี้ยงที่ความเค็ม 0 พีพีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใบที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

2.5. ปัจจัยอื่น ๆ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ปัจจัยนี้มีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งมีผลต่อค่าความเป็นกรด ต่างของน้ำด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าความกระด้างของน้ำ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสาหร่าย เช่น การนำสารอาหารไปใช้ การหายใจ แต่ไม่มากเท่ากับปัจจัยอื่น ๆ ที่กล่าวมา

วิธีวัดการเจริญเติบโตและชีวมวล

1. การนับเซลล์

การนับเซลล์ (cell counts) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากเพราะอุปกรณ์สามารถหาได้ง่ายและเป็นวิธีที่ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด อุปกรณ์ที่ใช้คือกล้องจุลทรรศน์ counting slide (Sedgewick-Rafter counting chamber ความจุ 1 มิลลิลิตร, haematometer ความจุ 0.004 มิลลิลิตร) วิธีการคือเริ่มจากล้างสไลด์ให้สะอาด เช็ดสไลด์ให้แห้ง หยดตัวอย่างสาหร่ายลงบนสไลด์ (ถ้าเป็นสาหร่ายพวกที่ เคลื่อนที่ได้ควรต้องด้วยฟอรัมาลินหรือลูกกลก่อนจะสะดวกในการนับ) รีบปิดกระจกปิดสไลด์ (cover glass) โดยต้องระวังไม่ให้มีฟองอากาศ (ถ้ามีฟองอากาศต้องทำการเตรียมสไลด์ใหม่ เพราะจะทำให้ค่าการนับจำนวนเซลล์ผิดพลาดได้) รอให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอน 4-6 นาที ดูการกระจายตัวของสาหร่ายบนแผ่นสไลด์ว่าสม่ำเสมอหรือไม่ หรือหนาแน่นเกินไป ถ้าการกระจายตัวสม่ำเสมอดีแล้วให้ทำการนับเซลล์สาหร่ายได้เลย (ถ้าเซลล์สาหร่ายหนาแน่นเกินไปจนนับไม่ได้ให้ทำการเตรียมสไลด์ใหม่โดยทำการเจือจางตัวอย่างสาหร่ายด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำเค็มซึ่งขึ้นกับประเภทสาหร่ายก่อน หรือถ้าเซลล์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอก็ให้ทำการเตรียมสไลด์ใหม่) การนับเซลล์สาหร่ายอีกแบบคือใช้อุปกรณ์นับไฟฟ้า coulter counter ใช้กับเซลล์สาหร่ายชนิดที่มีรูปร่างกลมไม่เป็นเส้นสาย และใช้กับสาหร่ายที่มีความสะอาดไม่มีตะกอนอื่นเจือปน

2. การวัดการกระจายของแสงหรือความขุ่น

การวัดการกระจายของแสงหรือความขุ่น (light scattering or turbidity) นิยมใช้มากที่สุดกับสาหร่ายที่บริสุทธิ์ เพราะเป็นวิธีที่ทำการวัดได้ง่าย สะดวก ใช้ระยะเวลาสั้นมาก อุปกรณ์ที่ใช้คือ colorimeter หรือ spectrophotometer โดยมีหลักการคือจำนวนเซลล์สาหร่ายจะมีความสัมพันธ์ผกผันกับความเข้มแสงที่ส่องผ่าน เมื่อจำนวนเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นความเข้มแสงที่ส่องผ่านจะลดลง ถ้าสาหร่ายที่เลี้ยงมีเชื้อแบคทีเรียเจือปนจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้เพราะจะทำให้ค่าแสงที่ส่องผ่านมีความผิดพลาด และค่าความยาวคลื่นแสงของสาหร่ายแต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันจะต้องมีการตรวจเอกสาร หรือทดลองหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก่อน วิธีนี้ควรทำคู่กับวิธีการหาค่าน้ำหนักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีบทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวัดน้ำหนักแห้ง

การวัดน้ำหนักแห้ง (dry weight measurement) เหมาะกับสาหร่ายพวกที่เป็นเส้นสายหรือสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่ ถ้าเป็นสาหร่ายเส้นสายหรือสาหร่ายขนาดเล็กทำโดยนำตัวอย่างสาหร่ายมาใส่ในหลอดสำหรับปั่น (โดยต้องชั่งน้ำหนักของหลอดที่อบแห้งไม่มีความชื้นเจือปนไว้ก่อน) นำมาปั่นให้สาหร่ายตกตะกอน รินน้ำใส่ตลับบนอก นำหลอดที่มีตัวอย่างสาหร่ายไปอบแห้ง หรือใช้การกรองผ่านกระดาษกรองแทนการปั่น (ต้องทำการชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่อบแห้งไว้ก่อนนำมาใช้) โดยนำสาหร่ายมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างสาหร่ายบนแผ่นกรองให้สะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน แล้วนำกระดาษกรอง (หรือหลอดปั่นสาหร่าย) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70-110 องศาเซลเซียส นาน 10-12 ชั่วโมง แล้วนำกระดาษ (หรือหลอดปั่น) ใส่ในโถดูดความชื้น (desiccator) นาน 15-30 นาที นำไปชั่งหาน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรหรือต่อพื้นที่ของน้ำที่ทำการเก็บตัวอย่าง โดยนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้หลังอบลบด้วยค่าน้ำหนักของกระดาษกรองหรือหลอดที่ใช้ปั่น จะได้ค่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายที่แท้จริง ทำการวัดผลทุกวันนำมาทำกราฟ การรายงานผลจะรายงานเป็นน้ำหนักแห้งของสาหร่ายต่อปริมาตรน้ำหรือต่อพื้นที่น้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายมา

4. การวัดค่าคลอโรฟิลล์

การวัดค่าคลอโรฟิลล์ (chlorophyll determination) สำหรับสาหร่ายขนาดเล็กทำได้โดยนำตัวอย่างสาหร่ายมาปั่นให้ตกตะกอน รินน้ำใส่ส่วนบนอก ทำการสกัดสารสีโดยเติมสารเคมีที่นิยมได้แก่ acetone, methanol, ether เมื่อสกัดสารสีแล้วกรองอีกครั้งหนึ่ง กำจัดตะกอน นำสารละลายที่กรองได้ใส่ในหลอดแก้วที่สะอาดสำหรับวัดคลอโรฟิลล์โดยทำการวัดที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ คือความยาวคลื่น 630, 645, 663 นาโนเมตร และคำนวณค่าคลอโรฟิลล์แต่ละค่าโดย -

chlorophyll a (มิลลิกรัมต่อลิตร) = $11.64 \text{ OD}_{663} - 2.16 \text{ OD}_{645} - 0.10 \text{ OD}_{630}$

chlorophyll b (มิลลิกรัมต่อลิตร) = $20.79 \text{ OD}_{645} - 3.94 \text{ OD}_{663} - 3.66 \text{ OD}_{630}$

chlorophyll c (มิลลิกรัมต่อลิตร) = $54.22 \text{ OD}_{630} - 14.81 \text{ OD}_{645} - 5.53 \text{ OD}_{663}$

5. วัดปริมาตรเซลล์สาหร่าย

วัดปริมาตรเซลล์สาหร่าย (cell volume) โดยนำตัวอย่างสาหร่ายมาใส่ในหลอดสำหรับปั่นที่มีสเกลบอกระดับปริมาตรอยู่ข้างหลอด นำหลอดไปปั่นให้สาหร่ายตกตะกอน ทำการวัดปริมาตรสาหร่ายโดยอ่านจากสเกลข้างหลอดปั่น

6. การชั่งน้ำหนักสาหร่าย

การชั่งน้ำหนักสาหร่าย (weigh) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่ โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายมาชั่งน้ำเบา ๆ ให้หมดหรือแห้ง และทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำสาหร่ายกลับไปเลี้ยงไว้ที่เดิม และเมื่อต้องการวัดผลในครั้งต่อไปก็ให้นำสาหร่ายต้นเดิมกลับมาชั่งใหม่ วิธีเช่นนี้ควรมีความสม่ำเสมอในการชั่งน้ำหนักให้เท่ากันทุกครั้งไม่ควรให้ปริมาณน้ำที่เหลือติดบนสาหร่ายแตกต่างกันมากเพราะจะทำให้น้ำหนักผิดพลาดได้

7. วัดความยาว

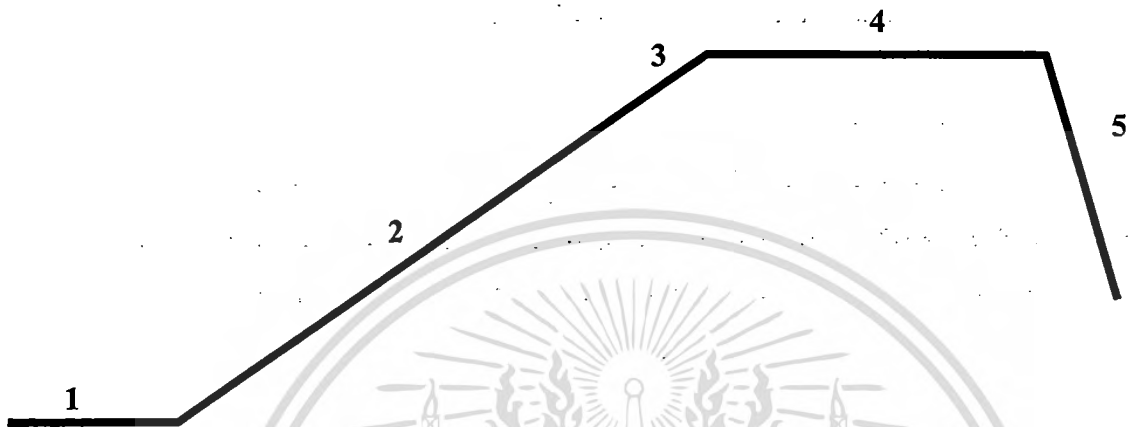
วัดความยาว (length) วิธีนี้เหมาะสมกับสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่และมีการเจริญในทางความยาวมากกว่าความกว้าง โดยทำการวัดความยาวของสาหร่ายตามระยะเวลาที่ต้องการอาจเป็นทุกสัปดาห์ สองสัปดาห์ หรือทุกหนึ่งเดือน วิธีนี้อาจไม่ต้องเก็บสาหร่ายมาในห้องปฏิบัติการถ้าเราสามารถวัดได้จากที่เพาะเลี้ยงโดยตรง

8. วิธีวัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย และกราฟการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายและการทำกราฟการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นทำเพื่อใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการเลี้ยงสาหร่ายและทำเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำนายวันที่จะต้องทำการถ่ายหัวเชื้อไปลงอาหารใหม่ (subculture) วันที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ การทำกราฟการเจริญเติบโตทำได้โดยใช้ข้อมูลจากการวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายด้วยวิธีต่าง ๆ มาทำเป็นกราฟ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลน้ำหนักแห้ง จำนวนเซลล์ คลอโรฟิลล์ หรืออื่น ๆ โดยนำข้อมูลนี้ไว้ในแกน X และในแกน Y ให้เป็นข้อมูลของเวลา ซึ่งส่วนใหญ่นิยมทำเป็นวัน จากนั้นนำมาทำเป็นกราฟการเจริญเติบโต โดยกราฟที่ได้จะแบ่งเป็น สี่หรือห้าระยะคือ (ภาพที่ 1)

1. lag phase เป็นระยะแรกสุด เป็นระยะที่สาหร่ายปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ ระยะนี้ยังไม่มี การแบ่งเซลล์หรือมีแต่น้อยมาก จำนวนเซลล์จะค่อนข้างคงที่
2. exponential phase เป็นระยะที่สอง ระยะนี้สาหร่ายเจริญเติบโตและแพร่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วจะเห็นเส้นกราฟเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว
3. retardation phase/late exponential phase เป็นระยะที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตช้าลงเพราะเริ่มขาดอาหาร เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดต่อการเติมอาหารใหม่ และเป็นช่วงที่เหมาะสมในการนำหัวเชื้อไปทำ subculture (ในตำราบางเล่มจะไม่มีระยะนี้)
4. stationary phase เป็นระยะที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายหยุดนิ่งจำนวนเซลล์ค่อนข้างคงที่หรือลดลงเล็กน้อย และเกิดสารพิษจาก metabolism ของสาหร่าย ช่วงเริ่มต้นของระยะนี้เป็นช่วงที่เหมาะสมในการเก็บผลผลิตเพราะเป็นช่วงที่ให้ผลผลิตได้สูงสุด

5. death phase เป็นระยะที่เซลล์สาหร่ายเริ่มมีการตาย หยุดการเจริญเติบโต เนื่องจากอาหารหมดจากนั้นจะเกิดการเน่าสลายของสาหร่าย



ภาพที่ 1 ระยะการเจริญเติบโต (growth curve) ของสาหร่าย

ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดคือการทำให้อาหารอยู่ในระยะ exponential นานที่สุดซึ่งทำได้โดยการย้ายเชื้อ ไปใส่ภาชนะที่ใหญ่ขึ้น โดยทำการย้ายก่อนเข้า stationary phase เล็กน้อย หรือโดยการเลี้ยงแบบต่อเนื่อง (continuous culture) เลี้ยงให้ได้เท่าเดิมเป็นระยะเวลานานโดยมีการเติมอาหารทีละน้อยลงไปเรื่อย ๆ หรือโดยการเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous culture) เลี้ยงจนความหนาแน่นมาก แบ่งบางส่วนของสาหร่ายไปใช้ และเติมอาหารเลี้ยงสาหร่ายลงไปใหม่เพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโต

9. วิธีการเก็บผลผลิตสาหร่าย

เมื่อเลี้ยงสาหร่ายจนเจริญเติบโตเต็มที่และต้องการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่าย หากเป็นสาหร่ายขนาดเล็กการเก็บเกี่ยวสามารถทำได้โดยวิธีการกรองโดยอาจใช้ถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตาที่เล็กกว่าเซลล์สาหร่าย หรือถ้าสาหร่ายมีขนาดใหญ่อาจใช้ผ้าขาวบางซ้อนกัน 2-3 ชั้น เพื่อกรองสาหร่าย หรืออาจใช้วิธีเข้าเครื่อง centrifuge ซึ่งเหมาะกับสาหร่ายที่มีขนาดเล็กมาก ๆ หรืออาจใช้สารเคมีทำให้สาหร่ายรวมกลุ่มและตกตะกอนก่อนและนำมากรองด้วยผ้ากรอง ส่วนสาหร่ายทะเลที่มีขนาดใหญ่จะทำการเก็บจากภาชนะที่เลี้ยงหรือบ่อที่เลี้ยงได้โดยตรงไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

10. ข้อคิดในการเลี้ยงสาหร่าย

พันธุ์ที่เหมาะสม ในการเลี้ยงสาหร่ายควรหาชนิดพันธุ์สาหร่ายที่เข้ากับสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ที่เลี้ยงได้ดี ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ชนิดที่เป็นสายพันธุ์ในท้องถิ่น (local strains) เพราะจะเหมาะสมที่สุดกับสภาวะแวดล้อมนั้น ๆ ไม่ต้องมีการปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่จะทำให้มีการเจริญเติบโตได้เต็มที่

การเก็บรักษาสต็อกหัวเชื้อของสาหร่าย เมื่อทำการแยกสาหร่ายชนิดที่ต้องการจากธรรมชาติได้แล้วหรือเมื่อนำหัวเชื้อสาหร่ายมาจากแหล่งอื่นเรียบร้อยแล้ว จะต้องมีการเก็บรักษาหัวเชื้อไว้ให้มีชีวิตอยู่ตลอด เพื่อไม่ต้องทำการแยกหัวเชื้อจากธรรมชาติใหม่ ซึ่งเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก ใช้เวลานาน โดยเมื่อเลี้ยงไว้ได้ระยะหนึ่งจะต้องมีการ subculture หรือถ่ายหัวเชื้อบางส่วนไปลงในอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้เจริญเติบโตต่อไป เพราะถ้าไม่ถ่ายไปสู่อาหารใหม่เมื่อเลี้ยงนานไปสาหร่ายจะเพิ่มจำนวนขึ้นมากจนเต็มที่ใช้สารอาหารจากอาหารจนหมดจากนั้นจะเริ่มมีการตาย ถ้าไม่ได้รับอาหารใหม่สาหร่ายก็จะตายจนหมด ดังนั้นเมื่อสาหร่ายโตเต็มที่จะต้องแบ่งหัวเชื้อบางส่วนไปเลี้ยงใหม่ทันที

มีความรู้เรื่องสภาพการเลี้ยง สภาพที่เหมาะสมต่อสาหร่ายแต่ละชนิด เช่น อุณหภูมิ ความเค็ม ความเข้มแสง อาหารที่เหมาะสมต่อสาหร่าย อากาศ เพื่อจัดสภาพให้เหมาะสมต่อสาหร่ายชนิดนั้น ๆ จะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ตามที่ต้องการ

สามารถทำนายพัฒนาการของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ โดยจะต้องทราบว่สาหร่ายจะมีปริมาณสูงสุดวันที่เท่าไร จะหยุดการเจริญเติบโตและตายวันที่เท่าไร เพื่อจะสามารถทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตในวันที่ได้ผลผลิตสูงสุดและเพื่อทำการถ่ายหัวเชื้อสาหร่ายก่อนที่สาหร่ายจะอ่อนแอตายไป ซึ่งการที่จะทราบข้อมูลเหล่านี้จะต้องทำการศึกษาการเจริญเติบโตตั้งแต่เริ่มแรกไว้ก่อนทำการศึกษากาแฟการเจริญเติบโต และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานต่อไปในการทำนาย

ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

เนื่องจากความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายชนิดนั้น ๆ^[44] ดังนั้นหากต้องการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อนำไปใช้กำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ควรเลี้ยงสาหร่ายในสภาวะที่สาหร่ายนั้นสร้างปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ได้สูง

ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งส่วน CPS (ส่วนที่หุ้มติดกับผนังเซลล์) และ EPS (ส่วนที่ละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์) ที่สร้างโดยสาหร่ายนั้นขึ้นกับสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงโดยขึ้นกับปัจจัยทั้งทางกายภาพและทางเคมี^[5, 23, 30, 31, 73, 92, 121, 161, 478, 513, 537, 579, 679] เช่นพบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่สร้างจากไซยาโนแบคทีเรีย *Anacystis nidulans* นั้นขึ้นกับอายุของการเพาะเลี้ยง อุณหภูมิ และปริมาณไนโตรเจนในอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่าย โดยสำหรับสาหร่ายชนิดนี้การเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สาหร่ายจะสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ (EPS) ได้ 64 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเมื่อเลี้ยงที่ 40 องศาเซลเซียส จะสร้างได้เพียง 43 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนการให้ไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนจะทำให้สาหร่ายสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ได้ 7.2-10.8 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แต่เมื่อใช้แอมโมเนียม (NH_4^+) เป็นแหล่งไนโตรเจนจะได้ 4 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเมื่อใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนจะสร้างได้ 5.2 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งชี้ให้เห็นได้ว่าสำหรับสาหร่ายชนิดนี้นั้นสามารถนำไนเตรทไปใช้ในการสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ได้ดีกว่าแอมโมเนียมและยูเรีย^[579]

ระยะเวลาในการให้ไนโตรเจนเสริมก็มีผลต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่สร้างโดยสาหร่ายสีแดงสกุล *Porphyridium* โดยพบว่าการให้ไนเตรทในครั้งแรกตั้งแต่เริ่มต้นการเลี้ยงเพียงครั้งเดียวจะทำให้มีการสร้าง CPS ได้สูงสุด รองลงมาคือการให้ไนเตรททุก ๆ วันและต่ำที่สุดในอาหารที่ไม่มีไนเตรท นอกจากนี้ปริมาณไนโตรเจนยังมีผลต่อสัดส่วนระหว่างปริมาณของ CPS และ EPS ด้วย^[30]

1. ผลของปัจจัยในการเลี้ยงต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์

พอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่สร้างขึ้นในเซลล์ระหว่างการเจริญเติบโต และส่งผ่านออกมาที่ผนังเซลล์ภายนอก EPS (exocellular polysaccharide) โดยแบ่งเป็นส่วนที่ละลายในอาหาร (EPS) และส่วนที่หุ้มอยู่ที่ผนังเซลล์ (CPS)^[612] ปริมาณ CPS และ EPS จึงสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของสาหร่าย ดังนั้นปัจจัยในการเลี้ยงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตย่อมมีผลต่อปริมาณ CPS และ EPS ด้วย นอกจากนี้ CPS และ EPS ที่สูง ย่อมทำให้การดูดซับโลหะหนักสูงขึ้นด้วย^[524]

การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ภายใต้ปัจจัยที่แตกต่างกันโดยเลี้ยงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (สภาวะควบคุม) ในอาหารสูตร M-18 คือเลี้ยงภายใต้บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

การได้รับแสง 24 ชั่วโมง ความเข้มแสง 400 ไมโครไอสไดน์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ($\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$)
พีเอชของอาหารเท่ากับ 7 และเลี้ยงภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งสภาวะที่ไม่เหมาะสมที่เลือก
มาใช้เลี้ยงสาหร่ายนั้นเป็นปัจจัยที่ได้มีรายงานแล้วว่าปัจจัยดังกล่าวสามารถกระตุ้นให้สิ่งมีชีวิต
เพิ่มการสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ได้^[5; 31, 108, 466, 508, 523] ซึ่งหากสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี
ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสมเหล่านี้จะทำให้มีแนวทางที่จะนำสาหร่ายนี้ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
จริงจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ จากการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 30 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์
ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์^[49, 105, 501] พบว่า *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะควบคุมมีปริมาณ
CPS และ EPS สูงที่สุดคือ 35.4 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย และ 33.0 ± 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
และมีปริมาณผลผลิตสูงที่สุดคือ 1.9 ± 0.3 กรัมต่อลิตร การเลี้ยงภายใต้อาหารที่ไม่เต็มในเตรท
และภายใต้ความเข้มแสงต่ำ จะทำให้มีปริมาณ CPS ต่ำ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ปริมาณ CPS, EPS และปริมาณผลผลิตของสาหร่าย *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้
สภาวะที่แตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน/average $\pm$ S.E.)

สภาวะในการเลี้ยง	CPS (mg/g dry biomass)	EPS (mg/l culture medium)	ผลผลิตรวม (g/l)
สภาวะควบคุม	35.4	33.0 ± 1.0^d	1.9 ± 0.3^d
สภาวะที่ไม่เหมาะสม			
พีเอชต่ำ (พีเอช 4)	33.2	31.8 ± 1.1^d	0.9 ± 0.1^a
สัมผัสแสงยูวี (3 ชั่วโมงต่อวัน)	18.4	20.0 ± 1.3^e	0.8 ± 0.0^a
ความเข้มแสงต่ำ ($200\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$)	16.0	19.5 ± 1.4^e	0.7 ± 0.0^a
ได้รับแสง 12 ชั่วโมง	23.5	26.3 ± 1.7^f	0.6 ± 0.1^a
ไม่ได้รับไนเตรท	15.8	27.8 ± 1.0^f	1.0 ± 0.1^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Nostoc commune* ในอาหารสูตร Bold's Basal medium (BBM) ให้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง ความเข้มแสงประมาณ 300 ไมโครไอสไดน์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ให้อากาศแบบต่อเนื่องโดยมีหัวกรองอากาศขนาด 0.2 ไมโครเมตร กรองอากาศก่อนให้อากาศผ่านลงขวดที่เลี้ยงสาหร่าย และเลี้ยงสาหร่ายที่ระดับอุณหภูมิ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส (± 0.5 องศาเซลเซียส) พบว่าสาหร่าย *N. commune* ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ คลอโรฟิลล์ และน้ำหนักแห้งสูงที่สุดคือ 9.7 ไมโครกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง 12.92 ± 0.39 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.593 ± 0.009 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ปริมาณคลอโรฟิลล์ น้ำหนักแห้ง (จากระยะ late exponential phase) และระยะเวลาในการเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase ของ *N. commune* ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิต่างกัน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

อุณหภูมิ (°C)	μ ($\mu\text{g/l/h}$)	คลอโรฟิลล์ (mg/l)	น้ำหนักแห้ง (g/l)	ระยะเวลาที่เข้าสู่ late exponential phase (วัน)
15	6.6	11.94 ± 0.31^{bc}	0.365 ± 0.001^b	12
20	8.0	12.38 ± 0.44^{ab}	0.288 ± 0.007^c	14
25	9.7	12.92 ± 0.39^a	0.593 ± 0.009^a	14
30	8.6	12.71 ± 0.36^a	0.232 ± 0.000^d	12
35	9.3	11.44 ± 0.30^c	0.228 ± 0.001^d	14
40	9.5	10.00 ± 0.00^d	0.108 ± 0.000^e	10

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : สุธีรัตน์ (2549ข)^[737]

โดยพบว่าที่ระยะ late exponential phase สาหร่าย *N. commune* ที่เลี้ยงภายใต้ระดับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีปริมาณ EPS สูงที่สุดคือ 210.8 ± 4.24 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับอุณหภูมิ และ สาหร่ายชนิดนี้ที่เลี้ยงที่ระดับ 15 องศาเซลเซียส มีปริมาณ EPS สูงที่สุดคือ 340.40 ± 15.51 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับอุณหภูมิ (ตารางที่ 3) และเมื่อพิจารณาปริมาณ EPS เกลี่ยตลอดการเลี้ยง พบว่า *N. commune* ที่เลี้ยงที่ระดับอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีปริมาณ EPS เกลี่ยสูงที่สุด และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับอุณหภูมิ

ตารางที่ 3 EPS (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *N. commune* ที่ระยะ late exponential phase ปริมาณสูงสุด เวลาการเลี้ยงที่ให้ปริมาณสูงสุด (วัน) และปริมาณเกลี่ยตลอดการเลี้ยง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ EPS (mg/l)		
	late exponential phase	ค่าสูงสุด (เวลาการเลี้ยง-วัน)	เกลี่ยตลอดการเลี้ยง
15	168.95 ± 9.91^b	340.40 ± 15.51^a (18)	144.88 ± 5.13^a
20	66.17 ± 7.11^d	96.64 ± 6.36^d (18)	60.73 ± 3.17^d
25	98.26 ± 5.28^c	233.90 ± 10.28^b (18)	82.49 ± 3.23^c
30	45.04 ± 3.84^e	237.61 ± 11.88^b (18)	82.46 ± 4.01^c
35	210.8 ± 4.24^a	242.43 ± 7.21^b (18)	97.36 ± 3.98^b
40	88.51 ± 5.58^c	125.89 ± 5.98^c (12)	39.25 ± 2.51^e

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : สุธีรัตน์ (2549ข)^[737]

และที่ระยะ late exponential phase พบว่า *N. commune* ที่เลี้ยงที่ระดับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีปริมาณ CPS สูงที่สุดคือ 403.01 ± 16.19 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับอุณหภูมิ (ตารางที่ 4) พบว่า *N. commune* ที่เลี้ยงที่ระดับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มปริมาณสูงมากที่สุดในช่วงวันที่ 12 ของการเลี้ยงโดยมีปริมาณ 493.67 ± 14.43 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่น ๆ ทุกระดับ และเมื่อคำนวณปริมาณ CPS เฉลี่ยตลอดการเลี้ยงพบว่า *N. commune* ที่เลี้ยงที่ระดับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีปริมาณ CPS เฉลี่ยตลอดการเลี้ยงสูงที่สุด 224.82 ± 5.08 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่ระดับอุณหภูมิ 15, 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 ปริมาณ CPS (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งสำหรับ) ของ *N. commune* ที่ระยะ late exponential phase ปริมาณสูงสุด เวลาการเลี้ยงที่ให้ปริมาณสูงสุด (วัน) และปริมาณเฉลี่ยตลอดการเลี้ยง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ CPS (mg/g dry wt.)		
	late exponential phase	ค่าสูงสุด (เวลาการเลี้ยง-วัน)	เฉลี่ยตลอดการเลี้ยง
15	142.64 ± 9.96^a	309.19 ± 14.35^d (4)	201.76 ± 7.41^b
20	150.22 ± 7.02^{de}	224.95 ± 11.86^e (2)	151.13 ± 4.23^d
25	308.15 ± 9.57^b	312.89 ± 15.78^d (2)	187.74 ± 5.00^c
30	158.09 ± 8.52^d	335.52 ± 8.15^c (2)	147.41 ± 3.89^d
35	242.11 ± 7.43^c	493.67 ± 14.43^a (12)	224.82 ± 5.08^a
40	403.01 ± 16.19^a	429.69 ± 16.19^b (12)	214.43 ± 4.97^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวนึงเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : สุนีรัตน์ (2549ข)^[737]

ตารางที่ 6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ (EPS) ของ *Chlamydomonas angustae* ที่เลี้ยงที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

เวลาการเลี้ยง (วัน)	คาร์โบไฮเดรต (%)	โปรตีน (%)	เถ้า (%)
10	47	9	15
12	57	5	12
14	64	5	15
17	65	2	11
22	68	3	15

ที่มา : Allard and Tazi (1993)^[23]

2.2. ผลต่อชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งปัจจัยในการเลี้ยงที่แตกต่างกันจะทำให้ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่พบในแต่ละสภาวะการเลี้ยงนั้นแตกต่างกัน^[24, 520] โดยพบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ภายใต้ความเข้มแสงต่ำ สามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมดที่พบใน CPS โดยพบน้ำตาล 53.23 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 7) ส่วนน้ำตาลกรดพบสูงที่สุด 19.6 ± 0.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ภายใต้สภาวะการเลี้ยงนี้เช่นกัน (ตารางที่ 8)

ตรงข้ามกับการเลี้ยงภายใต้สภาวะควบคุมซึ่งมีปริมาณน้ำตาลรวมและน้ำตาลกรด (acidic sugar) ต่ำที่สุด ดังนั้นแม้ว่าการเลี้ยงภายใต้สภาวะควบคุมจะให้ปริมาณ CPS สูงที่สุด (ตารางที่ 1) แต่เมื่อเทียบน้ำตาลกรดต่อ 1 กรัม ของ CPS พบว่ามีปริมาณต่ำ แต่เมื่อเลี้ยงภายใต้ความเข้มแสงต่ำสาหร่ายผลิต CPS ต่ำ แต่ CPS มีน้ำตาลกรดอยู่สูง ซึ่งการนำสาหร่ายไปดูดซับโลหะหนักนั้นเน้นพิจารณาที่น้ำตาลกรด เพราะมีหน้าที่สำคัญในการจับโลหะหนัก ดังนั้นจึงต้องเลือกสภาวะการเลี้ยงที่สาหร่ายผลิตน้ำตาลกรดได้มากที่สุดต่อหน่วยผลผลิต ดังนั้นเมื่อคำนวณน้ำตาลกรดเทียบเป็นต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่าย พบว่าปริมาณน้ำตาลกรดต่อน้ำหนักแห้งสาหร่ายพบสูงสุดคือ 313.7 ± 0.6 ไมโครกรัมต่อกรัมสาหร่าย ซึ่งเลี้ยงภายใต้ความเข้มแสงต่ำ รองลงมาคือเลี้ยงภายใต้การได้รับแสงสว่าง 12 ชั่วโมง (ตารางที่ 8)

และข้อมูลจากตารางที่ 1 แสดงถึงผลผลิตรวมทั้งหมดที่ผลิตได้ภายใต้สภาวะการเลี้ยงที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่ามีผลผลิตในสภาวะการเลี้ยงที่ไม่เหมาะสมมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ปริมาณน้ำตาลกรดมีค่าแตกต่างกัน (ตารางที่ 8) ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้ภายใต้ความเข้มแสงต่ำจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพาะเลี้ยงเพื่อเตรียมตัวดูดซับชีวภาพสำหรับดูดซับโลหะหนัก เพราะตัวดูดซับมีปริมาณน้ำตาลกรดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่มีการแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

ตารางที่ 7 องค์ประกอบน้ำตาลใน CPS (มิลลิกรัมต่อกรัม CPS) ของ *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในทศ
ตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 0.001)

สภาวะในการเลี้ยง	rhamnose	arabinose+	galactose+	mannose	fructose	xylose	galacturonic	glucuronic	น้ำตาลรวม ทั้งหมด
		ribose	glucose						
สภาวะควบคุม	0.25 ^{ab}	0.82 ^e	0.83 ^e	0.01 ^a	0.80 ^d	0.60 ^a	0.74 ^e	1.24 ^e	5.28 ^e
สภาวะที่ไม่เหมาะสม									
พีเอชต่ำ (พีเอช 4)	3.14 ^d	1.50 ^f	1.88 ^f	0.09 ^c	1.62 ^e	1.19 ^e	1.59 ^f	2.75 ^f	13.74 ^f
สัมผัสแสงยูวี (3 ชั่วโมงต่อวัน)	1.23 ^c	1.16 ^g	0.98 ^g	0.06 ^c	1.97 ^f	1.41 ^f	2.01 ^g	3.47 ^g	12.28 ^g
ความเข้มแสงต่ำ (200µE/m ² s ¹)	10.93 ^e	3.77 ^h	4.57 ^h	2.15 ^d	6.91 ^g	5.33 ^g	7.65 ^h	11.93 ^h	53.23 ^h
ได้รับแสง 12 ชั่วโมง	2.17 ^f	1.08 ⁱ	0.86 ^b	0.02 ^a	2.42 ^h	1.96 ^h	2.70 ⁱ	4.68 ⁱ	15.89 ⁱ
ไม่ได้รับไนโตรเจน	2.47 ^f	1.12 ^g	1.54 ⁱ	0.00 ^a	2.35 ^h	1.74 ^h	2.19 ^j	3.86 ^j	15.27 ^j

หมายเหตุ : เนื่องจากจากการวิเคราะห์ น้ำตาลชนิด arabinose กับ ribose และ galactose กับ glucose จะมีบางส่วนที่ปรากฏอยู่รวมใน peak เดียวกัน ดังนั้น
การรายงาน ผลจึงรายงานผลรวมเป็นน้ำตาลทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

ตารางที่ 8 น้ำตาลกรดใน CPS (มิลลิกรัมต่อกรัม CPS) และน้ำตาลกรดในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของ *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

สภาวะในการเลี้ยง	น้ำตาลกรดใน CPS (mg/g CPS)	น้ำตาลกรดในสาหร่าย (µg/g dry biomass)
สภาวะควบคุม	2.0 ± 0.00 ^e	69.9 ± 0.2 ^e
สภาวะที่ไม่เหมาะสม		
พีเอชต่ำ (พีเอช 4)	4.3 ± 0.0 ^f	144.1 ± 0.4 ^f
สัมผัสแสงยูวี (3 ชั่วโมงต่อวัน)	5.5 ± 0.00 ^g	100.8 ± 0.1 ^g
ความเข้มแสงต่ำ (200µE/m ² s ¹)	19.6 ± 0.0 ^h	313.7 ± 0.6 ^h
ได้รับแสง 12 ชั่วโมง	7.4 ± 0.0 ⁱ	173.6 ± 0.6 ⁱ
ไม่ได้รับไนโตรเจน	6.1 ± 0.1 ^j	95.6 ± 0.9 ^j

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแถวแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ที่มา : Ruangsomboon et al. (2006b)^[573]

สูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย^[728]

1. สูตรอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืด

1.1. สูตรอาหารของอัลเลนที่ปรับปรุงแล้ว (Allen blue-green medium, modified)

สูตรอาหารนี้เหมาะสำหรับเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ประกอบด้วยธาตุอาหารต่อไปนี้

NaNO ₃	1.59	กรัม
K ₂ HPO ₄	0.039	กรัม
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.075	กรัม
Na ₂ CO ₃	0.02	กรัม
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0.02	กรัม
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	0.058	กรัม
EDTA	0.01	กรัม
citric acid C ₆ H ₈ O ₁₀	0.06	กรัม
FeCl ₃	0.02	กรัม
สารละลายธาตุอาหารรอง*	1.0	มิลลิลิตร
ซึ่งนำหนักของธาตุอาหารทั้งหมดละลายในน้ำกลั่น	999	มิลลิลิตร
*สารละลายธาตุอาหารรองประกอบด้วยธาตุอาหารต่อไปนี้		
H ₃ BO ₃	2.86	กรัม
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81	กรัม
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.222	กรัม
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.391	กรัม
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.079	กรัม
[Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O]	0.0494	กรัม
นำสารทั้งหมดละลายในน้ำกลั่นปริมาตร	1000	มิลลิลิตร

เมื่อผสมธาตุอาหารทั้งหมดเรียบร้อยแล้วให้ทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 7.8 นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้ออบไอน้ำความดัน ที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ถ้าต้องการเตรียมอาหารแข็ง ให้เตรียมสารละลายด้วยธาตุอาหารดังกล่าวแต่เตรียมให้มีความเข้มข้นเป็น 2 เท่าจากเดิม และเตรียมสารละลายวันให้มีความเข้มข้นเป็น 2 เท่าของปกติ (นำผงวันมาละลายในน้ำกลั่นธรรมดาแต่เพิ่มปริมาณผงวันเป็น 3-4 เปอร์เซ็นต์) นำสารละลายอาหาร 2 อย่างนี้เข้าอบฆ่าเชื้อ แล้วนำสารละลายทั้ง 2 อย่าง อย่างละเท่า ๆ กันมาผสมกันที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส แล้วจึงเทอาหารวันลงจานอาหารเลี้ยงเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2. สูตรอาหารของโบลด์ (Bold's basal medium, BBM)

สูตรอาหารนี้สามารถใช้เลี้ยงสาหร่ายได้หลายกลุ่มได้แก่ สาหร่ายสีเขียว สาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงิน และสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Chrysophyta) โดยส่วนประกอบของอาหารนี้ประกอบด้วยธาตุอาหาร 2 ประเภท คือ

ธาตุอาหารหลัก (macronutrient) มี 6 ชนิดได้แก่

NaNO_3	10 กรัม
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1 กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3 กรัม
K_2HPO_4	3 กรัม
KH_2PO_4	7 กรัม
NaCl	1 กรัม
นำเกลือแต่ละชนิดละลายในน้ำกลั่นชนิดละ	400 มิลลิลิตร

ธาตุอาหารที่จำเป็น มีทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่

EDTA สติ๊อค ประกอบด้วย

EDTA	50 กรัม
KOH 85 เปอร์เซนต์	31 กรัม

นำส่วนประกอบทั้งสองละลายในน้ำ 1 ลิตร

H-Fe สติ๊อค ประกอบด้วย

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4.98 กรัม

ละลายเฟอร์ริกซัลเฟตในน้ำที่เป็นกรด 1 ลิตร (แทนการใช้น้ำกลั่นธรรมดา) เตรียมน้ำที่เป็นกรดได้โดยเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 999 มิลลิลิตร

Boron สติ๊อค ประกอบด้วย

H_3BO_3	11.42 กรัม

ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร

H-H₅ สติ๊อค ประกอบด้วย

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	8.82 กรัม
MoO_3	0.71 กรัม
$[\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$	0.49 กรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.44 กรัม
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.57 กรัม

นำส่วนประกอบทั้งหมดละลายในน้ำที่เติมกรด (เตรียมเหมือน H-Fe สติ๊อค) ปริมาตร 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

วิธีเตรียมอาหาร โดยผสมสารละลายทั้ง 2 ประเภท เข้าด้วยกันดังนี้

สารละลายธาตุอาหารหลัก 6 ชนิด ชนิดละ	10 มิลลิลิตร
สารละลายธาตุอาหารที่จำเป็น 4 ชนิด ชนิดละ	1 มิลลิลิตร
จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ครบ	1 ลิตร

1.3. สูตรอาหารบริสตอล (Bristol medium)

สูตรอาหารบริสตอลเป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืดทั่วไป มีส่วนประกอบเหมือนสูตรอาหารของโบลด์ แต่ใช้น้ำใส ๆ ที่เตรียมจากสารละลายดินในน้ำจืด (soil-water supernatant) แทนสารละลายธาตุอาหารที่จำเป็น (trace element solution) สูตรอาหารบริสตอลมีดังนี้

NaNO_3	10 กรัม
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1 กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2 กรัม
K_2HPO_4	4 กรัม
KH_2PO_4	6 กรัม
NaCl	1 กรัม

นำเกลือแต่ละชนิดละลายในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร

การเตรียมสารอาหารสูตรนี้ให้นำสารละลายจากเกลือ 6 ชนิด ชนิดละ 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำใส ๆ จากสารละลายดิน 50 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมน้ำกลั่นจนครบ 1,000 มิลลิลิตร

วิธีการเตรียมน้ำใส ๆ จากสารละลายดินทำโดยใช้ดินปลูกต้นไม้ที่มีความชื้นพอประมาณและไม่มีสารเคมีเจือปน ถ้าใช้ดินจากสวนที่ปลูกต้นไม้ให้ขุดดินลงไปลึกพอสมควร เพื่อให้มีสารเคมีน้อยลงและมีการปนของเศษใบไม้ที่เน่าน้อยลง นำดินใส่ลงในขวดแก้วกันกลม หรือ ฟลาสก์ให้สูงประมาณครึ่งนิ้ว เติมน้ำขาว (CaCO_3) เพื่อปรับพีเอชของดิน ใช้ปูนเพียงเล็กน้อย เติมน้ำลงในขวดแก้วประมาณสามในสี่ของความจุของขวด ปิดจุก หรือปิดด้วยกระดาษตะกั่ว นำไปต้มให้เดือดประมาณ 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ปิดจุก นำไปต้มอีกครั้งนานประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น วันรุ่งขึ้นให้ทำซ้ำเช่นนี้อีกครั้ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วจึงรินแต่น้ำใส ๆ ดอนบนมาใช้

1.4. สูตรอาหารของชู เบอร์ 10 (Chu No.10 medium)

เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายได้หลายกลุ่มได้แก่ ไดอะตอม สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง และสาหร่ายสีเขียวกวมน้ำเงิน มีส่วนประกอบดังนี้

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.04 มิลลิกรัม
K_2HPO_4	0.01 มิลลิกรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.025 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการเกษตรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Na_2CO_3	0.02 มิลลิกรัม
Na_2SiO_3	0.025 มิลลิกรัม
FeCl_3	0.8 มิลลิกรัม

เติมน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร

1.5. สูตรอาหารของซู เบอร์ 10 สูตรปรับปรุง (Modified Cho No. 10 medium)

ประกอบด้วยสารละลายของเกลือ 3 ประเภท ได้แก่

สารละลายสต็อก (stock solution)

$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3.67 กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.69 กรัม
NaHCO_3	1.26 กรัม
K_2HPO_4	0.87 กรัม
NaNO_3	8.5 กรัม
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	2.84 กรัม

นำเกลือแต่ละชนิดละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายไปฆ่าเชื้อ

สารละลายเหล็ก (iron solution) เตรียมโดยละลายกรดน้ำส้ม acetic acid

($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 3.35 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเติมเฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 3.35 กรัม นำไปอบฆ่าเชื้อด้วยหม้ออบไอน้ำความดัน รินสารละลายที่ฆ่าเชื้อแล้วใส่หลอดที่ปลอดเชื้อ หุ้มหลอดด้วยกระดาษตะกั่วแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

สารละลายแร่ธาตุที่จำเป็น (trace element solution)

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	19.6 มิลลิกรัม
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	44.0 มิลลิกรัม
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.0 มิลลิกรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	36.0 มิลลิกรัม
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	12.6 มิลลิกรัม
H_3BO_3	618.4 มิลลิกรัม

วิธีเตรียมอาหาร ผสมสารละลายทั้ง 3 ประเภทเข้าด้วยกัน ดังนี้ โดยผสมสารละลายสต็อก 6 ชนิด ชนิดละ 1 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายเหล็ก 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายแร่ธาตุที่จำเป็น 1 มิลลิลิตร

1.6. สูตรอาหารสารละลายดิน (soil-water medium)

สูตรอาหารนี้เหมาะสำหรับเลี้ยงสาหร่ายที่ต้องการเก็บรักษาระยะยาวและสามารถเลี้ยงสาหร่ายได้ทุกดิวิชัน มีวิธีเตรียมดังนี้ ใส่ปูนขาว (CaCO_3) เล็กน้อยหรือประมาณหยิบมือ (ถ้าดินที่ใช้มีฤทธิ์เป็นด่างไม่จำเป็นต้องใส่ปูนขาว) ลงในขวดแก้วกันกลมหรือพลาสติกสำหรับเลี้ยงสาหร่าย นำดินปลูกต้นไม้มือ (ที่ไม่มีปุ๋ยวิทยาศาสตร์ ยาฆ่าแมลง และยาฆ่าวัชพืชปะปนอยู่) ใส่ในขวดให้สูงประมาณ 1/2 นิ้ว ไม่ควรใช้ดินผสมที่มีใบไม้หรือหญ้าแห้ง แล้วเติมน้ำลงในขวดให้สูงประมาณ 3/4 ของขวด ปิดจุก น้ำที่ใช้อาจเป็นน้ำกลั่นหรือน้ำบ่อที่กรองแล้ว จากนั้นนำไปต้มให้เดือดนานประมาณ 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น แล้ววันรุ่งขึ้นให้เติมน้ำในขวดซ้ำอีก 1 ครั้ง ตั้งส่วนผสมไว้ให้ตกตะกอน รินแต่น้ำใส ๆ ตอนบนของขวดมาใช้

ถ้าจะเลี้ยงสาหร่ายสกุล *Euglena*, *Trachelomonas* ซึ่งมีความต้องการสารประกอบไนโตรเจนหรือคาร์บอนมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่น ควรเติมดินที่ผสมเปลือกถั่วอีกประมาณ 1/4-1/2 ส่วนของดินที่ใช้ จะช่วยให้สาหร่ายที่เลี้ยงเติบโตเร็วขึ้น

ถ้าต้องการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวที่เป็นเส้นสายสกุล *Spirogyra* และ *Zygnema* หรือสกุลที่ชอบขึ้นในน้ำที่เป็นกรด ไม่ต้องเติมปูนขาวแต่เติมใบไม้เล็กน้อยในดินแทน

1.7. สูตรอาหารเลี้ยงคลอเรลลา (*Chlorella* medium)

สาหร่ายเซลล์เดียวสกุลคลอเรลลาเจริญเติบโตได้ในอาหารหลายสูตร แต่สูตรนี้เป็นสูตรอาหารที่เลี้ยงคลอเรลลาได้ดี โดยมีส่วนประกอบของอาหารดังนี้

KNO_3	1.250 กรัม
KH_2PO_4	1.250 กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.000 กรัม
CaCl_2	0.084 กรัม
H_3BO_3	0.114 กรัม
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.050 กรัม
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.088 กรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.014 กรัม
MoO_3	0.007 กรัม
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.016 กรัม
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.005 กรัม
EDTA	0.500 กรัม

ละลายส่วนประกอบทั้งหมดในน้ำกลั่น 1 ลิตร และปรับ pH ให้เท่ากับ 6.8

1.8. สูตรอาหารซาร์รูก (Zarrouk medium)

เป็นสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Spirulina* ในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะ มีส่วนประกอบดังนี้

สารละลายสต็อก

NaHCO_3	16.8 กรัม
K_2HPO_4	0.5 กรัม
(หรือละลายเกลือ 10 กรัม/น้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปใช้ 5 มิลลิลิตร)	
NaNO_3	2.5 กรัม
K_2SO_4	1 กรัม
(หรือละลายเกลือ 10 กรัม/น้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปใช้ 10 มิลลิลิตร)	
NaCl	1 กรัม
(หรือละลายเกลือแกง 12.5 กรัม/น้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปใช้ 8 มิลลิลิตร)	
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2 กรัม
(หรือละลายเกลือ 4 กรัม/น้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปใช้ 5 มิลลิลิตร)	
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.04 กรัม
(หรือละลายเกลือ 2 กรัม/น้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปใช้ 2 มิลลิลิตร)	
* $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.01 กรัม
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.08 กรัม

*วิธีการเตรียมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ทำโดยละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 0.2 กรัม ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และละลายโซเดียมอีดีทีเอ 1.6 กรัม ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วผสมสารละลายที่เตรียมได้ทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน นำไปใช้ในปริมาณ 5 มิลลิลิตรต่อลิตร

สารละลาย A5

สารละลาย A 5 1 มิลลิลิตร

วิธีเตรียมสารละลาย A5 โดยละลายเกลือ 5 ชนิดต่อไปนี้เข้าด้วยกัน

H_3BO_3	2.85 กรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81 กรัม
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22 กรัม
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08 กรัม
MoO_3	0.015 กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1,000 มิลลิลิตร

สารละลาย B6

สารละลาย B6 1 มิลลิลิตร

วิธีเตรียมสารละลาย B6 โดยละลายเกลือ 6 ชนิดดังต่อไปนี้เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NH_4VO_3	230.0 ไมโครกรัม
$\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	960.0 ไมโครกรัม
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	478.5 ไมโครกรัม
$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	179.4 ไมโครกรัม
$\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3$	400.0 ไมโครกรัม
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	439.8 ไมโครกรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1,000 มิลลิลิตร

ละลายส่วนผสมสารละลายสต็อก สารละลาย A5 และสารละลาย B6 เข้าด้วยกัน แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1,000 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการขยายพันธุ์ *Spirulina* ให้ได้ปริมาณมาก (mass culture) ให้ใช้สูตรอาหารตามที่กล่าวมาแล้ว แต่ไม่ต้องใช้สารละลาย A5 และ B6 โดยใช้รน้ำหนักสารประกอบต่อน้ำ เป็นกิโลกรัมต่อคิวบิกเมตร และไม่ต้องใช้แคลเซียมคลอไรด์ 2-ไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ในกรณีที่น้ำที่ใช้มีความกระด้างอยู่แล้ว

1.9. สูตรอาหารเลี้ยง *Euglena gracilis* (*Euglena gracilis* medium)

ประกอบด้วยสารอาหาร 5 ชนิดดังนี้

$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (sodium acetate hydrated)	0.01 กรัม
beef extract	0.1 กรัม
ยีสต์ผง	0.2 กรัม
Bactotryptone	0.2 กรัม
CaCl_2	0.001 กรัม

ละลายส่วนผสมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ถ้าต้องการทำเป็นอาหารแข็งให้เติมผงวุ้น 1.5 กรัม

1.10. สูตรอาหารเลี้ยง *Chlamydomonas* (Nishikawa et al., 2006)

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.15 กรัม
NH_4NO_3	0.3 กรัม
K_2HPO_4	0.1 กรัม
KH_2PO_4	0.1 กรัม
CaCl_2	0.04 กรัม
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	6 มิลลิกรัม
H_3BO_4	1.26 มิลลิกรัม
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.6 มิลลิกรัม
$\text{MnCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.18 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.04 มิลลิกรัม
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.1 มิลลิกรัม
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.17 มิลลิกรัม

ละลายส่วนผสมทั้งหมดในน้ำกลั่น 1 ลิตร

1.11. Medium-18 (M-18 medium) ใช้เลี้ยงได้ทั้งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีเขียว เหมาะสำหรับการเลี้ยงเพื่อนำสาหร่ายไปศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เพราะเป็นสูตรปุ๋ยที่มีการตัด EDTA ออกจากสูตรแล้ว เพื่อไม่ให้ผลในการศึกษาคลายเคลื่อน เพราะหากสาหร่ายที่นำไปดูดซับโลหะหนักมี EDTA ปนเปื้อน จะให้ค่าการดูดซับโลหะหนักที่ผิดพลาด ค่าการดูดซับที่ได้ อาจเกิดจากทั้งการทำงานของสาหร่ายและ EDTA โดย M-18 ประกอบด้วย

NaNO_3	1500 มิลลิกรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	380 มิลลิกรัม
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	110 มิลลิกรัม
NaCl	70 มิลลิกรัม
K_2HPO_4	120 มิลลิกรัม
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10 มิลลิกรัม
$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	9 มิลลิกรัม
H_3BO_3	3 มิลลิกรัม
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2 มิลลิกรัม
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.3 มิลลิกรัม
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08 มิลลิกรัม
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.04 มิลลิกรัม

ละลายสารเคมีทั้งหมดในน้ำ 1 ลิตร ปรับให้มีพีเอชเท่ากับ 7

2. สูตรอาหารแข็ง (solid media) สำหรับเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืด

ถ้าต้องการอาหารแข็ง ให้เติมวุ้นลงในอาหารเหลวตามสูตรต่าง ๆ ข้างต้น ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ (หรือใช้วุ้นหนัก 15 กรัมต่ออาหารเหลว 1 ลิตร) และยังมีสูตรอาหารแข็งอื่นอีกดังนี้

2.1. โปรทีโอส อาการ์ (proteose agar)

เป็นอาหารที่ปลอดภัยนิยมใช้เลี้ยงคลอเรลลาหรือสาหร่ายชนิดอื่น ๆ

Bold's basal medium	1,000 มิลลิลิตร
Proteose peptone	1 กรัม
agar	15 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. อาหารวุ้นจากสารละลายดิน (soil extract agar)

น้ำใส ๆ จากสารละลายดิน 40 มิลลิลิตร

สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ สูตรใดสูตรหนึ่งจากที่กล่าวมาแล้ว 960 มิลลิลิตร

agar 15 กรัม

3. สูตรอาหารเหลวสำหรับสาหร่ายน้ำเค็ม

3.1. สูตรอาหารของคอนเวย์ หรือวอลเน (Conway medium or Walne medium)

สูตรนี้เหมาะสำหรับเลี้ยงไดอะตอม เช่น *Skeletonema*, *Chaetoceros* หรือสาหร่ายทะเลชนิดอื่น ได้ดี เช่น *Tetraselmis* แต่ถ้าเลี้ยงสาหร่ายชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดอะตอมไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายส่วนที่ 4 อาหารสูตรนี้ประกอบด้วยสารละลาย 4 ส่วนได้แก่

สารละลายส่วนที่ 1

NaNO_3 100.0 กรัม

Na_2EDTA 45.0 กรัม

H_3BO_3 33.6 กรัม

$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 20.0 กรัม

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.3 กรัม

$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.36 กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

สารละลายส่วนที่ 2

thiamine 1 มิลลิกรัม

cyanocobalamine 200 มิลลิกรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

สารละลายส่วนที่ 3

ZnCl_2 2.1 กรัม

$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2.0 กรัม

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.9 กรัม

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2.0 กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

ในกรณีที่สารละลายที่เตรียมได้มีตะกอนให้เติมกรดเกลือ HCl ลงไปเล็กน้อย หรือจนกว่าตะกอนจะละลายหมด

สารละลายส่วนที่ 4

$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 15 กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

วิธีเตรียมอาหาร โดยนำสารละลายส่วนที่ 1, 2, 3 และ 4 มาอย่างละ 1 มิลลิลิตร เติมลงในน้ำทะเลที่ใช้เลี้ยงไดอะตอมในปริมาณ 1 ลิตร ปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ให้อยู่ในช่วง 6.5-6.8 โดยใช้กรดเกลือ HCl 10 เปอร์เซนต์

3.2. สูตรอาหารของโปรวาโซลี (Provasoli enriched seawater medium or PES medium)

จัดว่าเป็นสูตรอาหารที่ดีสำหรับเลี้ยงสาหร่ายทะเลเกือบทุกชนิดและเหมาะสำหรับการเลี้ยงในระยะยาว เพื่อศึกษาการรูปร่าง มีส่วนประกอบดังนี้

ส่วนประกอบของอาหารเสริม

NaNO ₃	350.0 มิลลิกรัม
C ₃ H ₇ Na ₂ O ₆ P.5H ₂ O	50.0 มิลลิกรัม
*ธาตุเหล็ก อยู่ในรูปของ EDTA 1:1 molar	2.5 มิลลิกรัม
**แร่ธาตุ PII	25.0 มิลลิลิตร
วิตามินบี 12	10.0 ไมโครกรัม
thiamine	0.5 มิลลิกรัม
biotin	5.0 ไมโครกรัม
tris buffer	500.0 มิลลิกรัม

ละลายส่วนผสมทั้งหมดในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.8

วิธีเตรียมธาตุเหล็ก ในรูปของ EDTA 1:1 molar

ละลายแอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟต 6 ไฮเดรต Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O หนัก 351 มิลลิกรัม และโซเดียมเอ็ดทีเอ (Na₂EDTA) ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เวลานำไปใช้ให้คิดเทียบว่า สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตรมีน้ำหนักเท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมเหล็ก (mg Fe)

วิธีเตรียมแร่ธาตุ PII มีส่วนประกอบดังนี้

H ₃ BO ₃	114.0 มิลลิกรัม
FeCl ₃ .6H ₂ O	4.9 มิลลิกรัม
MnSO ₄ .4H ₂ O	16.4 มิลลิกรัม
ZnSO ₄ .7H ₂ O	2.2 มิลลิกรัม
CoSO ₄ .7H ₂ O	0.48 มิลลิกรัม
Na ₂ EDTA	100.0 มิลลิกรัม

ละลายส่วนผสมทั้งหมดในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

วิธีเตรียมอาหาร นำอาหารเสริมที่เตรียมตามวิธีข้างต้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เติมลงในน้ำทะเลที่กรองแล้วปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ถ้าเลี้ยงสาหร่ายแบบปลอดเชื้อต้องใส่สารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารเสริมในหลอดแก้วแล้วนำไปนิ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้ออบไอน้ำความดันแล้วจึงนำไปผสมกับน้ำทะเลที่นิ่งฆ่าเชื้อแล้วเช่นกัน

3.3. สูตรอาหารเลี้ยงเตตราเซลมิส (*Tetraselmis* medium)

นอกจากใช้เลี้ยงสาหร่ายสีเขียวชนิดมีหนวดแล้วยังใช้เลี้ยงสาหร่ายสีเขียวชนิดอื่นได้ เช่น คลอเรลล่าเป็นต้น มีส่วนประกอบดังนี้

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	100 กรัม
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ / $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	5 กรัม
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	15 กรัม

น้ำทะเล 1 ตัน

นำธาตุอาหารทั้งหมดผสมในน้ำทะเลปริมาตร 1000 ลิตร

4. สูตรอาหารเหลวสำหรับสาหร่ายทะเลขนาดใหญ่

4.1. สูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย *Ulva pertusa* และ *Gracilaria lemaneiformis*^[667]

NaNO_3	8.5 มิลลิกรัม
NaH_2PO_4	0.84 มิลลิกรัม

ละลายธาตุอาหารทั้งสองส่วนในน้ำทะเล 1 ลิตร และเลี้ยงสาหร่ายภายใต้ให้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 12 ชั่วโมง ความเข้มแสง 70 ไมโครไอสไต์ต่อตารางเมตรต่อวินาที

4.2. สูตรอาหาร f/2 medium เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Caulerpa*^[398]

1. NaNO_3	75.0 กรัมต่อลิตร
2. $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5.0 กรัมต่อลิตร
3. $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	30.0 กรัมต่อลิตร
4. f/2 trace metal solution	
5. f/2 vitamin solution	

นำสารในข้อ 1-4 อย่างละ 1 มิลลิลิตร และสารในข้อ 5 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตรผสมในน้ำทะเลที่กรองแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1 ลิตร และนำเข้าหม้ออบไอน้ำความดัน

ส่วนประกอบของสารในข้อ 4 f/2 trace metal solution

4.1. $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	3.15 กรัม
4.2. $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	4.36 กรัม
4.3. $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	9.8 กรัมต่อลิตร
4.4. $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	6.3 กรัมต่อลิตร
4.5. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	22.0 กรัมต่อลิตร
4.6. $\text{CoCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	10.0 กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7. $\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$

180.0 กรัมต่อลิตร

ผสมสารในข้อ 4.1 และ 4.2 ทั้งหมด และสารในข้อ 4.3-4.7 อย่างละ 1 มิลลิลิตร ลงใน
น้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร และนำเข้าหม้ออบไอน้ำความดัน

ส่วนประกอบของสารในข้อ 5 f/2 vitamin solution

5.1. vitamin B12

1.0 กรัมต่อลิตร

5.2. biotin

0.1 กรัมต่อลิตร

5.3. thiamine HCl

200.0 มิลลิกรัม

ผสมสารในข้อ 5.1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร สารในข้อ 5.2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสาร
ในข้อ 5.3 ทั้งหมด ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร กรองและใส่ในภาชนะพลาสติก เก็บในตู้เย็น

หมายเหตุ vitamin B12 และ biotin อยู่ในรูปของผลึก และผลึกของ vitamin B12 มี
น้ำประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ การเตรียมคือใช้ vitamin B12 น้ำหนัก 1 มิลลิกรัมละลายในน้ำ
0.89 มิลลิลิตร ส่วนผลึกของ biotin มีน้ำประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ การเตรียมคือใช้ biotin
น้ำหนัก 1 มิลลิกรัม ละลายในน้ำ 9.6 มิลลิลิตร

5. อาหารแข็งสำหรับสาหร่ายทะเล

5.1. สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน/ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacterial agar) มี

ส่วนประกอบดังนี้

 KNO_3

5.0 กรัม

 K_2HPO_4

0.1 กรัม

 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

0.05 กรัม

 $\text{Fe}(\text{NH}_4)_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์

1 มิลลิกรัม

วันผง

15 กรัม

ละลายในน้ำทะเลจนครบ 1 ลิตร

5.2. อาหารวันเลี้ยงไดอะตอม (diatom seawater-agar)

อาหารเหลวสูตรของโบลด์

500 มิลลิลิตร

น้ำทะเลที่กรองและอบฆ่าเชื้อแล้ว

500 มิลลิลิตร

น้ำใส ๆ จากสารละลายดิน

50 มิลลิลิตร

วันผง

15 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากต้องการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อนำไปศึกษาวิจัยความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก อาหารที่ใช้ในการเลี้ยงให้มีส่วนผสมของ EDTA ออกจากสูตรอาหาร เพราะหากเลี้ยงด้วย อาหารผสม EDTA เมื่อนำสาหร่ายไปใช้อาจมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่ แท้จริงของสาหร่ายคลาดเคลื่อน เพราะ EDTA เป็นสารที่สามารถจับโลหะได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 14 การเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ

เอกสารอ้างอิง

1. Abbott, I.A. and Dawson, E.Y. 1978. How to Know the Seaweeds. Wm. C. Brown Company Publishers Dubuque, Iowa.
2. Abbott, I.A. and Hollenberg, G.J. 1976. Marine Algae of California. Stanford University Press, Stanford.
3. Abollino, O., Aceto, M., Sarzanini, C. and Mentasti, E. 2000. The retention of metal species by different solid sorbents mechanisms for heavy metal speciation by sequential three column uptake. Analytical Chemistry Acta. 411:223-237.
4. Adamson, A.W. 1990. Physical Chemistry of Surfaces. John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Adda, M., Merchuk, J.C. and Arad, S. 1986. Effect of Nitrate on growth and production of cell-wall polysaccharide by the unicellular red algal *Porphyridium*. Biomass. 10:131-140.
6. Agrawal, G.L. 1990. Basic Chemical Kinetics. McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
7. Ahner, B.A. and Morel, F.F.M. 1995. Phytochelatin production in marine algae induction by various metals. Limnology and Oceanography. 40:658-665.
8. Ahner, B.A., Priče, N.M. and Morel, F.M.M. 1994. Phytochelatin production by marine phytoplankton at low free metal ion concentrations: laboratory studies and field data from Massachusetts Bay. Proceedings of the National Academy of Sciences. 91: 8433-8436.
9. Ahuja, P., Gupta, R. and Saxena, R.K. 1997. *Oscillatoria angustissima*: a promising Cu^{2+} biosorbent. Current Microbiology. 35:151-154.
10. Ahuja, P., Gupta, R. and Saxena, R.K. 1999a. Sorption and desorption of cobalt by *Oscillatoria angustissima*. Current Microbiology. 39:49-52.
11. Ahuja, P., Gupta, R. and Saxena, R.K. 1999b. Zn^{2+} biosorption by *Oscillatoria angustissima*. Process Biochemistry. 34:77-85.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Ahuja, P., Nohapatra, H., Sacena, R.K. and Gupta, R. 2001. Reduced uptake as a mechanism of zinc tolerance in *Oscillatoria angustissima*. *Current Microbiology*. 43:305-310.
13. Akatsuka, I. 1990. *Introduction to Applied Phycology*. APB Academic Publishing, Netherlands.
14. Akhtar, N., Saeed, A. and Iqbal, M. 2003. *Chlorella sorokiniana* immobilized on the biomatrix of vegetable sponge of *Luffa cylindrica*: a new system to remove cadmium from contaminated aqueous medium. *Bioresource Technology*. 88:163-165.
15. Aksu, A. and Kutsal, T. 1990. A comparative study for biosorption characteristics of heavy metal ions with *Chlorella vulgaris*. *Environmental Technology*. 2:979-987.
16. Aksu, Z. and Acikel, U. 2000. Modeling of a single-staged bioseparation process for simultaneous removal of iron (III) and chromium (VI) by using *Chlorella vulgaris*. *Biochemical Engineering Journal*. 4:229-238.
17. Aksu, Z. and Gonen, F. 2004. Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process Biochemistry*. 39:599-613.
18. Aksu, Z., Egretli, G. and Kutsal, T. 1998. A comparative study of copper (II) biosorption on Ca-alginate, agarose and immobilized *C. vulgaris* in a packed-bed column. *Process Biochemistry*. 33:393-400.
19. Aksu, Z., Sag, Y. and Kutsal, T. 1992. The biosorption of copper(II) by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*. *Environment Technology*. 13:579-586.
20. Al-Ashes, S. and Duvnjak, A. 1995. Adsorption of copper and chromium by *Aspergillus carbonarius*. *Biotechnology Progress*. 11:638-642.
21. Alder, I., Fourest, E. and Vorlesky, B. 1999. Desorption of cadmium from algal biosorbent. *Canadian Journal of Chemistry*. 73:516-522.
22. Allard, B. and Casaderall, E. 1990. Carbohydrate composition and characterization of sugars from the green microalga *Botryococcus braunii*. *Phytochemistry*. 29:1875-1878.
23. Allard, B. and Tazi, A. 1993. Influence of growth status on composition of extracellular polysaccharides ... from two *Chlamydomonas* species. *Phytochemistry*. 32: 41-47.

24. Amemiya, Y. and Nakayama, O. 1984. The chemical composition and metal adsorption capacity of the sheath materials isolated from *Microcystis*, Cyanobacteria. *Journal of Limnology*. 45:187-193.
25. Andrade, A.D., Rollemberg, M.C.E. and Nobrega, J. A. 2005. Proton and metal binding capacity of the green freshwater alga *Chaetophora elegans*. *Process Biochemistry*. 40:1931-1936.
26. Andrade, L.R., Salgado, L.T., Farina, M., Pereira, M.S., Mourao, P.A.S. and Filho, M.A. 2004. Ultrastructure of acidic polysaccharides from the cell walls of brown algae. *Journal of Structural Biology*. 145:216-225.
27. AOAC. 1995. Official Methods of Analysis of AOAC International (Vol. I; 16 th ed.) Arlington, Virginia, USA:AOAC Int.
28. APHA, AWWA and WPCF. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 18th ed., American Public Health Association, Washington, D.C.
29. Apiratikul, R. and Pavasant, P. 2006. Sorption isotherm model for binary component sorption of copper, cadmium, and lead ions using dried green macroalga, *Caulerpa lentillifera*. *Chemical Engineering Journal*. 119:135-145.
30. Arad, S., Friedman, O. and Rotem, A. 1988. Effect of nitrogen on polysaccharide production in a *Porphyridium* sp. *Applied and Environmental Microbiology*. 54:2411-2414.
31. Arad, S., Lerental, Y. and Dubinsky, O. 1992. Effect of nitrate and sulfate starvation on polysaccharide formation in *Rhodella reticulata*. *Bioresource Technology*. 42:141-148.
32. Arora, R. and Palta, J.P. 1988. A loss in the plasma membrane ATPase activity and its recovery coincides with incipient freeze-thaw injury and post-thaw recovery in onion bulb scale tissue. *Plant Physiology*. 95:846-852.
33. Atkinson, B., Bux, F., and Kasan, H. 1998. Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents. *Water SA*. 24:129-135.
34. Aviles, C., Loza-Tavera, H., Terry, N. and Moreno-Sanchez, R. 2003. Mercury pretreatment selects an enhanced cadmium-accumulating phenotype in *Euglena gracilis*. *Archives of Microbiology*. 180:1-10.

35. Axtell, N.R., Sternberg, S.P.K. and Claussen, K. 2003. Lead and nickel removal using *Microspora* and *Lemna minor*. *Bioresource Technology*. 89:41-48.
36. Ayres, D.M., Davis, A. P. and Gietka, P.M. 1994. Removing Heavy Metals from Wastewater. University of Maryland, Engineering Research Center Report. เข้าถึงได้จาก <http://www.mtech.umd.edu/MTES/docs/PMG%20metal%20precip%20man-1.pdf> –
37. Backer, M., Fahselt, D. and Wu, C.T. 2004. Free proline content is positively correlated with copper tolerance of the lichen photobiont *Trebouxia erici* (Chlorophyta). *Plant Science*. 167:151–157.
38. Bajguz, A. 2000. Blockade of heavy metals accumulation in *Chlorella vulgaris* cells by 24-epibrassinolide. *Plant Physiology Biochemistry*. 38:797-801.
39. Bakkaloglu, I., Butter, T.J., Evison, L.M., Holland, F. S. and Hancock, I. C. 1998. Screening of various types biomass for removal and recovery of heavy metals (Zn, Cu, Ni) by biosorption, sedimentation and desorption. *Water Science and Technology*. 38:269-277.
40. Ballan-Dufrançais, C., Marcaillou, C. and Amiard-Triquet, C. 1991. Response of the phytoplanktonic alga *Tetraselmis suecica* to copper and silver exposure: vesicular metal bioaccumulation and lack of starch bodies. *Biology of the Cell*. 72:103–112
41. Baxter, M. and Jensen, T. E. 1980. A study of methods for in situ X-ray energy dispersive analysis of polyphosphate bodies in *Plectonema boryanum*. *Archives of Microbiology*. 126, 213-215.
42. Bayramoglu, G., Tuzun, I., Celik, G., Yilmaz, M. and Arica, M. Y. 2006. Biosorption of mercury(II), cadmium(II) and lead(II) ions from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobilized in alginate beads. *International Journal of Mineral Processing*. 81:35-43.
43. Bedell, G.W. and Darnell, D. W. 1990. Biosorbent and Biosorption Recovery of Heavy metal ions. (Volesky B., Ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.
44. Bekasova, O.D., Brekhovskikh, A.A. and Moskvina, M.I. 2002. Participation of extracellular polysaccharides in detoxification of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum*. *Biofizika*. 47:515-523.
45. Belter, P.A., Cussler, E.L. and Hu, W.S. 1988. *Bioseparations: Downstream Processing for Biotechnology*, Wiley, New York.

46. Bertrand, M., Schoefs, B., Siffel, P., Rohacek, K. and Molnar, I. 2001. Cadmium inhibits epoxidation of diatoxanthin to diadinoxanthin in the xanthophyll cycle of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. FEBS Letters. 508:153-156.
47. Bierkens, J., Maes, J. and Plaetse, V. 1998. Dose-dependent induction of heat shock protein 70 synthesis in *Raphidocelis subcapitata* following exposure to different classes of environmental pollutants. Environmental Pollution. 101:91-97.
48. Blanco, A., Sanz, B., Llima, M.J. and Serr, J.L. 1999. Biosorption of heavy metals to immobilized *Phormidium laminosum* biomass. Journal of Biotechnology. 69:227-240.
49. Bois, D.M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry. 28:350-356.
50. Bold, H.C. and Wynne, M.J. 1978. Introduction to the Algae: Structure and Reproduction. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
51. Bold, H.C., Alexopoulos, C.J. and Delevoryas, T. 1980. Morphology of Plants and Fungi, 4th ed., Harper and Row Publishers, New York.
52. Borde, X., Guieysse, B., Delgado, O., Munoz, R., Hatti-Kaul, R., Nugier-Chauvin, C., Patin, H., Mattiasson, B. 2003. Synergistic relationships in algal-bacterial microcosms for the treatment of aromatic pollutants. Bioresource Technology. 86:293-300.
53. Bourg, A.C.M. 1995. Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility. In Heavy metals (problems and solutions). Springer, London.
54. Bowen, H.J.M. 1966. Trace Elements in Biochemistry Academic Press, London.
55. Bowen, H.J.M. 1979. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London.
56. Bradshaw, D.J., Marsh, P.D., Watson, G.K. and Allison, C. 1998. Role of *Fusobacterium nucleatum* and coaggregation in anaerobe survival in planktonic and biofilm oral microbial communities during aeration. Infect Immunology. 66:4729-4732.

57. Brady, J. and Tobin, J. 1994. Adsorption of metal ions by *Rhizopus arrhizus* biomass: characterization studies. *Enzyme Microbiology Technology*. 16:671-675.
58. Brewer, M. and Scott, T. (Eds.). 1983. *Concise Encyclopedia of Biochemistry*, Walter de Gruyter, Berlin, New York. เข้าถึงได้จาก
www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
59. Brierley, J.L., Brierley, C.L. and Goyal, G.M. 1986. AMT-BIOCLAIM: a new wastewater treatment and metal recovery technology. In: Lawrence, R.W., Branion, R.M., Ebner, H.G. (Eds.). *Fundamental and Applied Biohydrometallurgy*. Elsevier, Amsterdam. pp. 291-294.
60. Bryan, F.W., Potts, F.W. and Forster, G.R. 1997. Heavy metals in the gastropod mollusc *Haliotis tuberculata*. *Journal of Marine Biology*. 57:379-390.
61. Bryan, G.W. 1969. The absorption of zinc and other metals by the brown seaweed *Laminaria digitata*. *Journal of Marine Biology*. 49:225-243.
62. Buckley, J.A. 1994. The bioavailability of copper in wastewater to *Lemna minor* with biological and electrochemical measures of complexation. *Water Research*. 28:2457-2467.
63. Calvin, R.B. 1993. *Hazardous Waste Incineration* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
64. Carr, H.P., Carino, F.A., Yang, M.S., and Wong, M.H. 1998. Characterization of the cadmium-binding capacity of *Chlorella vulgaris*. *Bulletin of Environmental Contaminate Toxicology*. 60:433-440.
65. Chapman, V.J. and Chapman, D.J. 1980. *Seaweeds and Their Uses*. Chapman and Hall, New York.
66. Chapman, V.J. and Chapman, F.J. 1981. *The Algae*. The Macmillan Press Ltd., London.
67. Chen, J.Z., Tao, X.C., Xu, J., Zhang, T. and Liu, Z.L. 2005. Biosorption of lead, cadmium and mercury by immobilized *Microcystis aeruginosa* in a column. *Process Biochemistry*. 40:3675-3679.
68. Chen, Z., Ren, L., Shao, Q., Shi, D. and Ru, B. 1999. Expression of mammalian metallothionein-I gene in cyanobacteria to enhance heavy metal resistance. *Marine Pollution Bulletin*. 39:155-158.

69. Cheremisinoff, P.N. and Cheremisinoff, N.P. 1993. Lead: A Guidebook to Hazard Detection, Remediation and Control. PTR Prentice Hall, Inc., New Jersey.
70. Cho, D.U., Lee, S.T., Park, S.W. and Chung, A.A. 1994. Studies on the biosorption of heavy metals onto *Chlorella vulgaris*. Journal of Environmental Science and Health. 29:389-409.
71. Chojnacka, K., Chojnacki, A. and Gorecka, H. 2005. Biosorption of Cr^{3+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} ions by blue-green algae *Spirulina* sp.: kinetics, equilibrium and the mechanism of the process. Chemosphere. 59:75-84.
72. Christensen, T. 1962. Alger, in *Botanik*, II, Nr. 2, Systematic *Botanik*. Munksgaard, Copenhagen.
73. Chu, F.-L. E., Dupuy, J. L. and Webb, K. L. 1982. Polysaccharide composition of five algal species used as food for larvae of the American oyster, *Crassostrea virginica*. Aquaculture. 29:241-252.
74. Chu, K. H. 2004. Improved fixed bed models for metal biosorption. Chemical Engineering Journal. 97:233-239.
75. Chu, K.H., Hashim, M.A., Phang, S.M. and Samuel, V.B. 1997. Biosorption of cadmium by algal biomass: adsorption and desorption characteristics. Water Science Technology. 35:115-122.
76. Cid, A., Herrero, C., Torres, E. and Abalde, J. 1995. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricornutum*: effects on photosynthesis and related parameters. Aquatic Toxicology. 31:165-174.
77. Clijsters, H. and Vanassche, F. 1985. Inhibition of photosynthesis by heavy metals. Photosynthesis Research. 7:31-40.
78. Cobbett, C. and Goldsbrough, P. 2002. Phytochelatin and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. Annual Review of Plant Biology. 53:159-182.
79. Colombini, M.P., Ceccarini, A. and Carmignani, A. 2002. Ion chromatography characterization of polysaccharides in ancient wall paintings. Journal of Chromatography. 968:79-88.
80. Cooney, D.O. 1998. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Lewis Publishers, London.
81. Corpe, W.A. 1975. Metal-binding properties of surface materials from marine bacteria. Microbiology. 16:249-255.

82. Costa, A.C.A. and Leite, S.G.F. 1990. Cadmium and zinc biosorption by *Chlorella homosphaera*. *Biotechnology Letters*. 12:941-944.
83. Costa, A.C.A., Mesquita, L.M.S. and Tornovsky, J. 1996. Batch and continuous heavy metals biosorption by a brown seaweed from a zinc-producing plant. *Minerals Engineering*. 9:811-824.
84. Costerton, J.W. 1994. Structure of Biofilm. In: *Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems*. Boca Raton, Lewis Publishers.
85. Crang, R.E. and Jensen, T.E. 1975. Incorporation of titanium in polyphosphate bodies of *Anacystis nidulans*. *Journal of Cell Biology*. 67:80a.
86. Crist, D.R., Crist, R.H., Martin, J.R. and Watson, J.R. 1994. Ion exchange systems in proton-metal reactions with algal cell walls. *FEMS Microbiology Reviews*. 14:309-314.
87. Critchley, A.T. 1993. *Seaweed Cultivation and Marine Ranching*. Kanagawa International Fisheries Training Center, Japan International Cooperation Agency, Yokosuka.
88. Cruz, C.C.V., da Costa, A.C.A., Henriques, C.A. and Luna, A.S. 2004. Kinetic modeling and equilibrium studies during cadmium biosorption by dried *Sargassum* sp. biomass. *Bioresource Technology*. 91:249-257.
89. Dameron, C.T., Reese, R.N., Mehra, R.K., Kortan, A.R., Carroll, P.J., Steigerwald, M.L., Brus, L.E. and Winge, D.R. 1989. Biosynthesis of cadmium sulfide quantum semiconductor crystallites. *Nature*. 338:596-597.
90. Donald, L.S. 1995. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, USA.
91. Darnall, D.W. 1991. Removal and recovery of heavy metals from wastewater using a new biosorbent AlgaSORB. *Innovative Hazardous Waste Treatment Technology Service*. 3:65-72.
92. Dassy, B., Stringfellow, W.T., Lieb, M. and Fournier, J.M. 1991. Production of capsular polysaccharide by *Staphylococcus aureus* grown in semi-synthetic medium. *Journal of General Microbiology*. 137:1155-1162.
93. Datta, M. 1997a. Landfill Planning and Design Considerations. *In Waste Disposal in Engineered Landfills*. Narosa Publishing House, London.
94. Datta, M. 1997b. *Waste Disposal in Engineered Landfills*. Narosa Publishing House, London.

95. Davies, B. E. 1987. Consequences of environmental contamination by lead mining in Wales. *Hydrobiologia*. 49:213. In www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
96. Davis, T. A., Volesky, B. and Mucci, A. 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*. 37:4311-4330.
97. Debusk, T.A., Laughlin, R.B. and Schwartz, L.N. 1996. Retention and compartmentalization of lead and cadmium in wetland microcosms. *Water Research*. 30:2707-2716.
98. Decho, A.W. and Herndl, G.J. 1995. Microbial activities and the transformation of organic matter within mucilaginous material. *Science of the Total Environment*. 165:33-42.
99. Deng, L., Su, Y., Su, H., Wang, X. and Zhu, X. 2006. Sorption and desorption of lead (II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*. *Journal of Hazardous Materials*. *In Press*.
100. Desikachary, T.V. 1959. Cyanophyta. Indian council of Agricultural Research, New Delhi.
101. Devars, S., Aviles, C. and Cervantes, C. 2000. Mercury uptake and removal by *Euglena gracilis*. *Archives Microbiology*. 174:175-180.
102. Devars, S., Hernandez, R. and Sanchez, R.M. 1998. Enhanced heavy metal tolerance in two strains of photosynthetic *Euglena gracilis* by preexposure to mercury or cadmium. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*. 34:128-135.
103. Diels, L., Spaans, P.H., Van, R.S., Hooyberghs, L., Wouters, H. and Walter, E. 1999. Heavy metals removal by sand filters inoculated with metal sorbing and precipitating bacteria. In: *Biohydrometallurgy and the environment toward the mining of the 21 st century: Part B. Molecular biology, biosorption, bioremediation*. Amsterdam: Elsevier.
104. Division of Pollution Control. 1997. The situation of pollution in Thailand. Division of Pollution Control. Department of Environmental and Technology.
105. Domenico, P., Diedrich, D.L. and Cunha, B.A. 1989. Quantitative extraction and purification of exopolysaccharides from *Klebsiella pneumoniae*. *Journal of microbiological Methods*. 9:211-219.
106. Domínguez, M.J., Gutiérrez, F., Leon, R., Vilchez, C., Vega, J.M. and Vígara, J. 2003. Cadmium increases the activity levels of glutamate dehydrogenase and

- cysteine synthase in *Chlamydomonas reinhardtii*. Plant Physiology and Biochemistry. 41:828–832.
107. Domínguez-Solís, J.R., Gutierrez-Alcala, G., Romero, L.C. and Gotor, C. 2001. The cytosolic O-acetylserine(thiol)lyase gene is regulated by heavy metals and can function in cadmium tolerance. Journal of Biological Chemistry. 276:9297–9302.
 108. Donch, J. and Greenberg, J. 1970. Protection against lethal effects of ultraviolet light on *Escherichia coli* by capsular polysaccharide. Mutation Research. 10:153-155.
 109. Donmez, G.C., Aksu, Z., Ozturk, A. and Kutsal, T. 1999. A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. Process Biochemistry. 34:885-892.
 110. Duangkorkkrud, N. 2002. Removal of cadmium and lead in aqueous solution by *Nostoc paludosum* and *Phormidium angustissimum*. M.S.. Thesis, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University.
 111. Eccles, H. 1999. Treatment of metal-contaminated wastes: why select a biological process?. Trend in Biotechnology. 12:462-465.
 112. Eckenfelder, W.W. 1989. Industrial Water Pollution Control. McGraw-Hill Book Company, New York.
 113. Egerod, L.E. 1945. Marine algae of the Andaman Sea coast of Thailand: Chlorophyceae. Botanica Marina. 18:41-66.
 114. Egerod, L.E. 1952. An analysis of the siphonous Chlorophycophyta. University of California Publications in Botany. 25:325-454.
 115. El-Enany, A.E. and Issa, A.A. 2000. Cyanobacteria as a biosorbent of heavy metals in sewage water. Environmental Toxicology and Pharmacology. 8:95-101.
 116. El-Enany, A.E. and Issa, A.A. 2001. Proline alleviates heavy metal stress in *Scenedesmus armatus*. Folia Microbiologica. 46:227–230.
 117. Engel, A. 2004. Distribution of transparent exopolymer particles (TEP) in the northeast Atlantic Ocean and their potential significance for aggregation processes. Deep-Sea Research. 51:83-92.
 118. Ensley, B.D. 2000. Rationale for use of phytoremediation. In Phytoremediation of toxic metals. John Wiley & Sons, Inc., New York.

119. Ercole, C., Veglio, F., Toro, L., Ficara, G. and Lepidi, A. 1994. Immobilisation of microbial cells for metal adsorption and desorption. *In* Mineral Bioprocessing II. Snowboard. Utah.
120. Erten-Unal, M. and Wixson, B.G. 1999. Biotreatment and chemical speciation of lead and zinc mine/mill wastewater discharges in Missouri. USA. *Water, Air and Soil Pollution*. 116:501-522.
121. Eyster, C. 1952. Necessity of boron for *Nostoc muscorum*. *Nature*. 170:755.
122. Fang, H.H.P., Liu, H. and Zhang, T. 2002. Characterization of a hydrogen producing granular sludge. *Biotechnology and Bioengineering*. 78:44-52.
123. Feng, D. and Aldrich, C. 2004. Adsorption of heavy metals by biomaterials derived from the marine alga *Ecklonia maxima*. *Hydrometallurgy*. 73:1-10.
124. Fernandez, A. and Diaz, M. 1995. Kinetic mechanisms in ion exchange processes. *The Chemical Engineering Journal*. 57:17-25.
125. Fernandez-Pinas, F., Nateo, P. and Bonilla, I. 1997. Effect of cadmium on the bioelement composition of *Nostoc* UAM208: interaction with calcium, *Bulletin of Environmental Contaminate Toxicology*. 58:543-549.
126. Filbin, G. and Hough, A. 1979. The effects of excess copper sulfate on metabolism of the duckweed *Lemna minor* L. *Aquatic Botany*. 7:79-86.
127. Flexner, S.B. (Ed.). 1987. *The Random House Dictionary of the English Language*, 2nd ed., Random House, New York.
www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
128. Fogg, G.E. 1966. The extracellular products of algae. *Oceanography Marine Biology*. 4:195-212.
129. Fogg, G.E. 1977. Excretions of organic matter by phytoplankton. *Limnology Oceanography*. 22:576-577.
130. Fourest, E. and Roux, J. 1992. Heavy metal biosorption by fungal mycelial by product: mechanisms and influence of pH. *Applied Microbiology Biotechnology*. 37: 399-403.
131. Frache, R., Baffi, F., Dadone, A. and Zanicchi, G. 1976. The determination of heavy metals in the Liguarina Sea. I. The distribution of copper, cobalt, nickel, and cadmium in surface water. *Marine chemistry*. 4:365-375.
132. Francke, J.A. and Hillebrand, H. 1980. Effects of copper on some filamentous *Chlorophyta*. *Aquatic Botany*. 8:285-289.

133. Franklin, N.M., Adams, M.S., Stauber, J.L. and Lim, R.P. 2001. Development of an improved rapid enzyme inhibition bioassay with marine and freshwater microalgae using flow cytometry. *Archives Environmental Contamination Toxicology*. 40:469-480.
134. Friberg, I., Elinder, C.G. and Kjelstrom, C. 1992. Environmental Health Criteria Cadmium. Van Nostrand Reinhold Company, Finland.
135. Friberg, S.E. 1992. Amphiphilic association structures and thin films. *Langmuir*. 8:8-16
136. Friis, N. and Myers-Keith, P. 1986. Biosorption of uranium and lead by *Streptomyces longwoodensis*. *Biotechnol Bioeng*. 28:21-28.
137. Fritsch, F.E. 1952. The Structure and Reproduction of the Algae. The University Press, Cambridge.
138. Fujita, M. and Hashizume, K. 1975. Status of uptake of mercury by the freshwater diatom *Synedra ulna*. *Water Research*. 9:889-894.
139. Fukami, K., Nishijima, T. and Ishida, Y. 1997. Stimulative and inhibitory effects of bacteria on the growth of microalgae. *Hydrobiologia*. 358:185-191.
140. Fukami, M., Ohbayashi, H., Yoshioka, Y., Kuroishi, M., Yamazaki, S. and Toda, S. 1988. A zinc tolerant chlorotic mutant strain of *Euglena gracilis* induced by zinc. *Agricultural Biology and Chemistry*. Tokyo. 52:601-604
141. Gadd, G.M. 1988. Heavy metal and radionuclide by fungi and yeasts. *In* Biohydrometallurgy. A. Rowe, Chippenham, Wilts., U.K.
142. Gadd, G.M. 1990. Fungi and yeast metal accumulation. *In* Microbiol Mineral Recovery, McGraw-Hill, New York.
143. Gadd, G.M. 2004. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation. *Geoderma*. 122:109-119.
144. Galun, M., Galun, E., Siegel, B.Z., Keller, P., Lehr, H. and Siegel, S.M. 1987. Removal of metal ions from aqueous solutions by *Penicillium* biomass: kinetic and uptake parameters. *Water Air and Soil Pollution*. 33:359-371.
145. Garbacki, N., Gloaguen, V., Damas, J., Hoffmann, L., Tits, M. and Angenot, L. 2000. Inhibition of croton oil-induced oedema in mice ear skin by capsular polysaccharides from cyanobacteria. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 361:460-464.

146. Garnham, G., Codd, G. and Gadd, G. 1992. Kinetics of uptake and intracellular location of cobalt, manganese and zinc in the estuarine green algae *Chlorella salina*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 37:270-276.
147. Garozzo, D., Impallomeni, G., Spina, E. and Sturiale, L. 1998. The structure of the exocellular polysaccharide from the cyanobacterium *Cyanospira capsulate*. *Carbohydrate Research*. 307: 113-124.
148. Garvacki, N., Gloaguen, V., Damas, J., Hoffmann, L., Tits, M. and Angenot, L. 2000. Inhibition of croton oil-induced oedema in mice ear skin by capsular polysaccharides from cyanobacteria. *Naunyn-Schmiedeberg's. Archives of Pharmacology*. 361:460-464.
149. Gaur, J.P. and Rai, L.C. 2001. Heavy Metal Tolerance in Algae. *In*: Rai, L.C. and Gaur, J.P. (Ed.) *Algal Adaptation to Environmental Stresses. Physiological, Biochemical and Molecular Mechanisms*, Springer-Verlag, Berlin.
150. Gavrilescu, M. 2004. Removal of heavy metal from the environment by biosorption, *Engineering in Life Science*. 4:219-232.
151. Gee, A.R. and Dudeney, A.W.L. 1988. Adsorption and crystallization of gold on biological surfaces. *In* *Biohydrometallurgy. Science and Technology Letters*, London.
152. Geesey, G. and Jang, L. 1990. Extracellular polymers for metal binding. *In*: Ehrlich, H.L., Brierley, C.L. (Eds.), *Microbial Mineral recovery*. McGraw-Hill Publishing Company, New York.
153. Geisweid, H.J. and Urbach, W. 1983. Sorption of cadmium by the green microalgae *Chlorella vulgaris*, *Ankistrodesmus braunii* and *Eremosphaera viridis*. *Zpflanzenphysiol Bd*. 109:127-141.
154. Gekeler, W., Grill, E., Winnacker, E.L. and Zenk, M.H. 1988. Algae sequester heavy metals via synthesis of phytochelatin complexes. *Archives Microbiology*. 150:197-202.
155. Gimmler, H., Kugel, H., Leibfritz, D. and Mayer, A. 1988. Cytoplasmic pH of *Dunaliella parva* and *Dunaliella acidophila* as monitored by in vivo ³¹P-NMR spectroscopy and the DMO method. *Physiology of Plant*. 47:521-530.
156. Gimmler, H., Treffny, B., Kowalski, M. and Zimmermann, U. 1991. The resistance of *Dunaliella acidophila* against heavy metals: The importance of the zeta potential. *Journal of Plant Physiology*. 138:708-716.

157. Gin, K.Y.H., Tang, Y.Z. and Aziz, M.A. 2002. Derivation and application of a new model for heavy metal biosorption by algae. *Water Research*. 36:1313-1323.
158. Golab, Z. and Smith, R.W. 1992. Accumulation of lead in two fresh water algae. *Minerals Engineering*. 5:1003-1010.
159. Gold, C., Maxel, A.F., Coste, M. and Boudou, A. 2002. Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd, Zn) in rivers. *Water Research*. 36:3654-3664.
160. Goldschmidt, V.M. 1958. *Geochemistry*. Oxford University Press, London, England.
161. Gorham, P.R. 1950. Heterotrophic nutrition of seed plants with particular reference to *Lemna minor* L. *Canadian Journal Research*. 28:356-381.
162. Grant, R. and Grant, C. (Eds.). 1987. *Grant and Hackh's Chemical Dictionary*, McGraw-Hill, New York. เข้าถึงได้จาก www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
163. Grill, E., Löffler, S., Winnacker, E.L. and Zenk, M.H. 1989. Phytochelatins, the heavy-metal-binding peptides of plants, are synthesized from glutathione by specific γ -glutamylcysteine dipeptidyl transpeptidase (phytochelatin synthase). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 86:6838-6842.
164. Grill, E., Winnacker, E.L. and Zenk, M.H. 1985. Phytochelatins: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants. *Science*. 230:674-676.
165. Grill, E., Winnacker, E.L. and Zenk, M.H. 1987. Phytochelatins, a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 84:439-443.
166. Guibaud, G., Tixier, N., Bouju, A. and Baudu, M. 2003. Relation between extracellular polymers' composition and its ability to biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: kinetics complex Cd, Cu and Pb. *Chemosphere*. 52:1701-1710.
167. Gupta, V.K., Rastogi, A., Saini, V.K. and Jain, N. 2006. Biosorption of copper(II) from aqueous solution by *Spirogyra* species. *Journal of Colloid and Interface Science*. 296:59-63.

168. Gupta, V.K., Shrivastava, A.K. and Jain, N. 2001. Biosorption of chromium(VI) from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species. *Water Research*. 35:4079-4085.
169. Gutknecht, J. 1963. Zinc 65 uptake by benthic marine algae. *Limnology Oceanography*. 8:31-38.
170. Gutnick, D.L. and Bach, H. 2000. Engineering bacterial biopolymers for the biosorption of heavy metals; new products and novel formulations. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 54:451-460.
171. Hammouda, O., Gaber, A. and Abdel-Raouf, N. 1995. Microalgae and wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 31:205-210.
172. Harel, P., Mignot, L., Sauvage, J.P. and Junter, G.A. 1998. Cadmium removal from dilute aqueous solution by gel beads of sugar beet pectin. *Industrial Crops and Products*. 7:239-247.
173. Hart, B.A. and Scaife, B.D. 1977. Toxicity and bioaccumulation of cadmium in *Chlorella pyrenoidosa*. *Environmental Research*. 14:401-413.
174. Hart, B.A., Bertram, P.E. and Scaife, B.C. 1979. Cadmium transport by *Chlorella pyrenoidosa*. *Environmental Research*. 18:327-335.
175. Hashim, M.A. and Chu, K.H. 2004. Biosorption of cadmium by brown, green, and red seaweeds. *Chemical Engineering Journal*. 97:249-255.
176. Haug, A. and Smidsrod, O. 1970. Selectivity of some anionic polymers for divalent metal ions. *ACTA Chemica Scandinavica*. 24:843-854.
177. Hayashi, T., Hayashi, K., Maeda, M. and Kojima, I. 1995. Calcium Spirulan, and inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green algal *Spirulina platensis*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 1:83-87.
178. Helm, R.F., Huang, Z., Edwards, D., Leeson, H., Peery, W. and Potts, M. 2000. Structural characterization of the released polysaccharide of desiccation-tolerant *Nostoc commune* DRH-1. *Journal of Bacteriology*. 182:974-982.
179. Herrero, R., Cordero, B., Lodeiro, P., Rey-Castro, C. and de Vicente, M.E.S. 2006. Interactions of cadmium(II) and protons with dead biomass of marine algae *Fucus* sp. *Marine Chemistry*. 99:106-116.
180. Herrero, R., Lodeiro, P., Rey-Castro, C., Vilarino, T. and de Vicente, M.E.S. 2005. Removal of inorganic mercury from aqueous solutions by biomass of the marine macroalga *Cystoseira baccata*. *Water Research*. 39:3199-3210.

181. Hessler, A. 1974. The effects of lead on algae: effects of Pb on viability and motility of *Platymonas subcordiformis* (Chlorophyta, Volvocales). *Water Air and Soil Pollution*. 3:371-385.
182. Heuillet, E., Moreau, A., Halpren, S., Jeanne, N. and Puiseux-Da, S. 1986. Cadmium binding to a thiol molecule in vacuoles of *Dunaliella bioculata* contaminated with CdCl₂: electron probe microanalysis. *Biology of the Cell*. 58:79-86.
183. Hindak, F., Komarek, J., Marvan, P. and Ruzicka, J. 1975. Determination Key for Lower plants. I. Algae, SPN Bratislava. (in Slovak).
184. Hirata, K., Tsuji, N. and Miyamoto, K. 2005. Biosynthetic regulation of phytochelatin, heavy metal-binding peptides. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 100:593-599.
185. Hirata, K., Tsujimoto, Y., Namba, T., Ohta, T., Hirayanagi, N., Miyasaka, H., Zenk, M.H. and Miyamoto, K. 2001. Strong induction of phytochelatin synthesis by zinc in marine green algae. *Dunaliella tertiolecta*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 92:24-29.
186. Hiroyuki, K. and Lee, Y.K. 2001. *Photosynthetic Microorganisms in Environmental Biotechnology*. Springer.
187. Hoffmann, E.M. and Bauknecht, N. 1999. A dye binding assay for the quantification of soluble and cell-bound acidic polysaccharides produced by red algae. *Analytical Biochemistry*. 267:245-251.
188. Horikoshi, T., Nakajima, A., Sakaguchi, T. 1979. Uptake of uranium form sea water by *Synechococcus elongatus*. *Journal of Fermentation Technology*. 57:191-194.
189. Hosea, M., Greene, B., Mcpherson, R., Henzl, M., Alexander, M.D. and Darnall, D.W. 1986. Accumulation of elemental gold on the alga *Chlorella vulgaris*. *Inorganica Chimica Acta*. 123:161-165.
190. Howden, R., Goldsbrough, P.B., Andersen, C.R. and Cobbett, C.S. 1995. A cadmium-sensitive, glutathione-deficient mutant of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*. 107:1059-1066.
191. Howe, G. and Merchant, S. 1992. Heavy metal-activated synthesis of peptides in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology*. 98:127-136.
192. http://www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry/thermodynamics/entropy1.htm -

4k)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

193. http://203.157.15.4/Annual/Annual49/Part1/48_HeavyMetalPoisoning.doc
194. <http://203.158.100.140/chemistry-glossary/index>
195. <http://203.158.6.144/Learning/Engineering/432311/Chapter%209%20Membrane%20Processes.ppt>
196. http://210.246.186.28/sootin_webs/fert_gloss/s/sludge_acid.htm
197. http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573
198. <http://aslo.org/photopost/data/516/14Cyclotella-thumb.jpg&imgrefurl>
199. <http://biosorption.mcgill.ca/whatis.htm>
200. <http://board.dsserver.org/w/wwwt/00000125.html>
201. <http://bp1.blogger.com/s320/dinoflagellate.gif&imgrefurl>
202. <http://clu-in.org/products/site/complete/images/resource.jpg&imgrefurl>
203. http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Rotating_Biological_Contactor.png
204. http://courses.bio.psu.edu/fall2005/biol110/tutorials/tutorial30_files/cladophora.jpg
205. http://courses.bio.psu.edu/spring/biol415/web_projects_2005/nuclear/0017_ocean.jpg
206. <http://coursev4files.cod.edu/fancher/ProkaryoticCellLabeled.jpg>
207. <http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/bruice2/chapter1/deluxe.html>
208. <http://dredgemanagementsolutions.com>
209. <http://drug.pharmacy.psu.ac.th/Question.asp?ID=9522&gid=7>
210. <http://ebook.nfe.go.th/ebook/html/021-bk/105.htm>
211. <http://elibrary.eduzones.com/index.php?title>
212. <http://elibrary.eduzones.com/index.php?title=Co-60>
213. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bioaccumulation>
214. <http://en.wikipedia.org/wiki/Desorption>
215. http://en.wikipedia.org/wiki/Metallothionein#Metal_binding
216. <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/ionicradius.html>
217. <http://environmentdirectory.com.au/technologies/Hightemp1.html>, http://www.drugdonations.org/eng/richtlijnen/eng_richtlijnenvernietiginggeneesmiddelen.html#13
218. <http://epid.moph.go.th>
219. <http://faculty.clintoncc.suny.edu/faculty/michael.gregory/Macrocyctis.jpg>
220. <http://food.oregonstate.edu/images/hydrocolloids/67.gif&imgrefurl=>
221. http://genome.jgi-psf.org/euk_cur1.html Phaeodactylum%
222. <http://genomebiology.com/content/figures/gb-2001-2-8-reviews1022-1.jpg>
223. http://george-eby-research.com/html/stability_constants.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ได้ทุกประการ หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

224. http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php&select=1
225. http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php?
226. <http://hydrodictyon.eeb.uconn.edu/people/llewis/hydrodictyonB.jpg&imgrefurl>
227. <http://hypnea.botany.uwc.ac.za/phylogeny/classif/images/euglena2b.gif>
228. <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://education.usace.army.mil/navigation/lessons/8/images/splithull3.jpg&imgrefurl>
229. http://io.uwinnipeg.ca/~simmons/16labman05/lb1pg7_files/Chlorella2.jpg&imgrefurl
230. <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK15/chapter7/t15-7-l2.htm>
231. <http://km.wu.ac.th/forum/viewPost.php?PostID=145&ForumID=4&ForumName>
232. <http://lib.kku.ac.th/fulltext/Eng/chap21.pdf>
233. <http://magnolia.s.kanazawa-u.ac.jp/ishida/gallery/Heterocapsa.jpg&imgrefurl>
234. <http://mail.menr.gov.ua/publ/redbook/pic/15/00.jpg&imgrefurl>
235. http://massbay.mit.edu/exoticspecies/exoticmaps/images/codium_big.jpg&imgrefurl
236. http://members.tripod.com/chem_atom_yothin/table.htm#4 อีเล็กโตรเนกาติวิตี
237. http://micro.sakura.ne.jp/bod/sgm_haslea.jpg&imgrefurl
238. <http://microscope.mbl.edu/scripts/microscope.php?func=imgDetail&imageID=2613>
239. <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=160>
240. <http://mulinet6.li.mahidol.ac.th/cd-rom/cd-rom0306t/web/electrochem01.htm>
241. http://peixes.brasilmergulho.com.br/albums/userpics/10001/normal_Gracilaria
242. <http://perfect-printables.com/documents/printableperiodictable.html>
243. <http://pha.narak.com/topic.php?No=01499>
244. <http://pharmacy.kku.ac.th/analyse1/index.php?p=193>
245. <http://plantphys.info/organismal/lehtml/images/anabaena.jpg>
246. http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/images/Prokaryotes/Chroococcaceae/Synechocystis/Synechocystis_4.jpg&imgrefurl
247. <http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB6/PCD0049/Z/26.jpg&imgrefurl>
248. <http://pt-lobos.parks.state.ca.us/Images/Macrocytis%20by%20Shargel>
249. <http://reefkeeping.com/issues/2006-10/rhf/index.php>
250. <http://rydberg.biology.colostate.edu/Phytoremediation/2003/Boczon/chlamydomonas02.jpg&imgrefurl>

251. http://silicasecchidisk.conncoll.edu/Pics/Other%2520Algae/Green_jpegs/Chlorococcum_Key108.jpg&imgrefurl
252. http://silicasecchidisk.conncoll.edu/Pics/Other%2520Algae/Other_jpegs/Cyclotella
253. http://siweb.dss.go.th/information/search_option2.asp?sub_RF_ID=69
254. <http://student.nu.ac.th/46410551/lesson4.htm>
255. <http://th.wikipedia.org/w/index.php?title>
256. <http://th.wikipedia.org/wiki>
257. http://th.wikipedia.org/wiki/วิกิพีเดีย_สารานุกรมเสรี
258. http://the.honoluluadvertiser.com/dailypix/2005/Oct/26/FPI510260302AR_b.jpg
259. <http://toxics.usgs.gov/definitions/bioaccumulation.html>
260. <http://tsl.tsu.ac.th/file.php/1/courseware/chemistry/Lesson1/lesson1-5.htm>
261. <http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenter-uploads/libs/html/4138/intro.html>
262. <http://vis-pc.plantbio.ohiou.edu/algaeimage/jpegs>
263. <http://web.ku.ac.th/schoolnet>
264. <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/water/solu.htm>
265. http://webdb.dmhc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296
266. <http://webhost.wu.ac.th/wuchem/chem1/#พันธะไอออนิก>
267. http://wikipedia/commons/thumb/Fucus_vesiculosus.jpg/
268. <http://wmr.sagepub.com/cgi/content/abstract/6/1/217>
269. http://www.Environment.in.th/news/news_detail.asp?id=381
270. <http://www.203.157.67.80/admin/viewDocArticle.php?articleid=25>
271. <http://www.aad.gov.au/MediaLibrary/asset/mediaitems/Durvillaea.jpg>
272. <http://www.activated-carbon.com/images/fig8.gif&imgrefurl>
273. http://www.agen.ufl.edu/~chyn/age2062/lect/lect_15/22_15.GIF
274. <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shokusei/fujita/SynechoPCC6803.gif&imgrefurl>
275. http://www.anamai.moph.go.th/chemnet/data_1.asp?offset=61
276. <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/canlilar/img/Gleocapsa.jpg>
277. http://www.bio.mtu.edu/the_wall/phycodisc/CHLOROPHYTA/gfx/CAULERPA.jpg
278. <http://www.biol.tsukuba.ac.jp/~inouye/ino/g/chl/hydrodictyon.jpg>
279. <http://www.biopix.dk/Temp/JCS%20Chondrus%20crispus%2015577.jpg>
280. <http://www.biosite.dk/leksikon/images/mannan.gif&imgrefurl>
281. <http://www.boomeria.org/.../textass2/firstsemass.html>
282. <http://www.botany.hawaii.edu/BOT201/Algae/Bot%20201%20Cyclotella.jpg>

283. <http://www.botany.hawaii.edu/GradStud/smith/websites/Gracilaria3.jpg>
284. http://www.bovorn.com/knowledge_3_3.html
285. <http://www.canari.org/gelidium-6%20for%20site.JPG>
286. <http://www.celsias.com/blog/images/mustard-gas-dumping.jpg&imgrefurl>
287. <http://www.cermav.cnrs.fr/glyco3d/lessons/modeling/fig11.gif&imgrefurl>
288. http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat2_6.htm
289. <http://www.chemicool.com/definition/phytochelatin.html>
290. http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302112/Cpx_ppt2.pdf
291. <http://www.chemtrack.org/Board-Detail.asp?TID=0&ID=5>
292. <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp>
293. <http://www.cibnor.mx/servicios/dat/labs/labcont.php>
294. http://www.cyanogroup.com/sitebuildercontent/sitebuilderpictures/.pond/AN_SEM.jpg.w300h241.jpg
295. <http://www.cybercolloids.net/library/carrageenan/kappa-structure.gif>
296. <http://www.deepseaimages.com/dsilibrary/data/1052/T0185.jpg>
297. <http://www.dipbot.unict.it/sistematica/Immagini/07006.JPG&imgrefurl>
298. <http://www.dkimages.com/discover/previews/889/85001718.JPG&imgrefurl>
299. http://www.dmr.go.th/news_dmr/data/0621.html
300. http://www.dnr.state.md.us/Bay/cblife/algae/diatom/skeletonema_costatum_large.jpg
301. <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001085547312>
302. http://www.dr-ralf-wagner.de/Bilder/Chaetophora_elegans-SM.jpg
303. <http://www.etc.org/technologicalandenvironmentalissues/treatmenttechnologies/landfills/>
304. <http://www.fao.org/docrep/field>
305. http://www.fluwikie.com/uploads/Science/eukaryotic_cell.png
306. <http://www.food-info.net/images/pectin.jpg>
307. <http://www.frontiernet.net/~playfair/4sale/macro.jpg>
308. <http://www.geocities.com/vitandmin/MANGANESE.htm>
309. http://www.george-eby-research.com/html/stability_constant
310. http://www.geothai.net/images/geothai_banner.gif
311. <http://www.glerl.noaa.gov/seagrant/GLWL/Algae/Chlorophyta/Images/Chaetophora.jpg>
312. <http://www.herbdatanz.com/chondrus.gif>

313. http://www.horta.uac.pt/species/Algae/Palmaria_palmata/Palmaria_palmata
314. http://www.ibvf.cartuja.csic.es/Cultivos/fotos/Synechococcus_PCC_7942_dis.jpg&imgrefurl
315. <http://www.jonolavsakvarium.com/blog/200708/ulva.jpg>
316. http://www.keweenawalgae.mtu.edu/ALGAL_IMAGES/cyanobacteria/Chroococcus_jason_pbog17_4016.jpg&imgrefurl
317. <http://www.kmutt.ac.th/rippc/pron317.htm>
318. <http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/Projects/2001/ooi/fig1.1.gif&imgrefurl>
319. <http://www.marinebiology.edu/Phytoplankton/profiles/tetraselmis2.jpg>
320. <http://www.mbari.org/staff/conn/botany/browns/jacquie/morph.jpg>
321. <http://www.micrographia.com/specbiol/bacteri/bacter/bact0200/anabae03.jpg&imgrefurl>
322. <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/imagsmall/hydrodictyon.jpg&imgrefurl>
323. <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/imgoct05/Scenedesmus-opoliensis.jpg>
324. <http://www.naturephoto-cz.eu/pic/ceteri/ascophyllum-nodosum-1304.jpg>
325. <http://www.ndsu.nodak.edu/instruct/fawley/coccoids/ltasca/An1-12-5.jpg&imgrefurl>
326. <http://www.ndu.ac.jp/~t-nagumo/taxa/SkeletonemaSEM.jpg&imgrefurl=http>
327. <http://www.ne.jp/asahi/marine/algae/Kjellmaniella1.jpg&imgrefurl>
328. <http://www.nhm.ac.uk/research-curation/projects/algaevision/about-algae/about-algae.html>
329. <http://www.oceanproaquatics.com/shop/images/Spaghettialgae.jpg>
330. <http://www.olympusmicro.com/micd/galleries/brightfield/polysiphonia.html>
331. <http://www.onr.navy.mil/Focus/ocean/images/habitats/kelpai.jpg&imgrefurl>
332. <http://www.palaeos.com/Fungi/FPieces/Images/Glucose.gif>
333. http://www.pcd.go.th/info_serv/QandA/defaultThai.cfm?task=listVocab
334. http://www.pcd.go.th/Info_serv/water_wt.html
335. <http://www.plantgeek.net/images/plantpics/Cladophora2.jpg>
336. http://www.prachinhealthylife.net/text/dof_text2.htm
337. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47350/chlorella2.gif&imgrefurl
338. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47378/Oocystis.gif
339. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47710/Microspora.gif
340. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47714/Oedogonium.gif

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เอกสารอ้างอิง

341. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47738/Ulothrix.gif
342. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47747/Schizomeris2.gif
343. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/47952/stigonema2.gif
344. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/48235/Scenedesmus.gif
345. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/48426/gloeothece2.gif
346. http://www.rbgsyd.nsw.gov.au/__data/assets/image/48452/tolypothrix2.gif
347. <http://www.rembar.com/PeriodicTable.htm>
348. <http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/65/nuclear1/co60leak.htm>
349. http://www.sb-roscoff.fr/Phyto/gallery/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=377&g2_serialNumber=2
350. <http://www.school.net.th/library/snet5/topic2/Hg.html>
351. http://www.school.net.th/library/snet5/topic8/function_g.html
352. <http://www.sci.nu.ac.th/chemistry/elearning/E%20Learning/Chapters/Kinetics.htm>
353. <http://www.sci.nu.ac.th/chemistry/elearning/E%20Learning/Chapters/Kinetics/Temperature.htm>
354. <http://www.sciencedaily.com/images/2006/09/060915204728.jpg>
355. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGF-4D09H4F-
356. <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrat>
357. <http://www.scientificpsychic.com/fitness/xylan1.gif&imgrefurl=>
358. http://www.seaweeds of alaska.com/photos/seaweed/Palmaria_mollis
359. <http://www.shethai.com>
360. <http://www.sinicearasy.cz/files/laminaran.gif&imgref>
361. http://www.smhi.se/oceanografi/oce_info_data/plankton_checklist/diatoms/thalassiosira
362. http://www.smhi.se/oceanografi/oce_info_data/plankton_checklist/diatoms/chaetoceros
363. http://www.smhi.se/oceanografi/oce_info_data/plankton_checklist/dinoflagellates
364. <http://www.smp2005.com/index.php?lay=show&ac=article&id=387002>
365. <http://www.staff.uni-marburg.de/~wenderot/Hasleoostrearia.jpg&imgrefurl>
366. <http://www.starfish.govt.nz/shared-graphics-for-download/undaria-large.jpg>
367. http://www.steve.gb.com/images/molecules/sugars/D-glucaric_acid.png
368. http://www.steve.gb.com/images/molecules/sugars/D-gluconic_acid.png
369. http://www.steve.gb.com/images/molecules/sugars/D-glucuronic_acid.png

370. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_browns/Ascophyllum.jpg
371. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_browns/cystoseira_pics/
372. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_browns/durvillaea_pics
373. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_browns/ecklonia_pics/
374. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_browns/lessonia_pics/
375. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_reds/Asparagopsis_pics
376. http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/image_reds/Gelidium_pics
377. http://www.thailocaladmin.go.th/work/e_book/eb1/stan10.htm
378. http://www.thaiqualityshrimp.com/what/home_detail.asp?nID=384
379. http://www.thai-recycle.com/forum/RSS_post_feed.asp?TID=62
380. [http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pass
&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pass&read=true&count=true)
381. http://www.tungsong.com/Environment/Garbage_n/garbage_06.html
382. http://www.tungsong.com/Environment/Garbage_n/garbage_09.html
383. http://www.uae.gov.ae/uaeagricent/FISHERIES/img/Tetraselmis_chuii.jpg
384. <http://www.ual.es/personal/facien/FOTOS/PTFUSI.JPG&imgrefurl>
385. <http://www.ucmp.berkeley.edu/greenalgae/chlamydomonas.jpg&imgrefurl>
386. <http://www.unav.es/botanica/bpnavasc/imagenes/ab/Laminaria%20digitata.jpg>
387. <http://www.unige.ch/sciences/biologie/biani/msg/teaching/Bifurcaria.JPG>
388. <http://www.uniovi.es/BOS/Asignaturas/Herbario%20Virtual/Images/Bifurcaria.JPG>
389. <http://www.uwm.edu/Dept/Biology/Docs/EEB/>
390. <http://www.vattenkikaren.gu.se/Fakta/arter/algae/mikroalg/chaespp/chaesp.jpeg>
391. http://www.victoria.ac.nz/cmeer/gfx/pics/Lessonina_small.jpg
392. <http://www.wma.or.th/>
393. http://www.woodrow.org/teachers/Princeton/Project/schaperdoth/diatoms/t_.gif
394. [http://www.wwomc.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&Catego
ry=wwomccom&thispage=2&No=225263](http://www.wwomc.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&Category=wwomccom&thispage=2&No=225263)
395. <http://www2.una.edu/pdavis/stigo01.jpg&imgrefurl>
396. [http://www4.eas.asu.edu/pwest/myweb/Taste%2520and%2520Odor%2520Stuff/
Taxonomic%2520guide/Guide_Images/Web_Images/More_Web_Images/Platym
onas3.gif&imgrefurl](http://www4.eas.asu.edu/pwest/myweb/Taste%2520and%2520Odor%2520Stuff/
Taxonomic%2520guide/Guide_Images/Web_Images/More_Web_Images/Platym
onas3.gif&imgrefurl)
397. <http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/images/lgimages/gloesp.jpg&imgrefurl>
398. <http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/media/table/f2.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เอกสารอ้างอิง

410. Jackson, A.R.W. and Julie, M.J. 1996. Environmental Science: The natural environment and human impact. Longman Singapore Publishers Ltd, Singapore.
411. Jaki, B., Orjala, J., Heilmann, J., Linden, A., Vogler, B. and Sticher, O. 2000. Novel extracellular diterpenoids with biological activity from the cyanobacterium *Nostoc commune*. Journal of Natural Products. 63:339-343.
412. Jalali, R., Ghafourina, H., Asef, Y., Davarpanah, S.J. and Sepehr, S. 2002. Removal and recovery of lead using nonliving biomass of marine algae. Journal of Hazardous Materials B. 92:253-262.
413. Jensen, T.E., Rachlin, J.W., Jani, V. and Warkentine, B. 1982. An X-ray energy dispersive study of cellular compartmentalization of lead and zinc in *Chlorella saccharophila* (Chlorophyta), *Navicula incerta* and *Nitzschia closterium* (Bacillariophyta). Environmental and Experimental Botany. 22:319-328.
414. Jervis, L., Rees-Naesborg, R. and Brown, M. 1997. Biochemical responses of the marine macroalgae *Ulva lactuca* and *Fucus vesiculosus* to cadmium and copper from sequestration to oxidative stress. Biochemical Society Transactions. 25:63S.
415. Joux-Arab, L., Berthet, B. and Robert, J.M. 2000. Do toxicity and accumulation of copper change during size reduction in the marine pennate diatom *Haslea ostrearia*. Marine Biology. 136:323-330.
416. Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 1992. Trace Elements in Soils and Plants, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
417. Kaewsarn, P. 2002. Biosorption of copper (II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine algae *Padina* sp. Chemosphere. 47:1081-1085.
418. Kaplan, D., Heimer, Y.M., Abeliovich, A. and Goldsbrough, P.B. 1995. Cadmium toxicity and resistance in *Chlorella* sp. Plant Science. 109:129-137.
419. Kapoor, A. and Viraraghavan, T. 1995. Fungal-biosorption: an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewater: Bioresource Technology. 53:195-206.
420. Karleskint, G. 1998. Introduction to Marine Biology. Saunders College Publishing, London.
421. Khan, M. 1983. Algae Today, Bisher Singh Mahendra Pal Singh, Dehra Dum, India.

422. Khoshmanesh, A. and Lawson, F. 1996. Cadmium uptake by unicellular green microalgae. *The Chemical Engineering Journal*. 62:81-88.
423. Khoshmanesh, A., Lawson, F. and Prince, I.G. 1997. Cell surface area as a major parameter in the uptake of cadmium by unicellular green microalgae. *The Chemical Engineering Journal*. 65:13-19.
424. Kirk, J.T.O. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem*. Cambridge University Press, Cambridge.
425. Kitjahn, P. 1990. Utilization of blue green algae for the removal of some heavy metals from wastewater. M.SC. Thesis in Biotechnology, Bangkok: Faculty of Graduate Studies, Chulalongkorn University.
426. Klimmek, S. and Stan, H.J. 2001. Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel, and zinc by algae. *Environmental Science and Technology*. 35:4283-4288.
427. Knauer, G.A. and Martin, J.H. 1973. Seasonal variations of cadmium, copper, manganese, lead and zinc in water and phytoplankton in Monterey bay, California. *Limnology Oceanography*. 18:579-604.
428. Knauer, K., Ahner, B., Xue, H.B. and Sigg, L. 1998. Metal and phytochelatin content in phytoplankton from freshwater lakes with different metal concentrations. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 17 :2444-2452.
429. Kneer, R. and Zenk, M.H. 1997. The formation of Cd-phytochelatin complexes in plant cell cultures. *Phytochemistry*. 44:69-74.
430. Kong, J.Y., Lee, H.W., Hong, J.W., Kang, Y.S., Kim, J.D., Chang, M.W. and Bae, S.K. 1998. Utilization of a cell-bound polysaccharide produced by the marine bacterium *Zoogloea* sp.: New biomaterial for metal adsorption and enzyme immobilization. *Journal of Marine Biotechnology*. 6:99-103.
431. Kratochvil, D. and Volesky, B. 1998. Advances in the biosorption of heavy metals. *Trends in Biotechnology*. 16:291-300.
432. Kreger, D.R. 1962. Cell wall. *In* *Physiology and Biochemistry of Algae*. Academic Press, New York.
433. Kumar, H.D. and Singh, H.N. 1976. *A Textbook on Algae*. Affiliated East-West Press Pvt. Ltd., New Delhi.
434. Kurek, E., Cazban, J. and Bollag, J.M. 1982. Sorption of cadmium by microorganisms in competition with other soil constituents. *Applied and Environmental Microbiology*. 43:1011-1015.

435. Kuyucak, N. and Volesky, B. 1989. Desorption of cobalt-laden algal biosorbent. *Biotechnology and Bioengineering*. 33:815-822.
436. Larkum, A.W.D., Douglas, S.E. and Raven, J.A. 2003. *Photosynthesis in Algae*. Kluwer Academic Publishers, London.
437. Ledin, M. 2000. Accumulation of metals by microorganisms-processes and importance for soil systems. *Earth-Science Reviews*. 51:1-31.
438. Lée, C.I., Wang, T.C., Hsu, C.H. and Chiou, A.A. 1998. Heavy metal sorption by aquatic plants in Taiwan. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 61:497-504.
439. Lee, H.S. and Volesky, B. 1997. Interaction of light metals and protons with seaweed biosorbent. *Water Research*. 31:3082-3088.
440. Lee, H.S., Suh, J.H., Kim, I.B. and Yoon, T. 2004. Effect of aluminum in two-metal biosorption by an algal biosorbent. *Minerals Engineering*. 17:487-493.
441. Lee, R.E. 1999. *Phycology*. Cambridge University Press, New York.
442. Lee, Y.K. 2001. Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential. *Journal of Applied Phycology*. 13:307-315.
443. Leppard, G.G. 1995. The characterization of algal and microbial mucilages and their aggregates in aquatic ecosystems. *The Science of the Total Environment*. 165:103-131.
444. Les, A. and Walker, R.W. 1984. Toxicity and binding of Copper, Zinc and Cadmium by the blue-green alga, *Chroococcus paris*. *Water Air and Soil Pollution*. 23:129-139.
445. Lester, J.N. 1987. *Heavy Metal in Wastewater and Sludge Treatment Process*. vol II Treatment and Disposal. CRC Press, Inc. Florida.
446. Leusch, A. and Volesky, B. 1995. The influence of film diffusion on cadmium biosorption by marine biomass. *Journal of Biotechnology*. 43:1-10.
447. Lewin, R.A. 1962. *Physiology and Biochemistry of Algae*. Academic Press, London.
448. Lewmanomont, K. and Ogawa, H. 1995. *Common Seaweeds and Seagrasses of Thailand*. Integrated Promotion Technology, Co., Ltd.
449. Lion, L. and Rochlin, K. 1989. Adsorption of Pb by a marine bacterium: the effect of cell concentration and pH. *Estuarine Coastal Shelf Science*. 29:11-22.

450. Liu, H. and Fang, H.H.P. 2002. Characterization of electrostatic binding sites of extracellular polymers by linear programming analysis of titration data. *Biotechnology and Bioengineering*. 80:806-811.
451. Liu, Y., Lam, M.C. and Fang, H.H.P. 2001. Adsorption of heavy metals by EPS of activated sludge. *Water Science Technology*. 43:59-67.
452. Lobban, C.S., Harrison, P.J. and Duncan, M.J. 1985. *The Physiological Ecology of Seaweeds*, Cambridge University Press, Cambridge, London.
453. Lopez-Suarez, C.E., Castro-Romero, J.M., Gonzalez-Rodriguez, M.V., Gonzalez-Soto, E., Perez-Iglesias, J., Seco-Logo, H.M. and Fernandez-Solis, J.M. 2000. Study of the parameters affecting the binding of metals in solution by *Chlorella vulgaris*. *Talanta*. 50:1313-1318.
454. Lozet, J. and Mathieu, C. 1991. *Dictionary of Soil Science*, 2nd ed., A. A. Balkema, Rotterdam. เข้าถึงได้จาก www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
455. Lu, C.M., Chau, C.W. and Zhang, J.H. 2000. Acute toxicity of excess mercury on the photosynthetic performance of cyanobacterium, *S. platensis* assessment by chlorophyll fluorescence analysis. *Chemosphere*. 41:191-196.
456. Lupi, F.M., Fernandes, H.M.L., Sa-Correia, I., Novais, J.M. 1991. Temperature profiles of cellular growth and exopolysaccharide synthesis by *Botryococcus braunii* Kütz. UC58. *Journal of Applied Phycology*. 3:35-42.
457. Lustigman, B., Lee, L.H., Morata, J. and Khan, F. 2000. Effect of Thallium on the Growth of *Anacystis nidulans* and *Chlamydomonas reinhardtii*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 64:565-573.
458. Malik, A. 2004. Metal bioremediation through growing cells. *Environment International*. 30:261-278.
459. Malik, D.J., Strelko, Jr.V., Streat, M. and Puziy, A.M. 2002. Characterization of novel modified active carbons and marine algal biomass for the selective adsorption of lead. *Water Research*. 36:1527-1538.
460. Mallich, N. and Rai, L.C. 1998. Characterization of Cd induced low molecular weight protein in a N₂-fixing cyanobacterium *Anabaena doliolum* to Co-multiple tolerance. *Biometals*. 11:55-61.
461. Mameri, N., Boudries, N., Addour, L., Belhocine, D., Lounici, H., Grib, H. and Pauss, A. 1999. Batch zinc biosorption by a bacterial nonliving *Streptomyces rimosus* biomass. *Water Research*. 33:1347-1354.

462. Marsalek, B. and Rojickova, R. 1996. Stress factors enhancing production of algal exudates: a potential self-protective mechanism?. *Z. Naturforsch.* 51:646–650.
463. Martins, B.L., Cruz, C.C.V., Luna, A.S. and Henriques, C.A. 2006. Sorption and desorption of Pb^{2+} ions by dead *Sargassum* sp. biomass. *Biochemical Engineering Journal.* 27:310-314.
464. Masaki, T. 1968. Studies on the Melobesioideae of Japan. *Mem. Fac. Fish., Hokkaido Univ.* 16:1-80.
465. Masel, R.I. 1996. Principles of adsorption and reaction on solid surfaces. John Wiley & Sons, Inc. New York.
466. Masson, L. and Holbein, B.E. 1985. Influence of nutrient limitation on low pH on serotype B *Neisseria meningitidis* capsular polysaccharide level: correlation with virulence for mice. *Infection and Immunity.* 47:465-471.
467. Matheickal, J.T. and Yu, Q. 1996. Biosorption of lead from aqueous solutions by marine algae *Ecklonia radiata*. *Water Science and Technology.* 34:1-7.
468. Matheickal, J.T., Yu, Q. and Woodburn, G.M. 1999. Biosorption of cadmium(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine alga *Durvillaea potatorum*. *Water Research.* 33:335-342.
469. Matheickall, J.T. and Yu, Q. 1999. Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae. *Bioresource Technology.* 69:223-229.
470. Matsunaga, T., Takeyama, H., Nakao, T. and Yamazawa, A. 1999. Screening of marine microalgae for bioremediation of cadmium polluted seawater. *Journal of Biotechnology.* 70:33-38.
471. Mattuschka, B., Junghans, K. and Strube, G. 1993. Biosorption of metals by waste biomass. *In Biohydrometallurgical Technologies* vol. II, The Minerals Metals and Materials Society, Warrendale.
472. McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, J. 1983. The adsorption of dyes in chitin intraparticle diffusion process. *Journal of Applied Polymer Science.* 28:1767-1778.
473. McLean, M.W. and Williamson, F.B. 1977. Cadmium accumulation by the marine red alga *Porphyra umbilicalis*. *Physiology of Plant.* 41:268-272.

474. Mehta, S.K. and Gaur, J.P. 2001. Concurrent sorption of Ni^{2+} and Cu^{2+} by *Chlorella vulgaris* from a binary metal solution. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 55:379-382.
475. Mendoza-Cózatl, D., Loza-Tavera, H., Hernández-Navarro, A. and Moreno-Sánchez, R. 2004. Sulfur assimilation and glutathione metabolism under cadmium stress in yeast, protist and plants. *FEMS Microbiology Reviews*. 29:653-671.
476. Mendoza-Cozatl, D.G. and Moreno-Sanchez, R. 2005. Cd^{2+} transport and storage in the chloroplast of *Euglena gracilis*. *Biochimica et Biophysica ACTA*. 1706:88-97.
477. Menesveta, P. 1976. Total mercury in the food chain of Bang Pra coastal Area, Choburi. *Journal Science Society Thailand*. 2:117-126.
478. Mengistu, Y., Edwards, C. and Saunders, J.R. 1994. Continuous culture studies on the synthesis of capsular polysaccharide by *Klebsiella pneumoniae* K1. *Journal of Applied Bacteriology*. 76:424-430.
479. Metcalf and Eddy, Tchobanoglous, G. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill, New York.
480. Miranda, M.G. and Liangovan, K. 1996. Uptake of lead by *Lemna gibba* L : Influence on specific growth rate and basic biochemical change. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 56:1000-1007.
481. Miskelly, A. and Scragg, A.H. 1996. Removal of heavy metals by microalgae. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 37:243.
482. Mohamed, Z.A. 2001. Removal of cadmium and manganese by a non-toxic strain of the freshwater cyanobacterium *Gloeotheca magna*. *Water Research*. 35:4405-4409.
483. Moore, J.W. 1991. *Inorganic Contaminants of Surface Waters. Research and Monitoring Priorities*, Springer-Verlag, New York.
484. Morel, F.M.M. and Hering, J.G. 1993. *Principles and applications of aquatic chemistry*. New York, Wiley.
485. Morelli, E. and Scarano, G. 2001. Synthesis and stability of phytochelatins induced by cadmium and lead in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Marine Environmental Research*. 52:383-395.

486. Morelli, E. and Scarano, G. 2004. Copper-induced changes of non-protein thiols and antioxidant enzymes in the marine microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Plant Science* 167:289-296.
487. Moreno-Garrido, I., Campana, O., Lubian, L.M. and Blasco, J. 2005. Calcium alginate immobilized marine microalgae: Experiments on growth and short-term heavy metal accumulation. *Marine Pollution Bulletin*. 51:823-829.
488. Moreno-Garrido, I., Lubian, L.M. and Soares, A.M.V.M. 2000. Influence of cellular density on determination of EC₅₀ in microalgal growth inhibition tests. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 47:112-116.
489. Morris, C. (Ed.). 1992. *Academic Press Dictionary of Science and Technology*, Academic Press, San Diego เข้าถึงได้จาก www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
490. Morris, C.A., Nicolaus, B., Sampson, V., Harwood, J.L. and Kille, P. 1999 Identification and characterization of a recombinant metallothionein protein from a marine alga, *Fucus vesiculosus*. *Biochemical Journal*. 338:553-560.
491. Munoz, R. and Guieysse, B. 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*. 40:2799-2815.
492. Munoz, R., Alvarez, M.T., Munoz, A., Terrazas, E., Guieysse, B. and Mattiasson, B. 2006. Sequential removal of heavy metals ions and organic pollutants using an algal-bacterial consortium. *Chemosphere*. 63:903-911.
493. Munoz, R., Rolvering, C., Guieysse, B. and Mattiasson, B. 2005. Photosynthetically oxygenated acetonitrile biodegradation by an algal-bacterial microcosm: a pilot scale study. *Water Science and Technology*. 51:261-265.
494. Myklestad, S.M. 1995. Release of extracellular products by phytoplankton with special emphasis on polysaccharides. *The Science of the Total Environment*. 165:155-164.
495. Myklestad, S.M., Skanoy, E. and Hestmann, S. 1997. A sensitive and rapid method for analysis of dissolved mono-and polysaccharides in seawater. *Marine Chemistry*. 56:279-286.
496. Nagalakshmi, N. and Prasad, M.N.V. 1998. Copper-induced oxidative stress in *Scenedesmus bijugatus*: Protective role of free radical scavengers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 61:623-628.
497. Nagase, H., Inthorn, D., Oda, A., Nishimura, J., Kajiwar, Y., Park, M.O., Hirata, K. and Miyamoto, K. 2005. Improvement of selective removal of heavy metals

- in cyanobacteria by NaOH treatment. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 99:372-377.
498. Nagel, K., Adelmeier, U. and Voigt, J. 1996. Subcellular distribution of cadmium in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal of Plant Physiology*. 149:86-90.
 499. Nassiri Y., Wery J., Mansot J.L. and Ginsburger-Vogel T. 1997b. Cadmium bioaccumulation in *Tetraselmis suecica*: an electron energy loss spectroscopy (EELS) study. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*. 33:156-161.
 500. Nassiri, Y., Mansot, J.L., Wery, J., Ginsburger-Vogel, T. and Amiard, J.C. 1997a. Ultrastructural and electron energy loss spectroscopy studies of sequestration mechanisms of Cd and Cu in the marine diatom *Skeletonema costatum*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 33:147-155.
 501. Nayak, S.S. and Pattabiraman, T.N. 1981. A new colorimetric method for the estimation of glycosylated hemoglobin. *Clinica Chimica Acta*. 109:267-274.
 502. Nicolaus, B., Panico, A., Lama, L., Romano, I., Manca, M.C., Giulio, A.D. and Gambacorta, A. 1999. Chemical composition and production of exopolysaccharides from representative members of heterocystous and non-heterocystous cyanobacteria. *Phytochemistry*. 52:639-647.
 503. Nishikawa, K., Onodera, A. and Tominaga, N. 2006. Phytochelatins do not correlate with the level of Cd accumulation in *Chlamydomonas* spp. *Chemosphere*. 63:1553-1559.
 504. Nourbaksh, M., Sag, Y., Ozer, D., Aksu, Z., Kutsal, T. and Caglar, A. 1994. A comparative study of various biosorbents for removal of chromium (VI) ions from industrial wastewaters. *Process Biochemistry*. 29:1-5.
 505. Nuhoglu, Y., Malkoc, E., Gurses, A. and Canpolat, N. 2002. The removal of Cu (II) from aqueous solutions by *Ulothrix zonata*. *Bioresource Technology*. 85:331-333.
 506. Odum, H.T., Wojcik, W., Pritchard, L.Jr., Ton, S., Delfino, J.J., Wojcik, M., Leszczynski, S., Patel, J.D., Doherty, S.J., and Stasik, J. 2000. Heavy Metals in the Environment: Using Wetlands for their Removal. Lewis Publishers, London.

507. Ogbonna, J.C., Yoshizowa, H. and Tanaka, H. 2000. Treatment of a high strength organic wastewater by a mixed culture of photosynthetic microorganisms. *Journal of Applied Phycology*. 12:277–284.
508. Oijen, T.V., Veldhuis, M.J.W., Gorbunov, M.Y., Nishioka, J., Leeuwe, M.A. and Baar, H.J.W. 2005. Enhanced carbohydrate production by Southern Ocean phytoplankton in response to in situ iron fertilization. *Marine Chemistry*. 93:35-52.
509. Omar, H.H. 2002. Bioremoval of Zinc Ions by *Scenedesmus obliquus* and *Scenedesmus quadricauda* and its Effect on Growth and Metabolism. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 50:95-100.
510. Onderka, M. 2006. Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir (Slovakia)—A simple regression model. *Ecological Modelling*. *In Press*.
511. Ortiz, D.F., Kreppel, L., Speiser, D.M., Scheel, G., McDonald, G., Ow, D.W. 1992. Heavy metal tolerance in the fission yeast requires an ATP-binding cassette-type vacuolar membrane transporter. *The EMBO Journal*. 11:3491–3499.
512. Oswald, W.J. 2003. My sixty years in applied algology. *Journal of Applied Phycology*. 15:99-106.
513. Otero, A. and Vincenzini, M. 2003. Extracellular polysaccharide synthesis by *Nostoc* strains as affected by N source and light intensity. *Journal of Biotechnology*. 102:143-152.
514. Oven, M., Page, I.E., Zenk, M.H. and Kutchan, T.M. 2002. Molecular characterization of the homo-phytochelatin synthase of soybean glycine max. *Journal of Biological Chemistry*. 277:4747–4754.
515. Ozer, A., Ozer, D. and Ekiz, H.I. 1999. Application of Freundlich and Langmuir models to multistage purification process to remove heavy metal ions by using *Schizomeris leibleinii*. *Process Biochemistry*. 34:919-927.
516. Ozer, D., Aksu, Z., Kutsal, T. and Caglar, A. 1994. Adsorption isotherms of lead (II) and chromium (VI) on *Cladophora crispate*. *Environmental Technology*. 15:439-448.
517. Panchanadikar, V.V. and Das, R.P. 1993. Biorecovery of zinc from industrial effluent using native microflora. *International Journal of Environmental Studies*. 44:251-257.

518. Papenfuss, G. F. 1955. Classification of the algae, in A Century of Progress in the Natural Sciences, 1853-1953, California Academy of Science, San Francisco.
519. Parent, L., Twiss, M.R. and Campbell, P.G.C. 1996. Influences of natural dissolved organic matter on the interaction of aluminum with the microalga *Chlorella*: a test of the free-ion model of trace metal toxicity. *Environmental Science and Technology*. 30:1713-1720.
520. Parikh, A and Madamwar, D. 2006. Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria. *Bioresource Technology*. 97:1822-1827.
521. Parker S. P. (Ed.). 1989. McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, 4th ed., McGraw-Hill, New York. เข้าถึงได้จาก www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
522. Parker, D.L., Rai, L.C., Mallick, N., Rai, P.K. and Kumar, H.D. 1998. Effects of cellular metabolism and viability on metal ion accumulation by cultured biomass from a bloom of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Applied and Environmental Microbiology*. 64:1545-1547.
523. Parker, D.L., Schram, B. R., Plude, J.L. and Moore, R.E. 1996. Effect of metal cations on the viscosity of a pectin-like capsular polysaccharide from the cyanobacterium *Microcystis flos-aquae* C3-40. *Applied and Environmental Microbiology*. 62:1208-1213.
524. Passow, U., Shipe, R.F., Murray, A., Pak, D.K., Brzezinski, M.A. and Alldredge, A.L. 2001. The origin of transparent exopolymer particles (TEP) and their role in the sedimentation of particulate matter. *Continental Shelf Research*. 21:327-346.
525. Pavasant, P., Apiratikul, R., Sungkhum, V., Suthiparinyanont, P., Wattanachira, S. and Marhaba, T.F. 2006. Biosorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technology*. 97:2321-2329.
526. Pawlik-Skowronska, B. 2001. Phytochelatin production in freshwater algae *Stigeoclonium* in response to heavy metals contained in mining water; effects of some environmental factors. *Aquatic Toxicology*. 52:241-249.
527. Pawlik-Skowronska, B. 2003a. Resistance accumulation and allocation of zinc in two ecotypes of the green alga *Stigeoclonium tenue* Kütz. Coming from habitats of different heavy metal concentrations. *Aquatic Botany*. 75:189-198.

528. Pawlik-Skowronska, B. 2003b. When adapted to high zinc concentrations the periphytic green alga *Stigeoclonium tenue* produces high amounts of novel phytochelatin-related peptides. *Aquatic Toxicology*. 62:155–163.
 529. Pena-Castro, J.M., Martinez-Jeronimo, F., Esparza-Garcia, F. and Canizares-Villanueva, R.O. 2004a. Heavy metal removal by the microalga *Scenedesmus incrassatulus* in continuous cultures. *Bioresource Technology*. 94:219-222.
 530. Pena-Castro, J.M., Martinez-Jeronimo, F., Esparza-Garcia, F. and Canizares-Villanueva, R.O. 2004b. Phenotypic plasticity in *Scenedesmus incrassatulus* (Chlorophyceae) in response to heavy metals stress. *Chemosphere*. 57:1629-1636.
 531. Perales-Vela, H.V., Pena-Castro, J.M. and Canizares-Villanueva, R.O. 2006. Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae. *Chemosphere*. 64:1-10.
 532. Percival, E. and McDowell, R.H. 1967. *Chemistry and Enzymology of Marine Algal Polysaccharides*. Academic Press, London.
 533. Perez-Rama, M., Alonoso, J.A., Lopez, C.H. and Vaamonde, E.T. 2002. Cadmium removal by living cells of the marine microalgae *Tetraselmis suecica*. *Bioresource Technology*. 84:265-270.
 534. Perrein-Ettajani, H., Amiard, J.C., Haure, J. and Renaud, C. 1999. Effets des métaux (Ag, Cd, Cu) sur la composition biochimique et compartimentation de ces métaux chez deux microalgues *Skeletonema costatum* et *Tetraselmis suecica*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 56:1757–1765.
 535. Philip, S. 1993. *A Biology of the Algae*. 2nd ed. Wm. C. Brown Co. Publishers, Dubuque.
 536. Philipose, M.T. 1967. *Chlorococcales*. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
 537. Philippis, R.D., Sili, C., Tassinato, G., Vincenzini, M. and Materassi, R. 1994. Effects of growth condition on exopolysaccharide production by *Cynospira capsulate*. *Bioresource Technology*. 38:101-104.
 538. Pholprasert, C. 1982. Heavy metal pollution in the Chao Phraya river estuary. Thailand. *Water Research*. 16:775-784.
 539. Pistocchi, R., Mormile, M.A., Guerrini, F., Isani, G. and Boni, L. 2000. Increased production of extra- and intracellular metal–ligands in phytoplankton exposed to copper and cadmium. *Journal of Applied Phycology*. 12:469–477.
 540. Pitter, P. 1981. *Hydrochemistry SNTL Praha, Czech Republic*. (in Czech).
- เอกสารอ้างอิง

541. Prescott, G.W. 1951. Algae of the Western Great Lakes Area. Wm. C. Brown Co. Publishers, Iowa.
542. Pumpel, T., Ebner, C., Pernfu, B.B., Schinner, F., Diels, L. and Keszthelyi, Z. 2001. Treatment of rinsing water from electrolyses nickel plating with a biologically active moving-bed sand filter. *Hydrometallurgy*. 59:383-393.
543. Rachlin, J.W., Jensen, T.E. and Warkentine, B. 1982. The growth response of the green alga (*Chlorella saccharophila*) to selected concentrations of the heavy metals Cd, Cu, Pb, and Zn., in Trace Substances in Environmental Health XVI, Hemphill, D. D., Ed., University of Missouri, Columbia.
544. Rachlin, J.W., Jensen, T.E. and Warkentine, B. 1983. The growth response of the diatom *Navicula incerta* to selected concentrations of the metals: cadmium, copper, lead and zinc. *Bulletin of Torrey Botany Club*. 110: 217-223.
545. Rachlin, J.W., Jensen, T.E. and Warkentine, B. 1984. The toxicological response of the alga *Anabaena flos-aquae* (Cyanophyceae) to cadmium. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 13:143-151.
546. Rachlin, J.W., Warkentine, B. and Jensen, T.E. 1983. The response of the marine diatom *Nitzschia closterium* to selected concentrations of the divalent cations Cd, Cu, Pb and Zn, in Trace Substances in Environmental Health XVII, Hemphill, D. D., Ed., University of Missouri, Columbia.
547. Radway, J.C., Wilde, E.D., Whitaker, M.J. and Weissman, J. C. 2001. Screening of algal strains for metal removal capabilities. *Journal of Applied Phycology*. 13:451-455.
548. Rai, L.C., Rai, P.K. and Mallick, N. 1996. Regulation of heavy metal toxicity in acid tolerant *Chlorella*: Physiological and Biochemical approaches. *Environmental and Experimental Botany*. 36:99-109.
549. Rai, U.N. and Chandra, P. 1992. Accumulation of copper, lead, manganese and iron by field populations of *Hydrodictyon reticulatum* (Linn.) Lagerheim. *The Science of The Total Environment*. 116:203-211.
550. Rai, V., Vajpayee, P., Singh, S.N. and Mehrotra, S. 2004. Effect of chromium accumulation on photosynthesis pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L. *Plant Science*. 67:1159-1169.
551. Rand, G.M. 1995. Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment. Taylor&Francis, London.

552. Rangsayatorn, N., Upatham, E.S., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Lanza, G.R. 2002. Phytoremediation potential of *Spirulina (Arthrospira) platensis*: biosorption and toxicity studies of cadmium. *Environmental Pollution*. 199:45-53.
553. Rao, K.S. 1997. Site Selection for Landfills. *In* Waste Disposal in Engineered Landfills. Narosa Publishing House, London.
554. Raskin, I. and Ensley, B.D. 2000. Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment. John Wiley & Sons, Inc., New York.
555. Rauser, W.E. 1990. Phytochelatins. *Annual Review of Biochemistry*. 59:61–86.
556. Raven, R.H., Berg, L.R. and Johnson, G.B. 1993. *Environment*. Saunders College Publishing, New York.
557. Reddad, Z., Gerente, C., Andres, Y. and Cloirec, P.L. 2002. Modeling of single and competitive metal adsorption onto a natural polysaccharide. *Environmental Science and Technology*. 36:2242-2248.
558. Reed, R.H. and Gadd, G.M. 1989. Metal Tolerance in Eukaryotic and Prokaryotic Algae, in *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*, Shaw, J. A., CRC Press, Boca Raton, Florida.
559. Rehman, A. and Shakoori, A.R. 2001. Heavy metal resistance *Chlorella* spp., isolated from tannery effluents, and their role in remediation of hexavalent chromium in industrial waste water. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 66:542-547.
560. Rijstenbil, J.W. and Wijnholds, J.A. 1996. HPLC analysis of nonprotein thiols in planktonic diatoms: pool size, redox state and response to copper and cadmium exposure. *Marine Biology*. 127:45–54
561. Rijstenbil, J.W., Sandee, A., Van Drie, J. and Wijnholds, J.A.. 1994. Interaction of toxic trace metals and mechanisms of detoxification in the planktonic diatoms *Ditylum brightwelli* and *Thalassiosira pseudonana*. *FEMS Microbiology Reviews*. 14 :387–396
562. Robert, R. and Guillard, L. 1962. Physiology of Whole Cells and Plants: Salt and Osmotic Balance. *In* *Physiology and Biochemistry of Algae*. Academic Press, London.

563. Robinson, K.A., Baird, D.J. and Wrona, F.J. 2003. Surface metal adsorption on zooplankton carapaces: implications for exposure and effects in consumer organisms. *Environmental Pollution*. 122:159-167.
564. Robinson, N.J. 1989. Metal-binding polypeptides in plants. *In* Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. CRC Press Inc., Boca Raton, FL.
565. Rossman, B.J. 1997. Principles of Chemical kinetics. Wm.C. Brown Publisher, Inc., USA.
566. Rothstein, A. 1959. Cell membrane as a site of action of heavy metals. *Proceeding of American Society Experimental Biology*. 18:1026-1038.
567. Round F.E. 1973. *The Biology of the Algae*, 2nd ed., Edward Arnold Publishers, London.
568. Round, F. E. 1981. *The Ecology of Algae*, Cambridge University Press, Cambridge.
569. Ruangsomboon, S. and Wongrat L. 2006. Bioaccumulation of cadmium in an experimental aquatic food chain involving phytoplankton (*C. regularis*), zooplankton (*M. macrocopa*) and the predatory catfish. *Aquatic Toxicology*. 78:15-20.
570. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004a. Bioremoval of lead by cyanobacteria : *Gloeocapsa* sp. and *Calothrix marchica*. *Proceeding of the 1st KMITL International Conference on Integration of Science and technology*. 2:188-191.
571. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004b. Lead (Pb^{2+}) adsorption potentials of *Gloeocapsa* sp. and role of its capsular polysaccharides. *Proceeding of The International Conference on Sustainable Energy and Environment*. 3:210-213.
572. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006a. Lead (Pb^{2+}) removal from Wastewater by the Cyanobacterium *Calothrix marchica*. *Kasetsart Journal (Natural Science)*. 40:784-794.
573. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006b. Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa*. *Water Research*. 40:3759-3766.

574. Sag, Y. and Kutsal, T. 1995. Copper (II) and nickel (II) adsorption by *Rhizopus arrhizus* in batch stirred reactors in series. *Chemical Engineering Journal*. 58:265-273.
575. Sakaguchi, T. and Nakajima, A. 1991. Accumulation of heavy metals such as uranium and thorium by microorganisms. *In* Mineral Bioprocessing, The Minerals, Metals and Materials Society.
576. Sakaguchi, T., Tsuji, T., Nagajima, A. and Horikoshi, T. 1979. Accumulation of cadmium by green microalgae. *Current Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*. 8:207-215.
577. Salehizadeh, H., and Shojaosadati, S.A. 2003. Removal of metal ions from aqueous solution by polysaccharide produced from *Bacillus firmus*. *Water research*. 37:4231-4235.
578. Sandau, E., Sandau, P. and Pulz, O. 1996. Heavy metal sorption by microalgae. *Acta Biotechnology*. 16:227-235.
579. Sangar, V.K. and Dugan, P.R. 1972. Polysaccharide produced by *Anacystis nidulans*: its ecological implication. *Applied Microbiology*. 24:732-734.
580. Santana-Casiano, J.M., Gonzalez-Davila, M., Perez-Pena, J. and Milleron, F.J. 1995. Pb interactions with the marine phytoplankton *Dunaliella tertiolecta*. *Marine Chemistry*. 48:115-129.
581. Sanuel, D.F. and Osman, M.A. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. Butterworths Publishers, USA.
582. Satoh, M., Karaki, E., Kakehashi, M., Okazaki, E., Gotoh, T. and Oyama, Y. 1999. Heavy-metal induced changes in nonproteinaceous thiol levels and heavy-metal binding peptide in *Tetraselmis tetrahele* (Prasinophyceae). *Journal of Phycology*. 35:989-994.
583. Saucedo, I., Guibal, E., Roulph, C. and Cloirec, P. 1992. Sorption of uranyl ions by a modified chitosan: kinetic and equilibrium studies. *Environmental Technology*. 13:101-1115.
584. Sawyer, C., McCarty, P. and Parkin, G. 2003. Chemistry for environmental engineering and science. McGrawhill, Singapore.
585. Scarano, G. and Morelli, E. 2003. Properties of phytochelatin-coated CdS nanocrystallites formed in a marine phytoplanktonic alga (*Phaeodactylum tricornutum*, Bohlin) in response to Cd. *Plant Science*. 165:803-810

586. Schafer, H.J., Greiner, S., Rausch, T. and Haag-Kerwer, A. 1997. In seedlings of the heavy metal accumulator *Brassica juncea* Cu^{2+} differentially affects transcript amount for gamma-glutamylcysteine synthetase (γECS) and metallothionein (MT2). *FEMS Letters*. 404:216–220.
587. Schiewer, S. and Volesky, B. 2000. Biosorption Process for Heavy Metal Removal In: *Environmental Microbe-Metal Interactions*. ASM Press. Washington.
588. Schmitt, D., Muller, A., Csogo, Z.R., Frimmel, F.H. and Posten, C. 2001. The adsorption kinetics of metal ions different microalgae and siliceous earth. *Water Research*. 33:779-785.
589. Schumacher, G., Blume, T. and Sekoulov, I. 2003. Bacteria reduction and nutrient removal in small wastewater treatment plants by an algal biofilm. *Water Science and Technology*. 47:195–202.
590. Schuthess, C.P. and Huang, C.P. 1990. Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium oxide surfaces on clay minerals. *Soil Science American Journal*. 54:267-273.
591. Scott, J. and Palmer, S. 1990. Sites of cadmium uptake in bacteria used for biosorption. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 33:221-225.
592. Seki, H. and Suzuki, A. 1998. Biosorption of heavy metal ions to brown algae, *Macrocystis pyrifera*, *Kjellmaniella crassifolia* and *Undaria pinnatifida*. *Journal of Colloid and Interface Science*. 206:297-301.
593. Serres, F.J. and Bloom, A.D. 1996. *Ecotoxicity and Human Health: A Biological Approach to Environmental Remediation*. Lewis Publishers, New York.
594. Sheng, P.X., Ting, Y.P., Chen, J.P. and Hong, L. 2004. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *Journal of Colloid and Interface Science*. 275:131-141.
595. Shuttleworth, K. and Unz, R. 1993. Sorption of heavy metals to the filamentous bacterium *Thiothrix* strain A1. *Applied and Environmental Microbiology*. 59:1274-1282.
596. Sicko-Goad, L. and Stoermer, E.F. 1979. A morphometric study of lead and copper effects on *Diatoma tenue* var. *elongatum* (Bacillariophyta). *Journal of Phycology*. 15:316-321.

597. Sicko-Goad, L., Stoermer, E.F. and Ladewski, B.G. 1977. A morphometric method for correcting phytoplankton cell volume estimates. *Protoplasma*. 93:147-163.
598. Silverberg, B.A. 1976. Cadmium Induced Ultrastructural Changes in Mitochondria of Freshwater Green Algae. *Phycologia*. 15:155-159.
599. Sindermann, D.J. 1996. Ocean Pollution Effects on Living Resources and Humans. CRC Press, London.
600. Sinex, S.A. 2004. EDTA-a molecule with a complex story, Prince George's community college. เข้าถึงได้จาก <http://www.chm.bris.ac.uk/mote/edta/edtah/htm>
601. Singh, S., Pradhan, S. and Rai, L.D. 1998. Comparative assessment of Fe^{3+} and Cu^{2+} biosorption by field and laboratory-grown *Microcystis*. *Process Biochemistry*. 33:495-504.
602. Singh, S., Rai, B.N. and Rai, L.C. 2001. Ni (II) and Cr (VI) sorption kinetics by *Microcystis* in single and multimetallic system. *Process Biochemistry*. 36:1205-1213.
603. Siripornadulsil, S., Traina, S., Verma, D.P.S. and Sayre, R.T. 2002. Molecular mechanisms of proline-mediated tolerance to toxic heavy metals in transgenic microalgae. *Plant Cell*. 14:2837-2847.
604. Smith, G.M. 1969. Marine Algae of the Monterey Peninsula, California. Stanford University Press, Stanford.
605. Smith, G.M. 1950. The Fresh-Water Algae of the United States. McGraw-Hill Book Co., New York.
606. Smith, G.M. 1955. Cryptogamic Botany. Algae and Fungi. McGraw-Hill Book Co., New York.
607. Soldo, D., Hari, R., Sigg, L. and Behra, R. 2005. Tolerance of *Oocystis nephrocystioides* to copper: intracellular distribution and extracellular complexation of copper. *Aquatic Toxicology*. 71:307-317.
608. Sorentino, C. 1979. The effects of heavy metals on phytoplankton: a review. *Phykos*. 18:149-161.
609. South, G.R. and Whittick, A. 1987. A Introduction to Phycology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
610. Srikrajib, S., Tongta, A., Thiravetyan, P. and Sivaborvorn, K. 1999. Cadmium Removal by the Dry Biomass of *Sargassum polycystum*. *Biohydrometallurgy*

- and the Environment toward the mining of the 21st Century, Proceeding of the International Biohydrometallurgy Symposium.
611. Stadelmann, E.J. 1962. Physiology of Whole Cells and Plants: Permeability. *In* Physiology and Biochemistry of algae. Academic Press, London.
 612. Standford, P. 1979. Exocellular, microbial polysaccharides, Advance Carbohydrate. Chemistry and Biochemistry. 36:265-313.
 613. Steffens, J.C. 1990. The heavy metal-binding peptides of plants. Annual Review of Plant Physiology, Plant Molecular Biology. 41:553-575.
 614. Steinfeld, J.I., Francisco, J.S. and Hase, W.L. 1989. Chemical Kinetics and Dynamics. Prentice-Hall International. Inc., USA.
 615. Stokes, P.M. 1983. Responses of freshwater algae to metals. *In* Progress in Phycological Research. Elsevier, Amsterdam.
 616. Stokes, P.M., Maler, T. and Riordan, J.R. 1977. A low molecular weight copper-binding protein in a copper tolerant strain *Scenedesmus acutiformis*. *In* Trace Substances in Environmental Health, University of Missouri Press, Columbia.
 617. Strandberg, G.W., Shumate, S.E. and Parrott, J.R. 1981. Microbial biosorbents for heavy metals accumulation of uranium by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pseudomonas aeruginosa*. Applied and Environmental Microbiology. 41:237-245.
 618. Stumm, W. and Morgan, J.J. 1996. Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. John Wiley & Sons, New York.
 619. Suhasini, I.P., Sriram, G., Asolekar, S.R. and Sureshkumar, G.K. 1999. Biosorptive removal and recovery of cobalt from aqueous system. Proceeding of Biochemistry. 34:239-247.
 620. Sunda, W.G. and Huntsman, S.A. 1986. Relationships among growth rate, cellular manganese concentrations and manganese transport kinetics in estuarine and oceanic species of the diatom *Thalassiosira*. Journal of Phycology. 22:259-270.
 621. Sutherland, I.W. 2001. Microbial polysaccharides from gram-negative bacteria. International Dairy Journal. 11:663-674.
 622. Sweeney, B.M. 1971. Laboratory studies of a green *Noctiluca* from New Guinea. Journal of Phycology. 7:53-58.

623. Tajés-Martínez, P., Beceiro-González, E., Muniategui-Lorenzo, S. and Prada-Rodríguez, D. 2006. Micro-columns packed with *Chlorella vulgaris* immobilised on silica gel for mercury speciation. *Talanta*. 68:1489-1496.
624. Terauchi, N., Ohatani, T., Yamanaka, K., Tsufi, T., Sudou, T. and Ito, K. 1995. Studies on a biological filter for musty odor removal in drinking water treatment processes. *Water Science and Technology*. 31:229-235.
625. Terry, P.A. and Stone, W. 2002. Biosorption of cadmium and copper contaminated water by *Scenedesmus abundans*. *Chemosphere*. 47:249-255.
626. The Phycology. Net. 2004. Newsgroups, Societies and Institutions of Phycologists. เข้าถึงได้จาก <http://www.phycology.net/>
627. Third 3rd New International Dictionary, Merriam, Chicago. เข้าถึงได้จาก http://www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k)
628. Thornton, I. 1995. Metals in the Global Environment: Facts and Misconceptions, ICME, Ottawa เข้าถึงได้จาก www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
629. Tien, C.J. 2002. Biosorption of metal ions by freshwater algae with different surface characteristics. *Process Biochemistry*. 38:605-613.
630. Tilden, J.E. 1935. The algae and Their Life Relations. The University of Minnesota Press.
631. Ting, Y.P., Lawson, F. and Prince, G.L. 1991. Uptake of cadmium and zinc by the alga *Chlorella vulgaris* II. Multi-ion solution. *Biotechnology and Bioengineering*. 37:445-455.
632. Ting, Y.P., Lawson, F. and Prince, I.G. 1989. Uptake of cadmium and zinc by alga *Chlorella vulgaris* Part II: Individual ion species. *Biotechnology and Bioengineering*. 34:990-999.
633. Torres, E, Cid, A., Fidalgo, P., Herrero, C. and Abalde, J. 1997. Long-chain class III: metallothioneins as a mechanism of cadmium tolerance in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. *Aquatic Toxicology*. 39:231-246.
634. Torres, E., Cid, A., Herrero, C. and Abalde, J. 1998. Removal of cadmium ions by the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin accumulation and long-term kinetics of uptake. *Bioresource Technology*. 63:213-220.
635. Torricelli, E., Gorbi, G., Pawlik-Skowronská, B., Toppi, L.S. and Corradi, M.G. 2004. Cadmium tolerance, cysteine and thiol peptide levels in wild type and

- chromium-tolerant strains of *Scenedesmus acutus* (Chlorophyceae). *Aquatic Toxicology*. 68:315–323.
636. Trainor, F.R. 1978. *Introductory Phycology*. John Wiley & Son, New York.
637. Travieso, L., Canizares, R.O., Borja, R., Benitez, F., Dominguea, A.R., Dupeyron, R., and Valiente, Y.V. 1999. Heavy metal removal by microalgae. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 62:144-151.
638. Travieso, L., Pellon, A., Benitez, F., Sanchez, E., Borja, R., O'Farrill, N. and Weiland, P. 2002. Bioalga reactor: preliminary studies for heavy metals removal. *Biochemical Engineering Journal*. 12:87-91.
639. Tripathi, B.N., Mehta, S.K., Amar, A. and Gaur, J.P. 2006. Oxidative stress in *Scenedesmus* sp. during short- and long-term exposure to Cu^{2+} and Zn^{2+} . *Chemosphere*. 62:538–544.
640. Tsezos, M. and Volesky, B. 1982. The mechanism of uranium biosorption by *R. arrhizus*. *Biotechnology and Bioengineering*. 24:965–969.
641. Tsuji, N., Hirayanagi, N., Iwabe, O., Namba, T., Tagawa, M., Miyamoto, S., Miyasaka, H., Takagi, M., Hirata, K. and Miyamoto, K. 2003. Regulation of phytochelatin synthesis by zinc and cadmium in marine green alga, *Dunaliella tertiolecta*. *Phytochemistry*. 62:453-459.
642. Tsuji, N., Hirayanagi, N., Okada, M., Miyasaka, H., Hirata, K., Zenk, M.H. and Miyamoto, K. 2002. Enhancement of tolerance to heavy metals and oxidative stress in *Dunaliella tertiolecta* by Zn-induced phytochelatin synthesis. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 293:653–659.
643. Tsuji, N., Nishikori, S., Iwabe, O., Shiraki, K., Miyasaka, H., Takagi, M., Hirata, K. and Miyamoto, K. 2004. Characterization of phytochelatin synthase-like protein encoded by alr0975 from a prokaryote, *Nostoc* sp. PCC 7120. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 315:751-755.
644. Tuzun, I., Bayramoglu, G., Yalcin, E., Basaran, G., Celik, G. and Arica, M.Y. 2005. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg(II), Cd(II) and Pb(II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal of Environmental Management*. 77:85-92.
645. Ucko, D.A. 1986. *Living Chemistry: An Introduction to General, Organic and biological Chemistry*. Academic Press, Inc., New York.

646. Valdman, E., Erijman, L., Pesspa, F.L.P. and Leite, S.G.F. 2001. Continuous biosorption of Cu and Zn by immobilized waste biomass *Sargassum* sp. *Process Biochemistry*. 36:869-873.
647. Valsaraj, K.T. 2000. *Elements of Environmental Engineering: Thermodynamics and Kinetics*. Lewis Publishers, London.
648. Van Nostrand International Encyclopedia of Chemical Science. 1964. Van Nostrand, New Jersey.
649. Vande, W.J.G. and Ow, D.W. 1999. A fission yeast gene for mitochondrial sulfide oxidation. *Journal of Biological Chemistry*. 274:13250-13257
650. Van-Hille, R.P., Boshoff, G.A., Rose, P.D. and Duncan, J.R. 1999. A continuous process for the biological treatment of heavy metal contaminated acid mine water. *Resources Conservation and Recycling*. 27:157-167.
651. Vatamaniuk, O.K., Mari, S., Lang, A., Chalasani, S., Demkiv, L.O. and Rea, P.A. 2004. Phytochelatin synthase, a dipeptidyltransferase that undergoes multisite acylation with γ -glutamylcysteine during catalysis. *Journal of Biological Chemistry*. 279:22449-22460.
652. Vijayaraghavan, K., Jegan, J., Palanivelu, K. and Velan, M. 2005. Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva reticulata* in a packed column. *Chemosphere*. 60:419-426.
653. Vilar, V.J.P., Botelho, C.M.S. and Boaventura, R.A.R. 2005. Influence of pH, ionic strength and temperature on lead biosorption by *Gelidium* and agar extraction algal waste. *Process Biochemistry*. 40:3267-3275.
654. Villares, R., Puente, X. and Carballeira, A. 2002. Seasonal variation and background levels of heavy metals in two green seaweeds. *Environmental Pollution*. 119:79-90.
655. Vincent, P., Pignet, P., Talmont, F., Bozzi, L., Fournier, B., Guezennec, J., Jeanthon, C., and Prieur, D. 1994. Production and Characterization of an exopolysaccharide excreted by a deep-sea Hydrothermal Vent Bacterium Isolated from the Polychaete Annelid *Albinella pompejana*. *Applied and Environmental Microbiology*. 60:4134-4141.
656. Visviki, I., and Santikul, D. 2000. The pH tolerance of *Chlamydomonas applanata* (Volvocales, Chlorophyta). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 38:147-151.
657. Volesky, B. 1990a. *Biosorption of Heavy Metals*. CRC Press, Boston.

658. Volesky, B. 1990b. Removal and recovery of heavy metals by biosorption. *In* Biosorption of Heavy Metals. CRC Press, Boca Raton.
659. Volesky, B. 2001a. Biosorption: application aspects—process simulation tools. *Process Metallurgy*. 11B:69–80
660. Volesky, B. 2001b. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*. 59:203-216.
661. Volesky, B. and Holan, Z.R. 1995. Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress*. 11:235-250.
662. Volesky, B. and May-Phillips, H.A. 1995. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 42:797-103.
663. Volesky, B., May, H. and Holan, Z.R. 1993. Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and Bioengineering*. 41:826-829.
664. Vymazal, J. 1995. *Algae and Element Cycling in Wetlands*. Lewis Publishers, London.
665. Wang, T.C., Weissman, J.C., Ramesh, G., Varadarajan, R. and Benemann, J.R. 1998. Heavy metal binding and removal by *Phormidium*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 60:739-744.
666. Wang, W. and Dei, R.C.H. 2001. Metal uptake in a coastal diatom influenced by major nutrients (N, P, and Si). *Water Research*. 35:315-321.
667. Wang, Y., Yu, Z., Song, X., Tang, X. and Zhang, S. 2006. Effects of macroalgae *Ulva pertusa* (Chlorophyta) and *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) on growth of four species of bloom-forming dinoflagellates. *Aquatic Botany*. *In Press*.
668. Wangersky, P.J. 1986. Biological control of trace metal residence time and speciation. *Marine Chemistry*. 18:269-297.
669. Warnau, M., Fowler, S.W. and Teyssie, J.L. 1996. Biokinetics of heavy metals and radionuclides in two marine macrophytes: the seagrass *Posidonia oceanica* and the alga *Caulerpa taxifolia*. *Marine Environmental Research*. 41:343-362.
670. Warren, L.A. and Haack, E.A. 2001. Biogeochemical controls on metal behavior in freshwater environments. *Earth-Science Reviews*. 54:261-320.
671. Wase, D.A.J. and Foster, C. 1997. *Biosorbents for Metal Ions*. Taylor & Francis, London.

672. Watanabe, M., Takamatsu, T., Kohata, K., Kunugi, M., Kawashima, M. and Koyama, M. 1989. Luxury phosphate uptake and variation of intracellular metal concentrations in *Heterosigma akashiwo* (Raphidoochyceae). *Journal of Phycology*. 25:428-436.
673. Weber, W.J. and Morris, J.C. 1962. Advances in Water Pollution Research. International Conference on Water Pollution Symposium. p. 231-238.
674. Weber, W.J.Jr. 1972. Physicochemical Process for Water Quality control. Wiley Interscience, New York.
675. White, C. and Gadd, G.M. 1995. Determination of metals and metal fluxes in algae and fungi. *The Science of the Total Environment*. 176:107-115.
676. Widra, A. 1959. Metachromatic granules of microorganisms. *Journal of Bacteriology*. 78:664-670.
677. Wilde, E.W. and Benemann, J.R. 1993. Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae. *Biotechnology Advance*. 11:781-812.
678. Wilkins, M.R., Pasquali, C., Appel, R.D., Ou, K., Golaz, O., Sanchez, J.C., Yan, J.X., Gooley, A.A., Hughes, G., Humphrey-Smith, I., Williams, K.L. and Hochstrasser, F.F. 1996. From proteins to proteomes: large scale protein identification by two dimensional electrophoresis and amino acid analysis. *Biotechnology*. 14:61-65.
679. Williams, A.G. and Wimpenny, J.W.T. 1978. Exopolysaccharide production by *Pseudomonas* NCB11264 growth in continuous culture. *Journal of General Microbiology*. 104:47-57.
680. Wolfaardt, G.M., Lawrence, J.R., Roberts, R.D. and Caldwell, D.E. 1994. The role of interactions, sessile growth, and nutrient amendments on the degradative efficiency of a microbial consortium. *Canadian Journal of Microbiology*. 40:331-340.
681. Wong, J.P.K., Wong, Y.S. and Tam, N.F.Y. 2000. Nickel biosorption by two chlorella species, *C. vulgaris* (a commercial species) and *C. miniata* (a local isolate). *Bioresource Technology*. 73:133-137.
682. Wong, P.T.S., Silverberg, B.A., Chau, Y.K. and Hodson, P.V. 1978. Lead and the aquatic biota. *In* The Biogeochemistry of Lead in the Environment, Part B. Biological Effects. Elsevier/North Holland Biomedical Press, New York.
683. Wood, J. M. 1974. Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science Naturwissenschaften*. 62:357-364.

684. Wundram, M., Selmar, D. and Bahadir, M. 1996. The *Chlamydomonas* test: A new phytotoxicity test based on the inhibition of algal photosynthesis enables the assessment of hazardous leachates from waste disposals in salt mines. *Chemosphere*. 32:1623-1631.
685. www.biol.tsukuba.ac.jp/~inouye/ino/g/chl/chlorophytes.html
686. www.cactusbotanics.com/images/fucoidan.jpg&imgrefurl
687. www.champa.kku.ac.th/kitti/waterpollution1.ppt
688. www.Environnet.in.th
689. www.il.mahidol.ac.th/course/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm - 20k -
690. www.iupac.org/publications/ci/2001/november/heavymetals_t1.html - 14k -
691. www.schoolnet.nectec.or.th/library/webcontest2003/100team/dlNs123/water/howt otreat.htm - 7k
692. www.sci-educ.nfe.go.th/scinet/scinsw/main/station6.html - 19k
693. www.scienceaid.co.uk/biology/fundamentals/images/eucell.jpg&imgrefurl
694. www.sparknotes.com
695. www.sut.ac.th/e-texts/Medicine/behs/lesson8/lesson8-1.html - 13k -
696. www.sut.ac.th/e-texts/Medicine/behs/lesson8/lesson8-2.html - 26k -
697. www.uniserv.buu.ac.th/forum2/post.asp?method=TopicQuote&TOPIC_ID=1481&FORUM_ID=11 - 33k -
698. Xia, H. and Rayson, G.D. 2002. 113 Cd-NMR spectrometry of Cd²⁺ binding sites on algae and higher plant tissues. *Advances in Environmental Research*. 7:157-167.
699. Xiang, C.B., Werner, B.L., Christensen, E.M. and Oliver, D.J. 2001. The biological functions of glutathione revisited in Arabidopsis transgenic plants with altered glutathione levels. *Plant Physiology*. 126:564-574.
700. Xie, J.Z., Chang, H.L. and Killbane, J.J. 1996. Removal and recovery of metal ions from wastewater using biosorbents and chemically modified biosorbents. *Bioresource Technology*. 57:127-136.
701. Xue, H.B. and Sigg, L. 1990. The binding of heavy metals to algal surfaces. *Water Research*. 22:917-926.
702. Yan, G. and Viraraghavan, T. 2001. Heavy metal removal in a biosorption column by immobilized *M. rouxii* biomass. *Bioresource Technology*. 78:243-249.

703. Yang, J. 1999. Biosorption of uranium, cadmium on *Sargassum* seaweed biomass. Ph.D. Thesis. Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Canada.
704. Yu, Q., Kaewsarn, P. and Van-Duong, L. 2000. Electron microscopy study of biosorbents from marine macro alga *Durvillaea potatorum*. Chemosphere. 41:589-594.
705. Yu, Q., Matheickal, J.T., Yin, P. and Kaewsarn, P. 1999. Heavy metal uptake capacities of common marine macro algal biomass. Water Research. 33:1534-1537.
706. Yu, Q., Tay, J.H. and Fang, H.H.P. 2001. The role of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. Water Research. 35:1052-1060.
707. Yun, Y.S., Park, D., Park, J.M. and Volesky, B. 2001. Biosorption of trivalent chromium on the brown seaweed biomass. Environmental Science and Technology. 35:4353-4358.
708. Zhao, M., Xie, S., Zhu, X., Yang, Y., Gan, N. and Song, L. 2006. Effect of dietary cyanobacteria on growth and accumulation of microcystins in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture. 261:960-966
709. Zhou, J.L., Huang, P.L. and Lin, R.G. 1998. Sorption and desorption of Cu and Cd by macroalgae and microalgae. Environmental Pollution. 101:67-75.
710. กรมควบคุมมลพิษ. 2537. แนวทางควบคุมปัญหาน้ำเสียสำหรับองค์กรบริหารท้องถิ่น. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
711. กรมควบคุมมลพิษ. 2540. บันทึกสีน้ำตาล รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
712. กรรณิการ์ สิริสิงห. 2549. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
713. กองประมงน้ำจืด. 2538. พรรณไม้น้ำในประเทศไทย. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
714. กาญจนภาชน์ ลีวมนอนต์. 2527. สหรัย. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
715. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2547. วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. เอส อาร์ พรินต์ติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด.
716. จงจินต์ ศิวะศิลป์. 2524. สหรัยวิทยา. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
717. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2522. หลักเคมี 1. กราฟิการ์ต, กรุงเทพฯ. หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

718. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2546. หลักเคมี 1 ทฤษฎี โครงสร้าง ปฏิกริยา. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
719. บุปผา แซ่มประเสริฐ. 2527. ผลกระทบของแคดเมียมในแอคติเวตเต็ดสลัดจ์ที่มีต่อพืชผักและธาตุอาหารพืชบางชนิด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
720. ปธานุกรมปฐพีวิทยา. 2541. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
721. ฝ่ายสุขภาพโรงงาน กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัย กรุงเทพมหานครและเขต พงศ์ ศรีสุขพันธุ์
722. ฝ่ายสุขภาพโรงงาน กองอนามัยสิ่งแวดล้อมสำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร
723. พรสวัสดิ์ มหาโชคเลิศวัฒนา. 2529. การกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิต แบตเตอรี่โดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
724. พัทธรา เพ็ชรพิรุณ. 2531. ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในห่วงโซ่อาหารของหมึกและ ปลากินเนื้อที่พบบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง จันทบุรี และตราด. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
725. ยงยุทธ โอสดสภา. 2542. ศัพท์ในวงการปุ๋ย. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
726. ยุวดี พีรพรพิศาล. 2548. สหรัยจำจัดในภาคเหนือของประเทศไทย. โชตนาพรินทร์ จำกัด เชียงใหม่.
727. ยุวรัตน์ ปรมิศนาภรณ์. 2544. การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัด แคดเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.
728. ลัดดา วงศ์รัตน์. 2539. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะ ประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
729. ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
730. สุชาดา มะแส. 2540. การสะสมของแคดเมียมและปรอทในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. วารสารการประมง. 50:40-47.
731. สุนิรัตน์ เรืองสมบุรณ์ บุปผา จงพัฒน์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ และปวีณา ทวีกิจการ. 2548. คุณค่าทางโภชนาการของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher ที่เพาะเลี้ยง ในสูตรอาหารที่แตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 23:38-47.
732. สุนิรัตน์ เรืองสมบุรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ ปวีณา ทวีกิจการ และกลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์. 2546. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 21:48-60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เอกสารอ้างอิง

399. Hu, C., Liu, Y., Paulsen, B.S., Petersen, D. and Klaveness, D. 2003. Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain. *Carbohydrate Polymers*. 54:33-42.
400. Hu, S. 1998. Cadmium sequestration in the marine macroalgae *Kappaphycus alvarezii*. *Molecular Marine Biology and Biotechnology*. 7:97-104.
401. Huang, C. and Huang, C.P. 1996. Application of *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus oryzae* for Cu (II) removal. *Water Research*. 9:1985-1990.
402. Ilangovan, K., Canizares-Villanueva, R.O., Moreno, S.G. and Voltolina, D. 1998. Effect of cadmium and zinc on respiration and photosynthesis in suspended and immobilized cultures of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus*. *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*. 60:936-943.
403. Institute of advanced manufacturing sciences, Inc. 1999. Eliminate heavy metal based pigments. เข้าถึงได้จาก <http://www.techsolve.org/p2iris/printing/2343-w.htm>.
404. Inthorn, D. 2001. Removal of Heavy Metal by using Microalgae. In *Photosynthetic Microorganisms in Environmental Biotechnology*. Springer-Verlag Hong Kong Ltd, Hong-Kong.
405. Inthorn, D., Incharoensakdi, A. and Sittitoo, N. 2001. Removal of mercury, cadmium and lead in aqueous solution by microalgae. *Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Science*. 7:109-115.
406. Inthorn, D., Nagase, H., Isaji, Y., Hirata, K and Miyamoto, K. 1996. Removal of cadmium from aqueous solution by the filamentous cyanobacterium *Tolypothrix tenuis*. *Journal of Ferment and Bioengineering*. 82:580-584.
407. Inthorn, D., Sittitoo, N., Silapanuntakul, S. and Incharoensakdi, A. 2002a. Sorption of mercury, cadmium and lead by microalgae. *ScienceAsia*. 28:253-261.
408. Inthorn, D., Silapanuntakul, S. and Incharoensakdi, A. 2002b. Filamentous cyanobacteria can efficiently remove cadmium present in aqueous solution at low concentration. *Asian Journal of Microbiology Biotech Environmental Science*. 4:1-6.
409. Itoh, M., Yuasa, M. and Kobayashi, T. 1975. Adsorption of metal ions on yeast cells at varied cell concentrations. *Plant Cell Physiology*. 16:1167-1169.

733. สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ. 2545. การบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วและแคดเมียมปนเปื้อนโดยใช้แหนเป็ดเล็ก (*Lemna perpusilla* Torr.). วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 20:1-11.
734. สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ. 2547ก. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris*. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3:287-296.
735. สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ. 2547ข. การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ *Scenedesmus dimorphus* เป็นตัวดูดซับ. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 12:42-47.
736. สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ. 2549ก. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไขน้ำ *Wolffia arrhiza* (L.) Wimmer. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24:1-14.
737. สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ. 2549ข. ผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโต ปริมาณโปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์ของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14:40-49
738. สุภาพ บุญยะรัตเวช. 2548. เคมีทั่วไป. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
739. อำนาง วงศ์บัณฑิต. 2545. กฎหมายสิ่งแวดล้อม. คณะนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. บริษัทสำนักพิมพ์วิญญูชน จำกัด. กรุงเทพฯ.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 คุณสมบัติของโลหะหนัก^[256] พรอท Hg

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ปรอท, Hg, 80
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	12, 6, d
ลักษณะ	สีขาวเงิน 
มวลอะตอม	200.59 (2) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 32, 18, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของเหลว
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง)	(ของเหลว) 13.534 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	2.29 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	59.11 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 27.983 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
สถานะออกซิเดชัน	2, 1 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.00 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 1007.1 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1810 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3300 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	150 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	171 pm
รัศมีโคเวเลนต์	149 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	155 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) ตะกั่ว Pb

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ตะกั่ว, Pb, 82
อนุกรมเคมี	โลหะหลังทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	14, 6, p
ลักษณะ	สีขาวอมน้ำเงิน 
มวลอะตอม	207.2(1) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 32, 18, 4
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	11.34 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	10.66 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	4.77 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	179.5 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.650 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
สถานะออกซิเดชัน	4, 2 (amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.33 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 715.6 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1450.5 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3081.5 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	180 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	154 pm
รัศมีโคเวเลนต์	147 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	202 pm

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) อาร์เซนิก/สารหนู As

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	สารหนู, As, 33
อนุกรมเคมี	ธาตุกึ่งโลหะ
หมู่, คาบ, บล็อก	15, 4, p
ลักษณะ	สีเทามันวาว 
มวลอะตอม	74.92160(2) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 5
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	5.727 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	5.22 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	(gray) 24.44 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	34.76 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.64 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	rhombohedral
สถานะออกซิเดชัน	±3, 5 (ออกไซด์เป็นกรดปานกลาง)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.18 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 947.0 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1798 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 2735 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	115 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	114 pm
รัศมีโคเวเลนต์	119 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	185 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) แคดเมียม Cd

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	แคดเมียม, Cd, 48
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	12, 5, d
ลักษณะ	สีเทาเงิน มันวาว 
มวลอะตอม	112.411(8) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 18, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	8.65 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	7.996 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	6.21 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	99.87 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.020 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
สถานะออกซิเดชัน	2 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.69 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 867.8 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1631.4 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3616 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	155 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	161 pm
รัศมีโคเวเลนต์	148 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	158 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) โครเมียม Cr

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	โครเมียม, Cr, 24
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	6, 4, d
ลักษณะ	สีเงินมันวาว 
มวลอะตอม	51.9961(6) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 13, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	7.15 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	6.3 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	21.0 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	339.5 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 23.35 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	cubic body centered
สถานะออกซิเดชัน	6, 3, 2(ออกไซด์เป็นกรดแก่)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.66 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน(เพิ่มเติม)	ระดับที่ 1: 652.9 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1590.6 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 2987 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	140 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	166 pm
รัศมีโคเวเลนต์	127 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) นิกเกิล Ni

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	นิกเกิล, Ni, 28
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	10, 4, d
ลักษณะ	สีโลหะ เงามันวาว 
มวลอะตอม	58.6934(2) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 16, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	8.908 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	7.81 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	17.48 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	377.5 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.07 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์
สถานะออกซิเดชัน	2, 3(ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.91 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 737.1 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1753.0 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3395 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	149 pm
รัศมีโคเวเลนต์	121 pm

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) แมงกานีส Mn

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	แมงกานีส, Mn, 25
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	7, 4, d
ลักษณะ	สีเงิน 
มวลอะตอม	54.938049(9) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 13, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	7.21 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	5.95 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	12.91 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	221 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.32 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	cubic body centered
สถานะออกซิเดชัน	7, 6, 4, 2, 3(ออกไซด์เป็นกรดแก่)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.55 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 717.3 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1509.0 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3248 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	140 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	161 pm
รัศมีโคเวเลนต์	139 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) คอปเปอร์/ ทองแดง Cu

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ทองแดง, Cu, 29
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	11, 4, d
ลักษณะ	สีทองแดงเงา มันวาว 
มวลอะตอม	63.546(3) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	8.96 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	8.02 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	13.26 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	300.4 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.440 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์
สถานะออกซิเดชัน	2, 1(ออกไซด์เป็นแบบสปานกลาง)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.90 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 745.5 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1957.9 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3555 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	145 pm
รัศมีโคเวเลนต์	138 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	140 pm

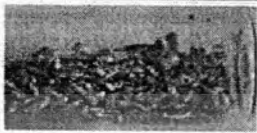
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) สังกะสี Zn

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	สังกะสี, Zn, 30
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	12, 4, d
ลักษณะ	สีเทาอ่อนแกมน้ำเงิน 
มวลอะตอม	65.409(4) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	7.14 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	6.57 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	7.32 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	123.6 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 25.390 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	หกเหลี่ยม
สถานะออกซิเดชัน	2 (amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.65 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 906.4 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1733.3 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3833 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	142 pm
รัศมีโคเวเลนต์	131 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) โคบอลต์ Co

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	โคบอลต์, Co, 27
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	9, 4, d
ลักษณะ	สีโลหะเจือสีเทา 
มวลอะตอม	58.933200(9) กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d ⁷ 4s ²
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 15, 2
คุณสมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	8.90 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	7.75 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	16.06 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	377 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.81 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	รูปหกเหลี่ยม
สถานะออกซิเดชัน	2, 3 (amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.88 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 760.4 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1648 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3232 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	152 pm
รัศมีโคเวเลนต์	126 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ) ทองคำ Au

ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ทองคำ, Au, 79
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	11, 6, d
ลักษณะ	สีเหลืองวาว 
มวลอะตอม	196.96655(2) กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 32, 18, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
เฟส	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	19.3 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	17.31 ก./ซม. ³
ความร้อนของการหลอมเหลว	12.55 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	324 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 25.418 J/(mol·K)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	cubic face centered
สถานะออกซิเดชัน	3, 1(amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.54 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 890.1 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 1980 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	174 pm
รัศมีโคเวเลนต์	144 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	166 pm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 2 รัศมีไอออน (ionic radius) ของธาตุต่าง ๆ เรียงลำดับตามรัศมี
เล็กสุดถึงใหญ่สุด

รัศมีไอออน (อังสตรอม)	ชื่อธาตุ	สัญลักษณ์	Oxidation state	หมายเลข อะตอม
0.012 Å	Hydrogen	H	1	1
0.13 Å	Nitrogen	N	3	7
0.23 Å	Boron	B	3	5
0.35 Å	Beryllium	Be	2	4
0.37 Å	Sulfur	S	6	16
0.38 Å	Phosphorus	P	5	15
0.4 Å	Silicon	Si	4	14
0.46 Å	Manganese	Mn	2	25
0.5 Å	Selenium	Se	4	34
0.52 Å	Uranium	U	6	92
0.52 Å	Chromium	Cr	3	24
0.53 Å	Germanium	Ge	4	32
0.535 Å	Aluminum	Al	3	13
0.56 Å	Technetium	Tc	7	43
0.56 Å	Rhenium	Re	6	75
0.58 Å	Arsenic	As	±3	33
0.59 Å	Vanadium	V	5	23
0.605 Å	Titanium	Ti	4	22
0.62 Å	Gallium	Ga	3	31
0.62 Å	Tungsten	W	6	74
0.625 Å	Platinum	Pt	4	78
0.625 Å	Iridium	Ir	4	77
0.63 Å	Osmium	Os	4	76
0.64 Å	Tantalum	Ta	5	73
0.645 Å	Iron	Fe	3	26
0.65 Å	Molybdenum	Mo	6	42
0.68 Å	Ruthenium	Ru	4	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

รัศมีไอออน (อังสตรอม)	ชื่อธาตุ	สัญลักษณ์	Oxidation state	หมายเลข อะตอม
0.68 Å	Rhodium	Rh	3	45
0.69 Å	Tin	Sn	4	50
0.69 Å	Nickel	Ni	2	28
0.69 Å	Niobium	Nb	5	41
0.71 Å	Hafnium	Hf	4	72
0.72 Å	Zirconium	Zr	4	40
0.72 Å	Magnesium	Mg	2	12
0.73 Å	Copper	Cu	2	29
0.74 Å	Zinc	Zn	2	30
0.745 Å	Cobalt	Co	2	27
0.745 Å	Scandium	Sc	3	21
0.75 Å	Neptunium	Np	5	93
0.76 Å	Antimony	Sb	±3	51
0.76 Å	Lithium	Li	1	3
0.78 Å	Protactinium	Pa	5	91
0.8 Å	Indium	In	3	49
0.848 Å	Lutetium	Lu	3	71
0.85 Å	Gold	Au	3	79
0.858 Å	Ytterbium	Yb	3	70
0.86 Å	Palladium	Pd	2	46
0.869 Å	Thulium	Tm	3	69
0.881 Å	Erbium	Er	3	68
0.887 Å	Plutonium	Pu	4	94
0.9 Å	Yttrium	Y	3	39
0.901 Å	Holmium	Ho	3	67
0.912 Å	Dysprosium	Dy	3	66
0.923 Å	Terbium	Tb	3	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

รัศมีไอออน (อังสตรอม)	ชื่อธาตุ	สัญลักษณ์	Oxidation state	หมายเลข อะตอม
0.925 Å	Einsteinium	Es	3	99
0.934 Å	Californium	Cf	3	98
0.938 Å	Gadolinium	Gd	3	64
0.947 Å	Europium	Eu	3	63
0.949 Å	Berkelium	Bk	3	97
0.964 Å	Samarium	Sm	3	62
0.97 Å	Tellurium	Te	4	52
0.97 Å	Cadmium	Cd	2	48
0.97 Å	Curium	Cm	3	96
0.972 Å	Thorium	Th	4	90
0.979 Å	Promethium	Pm	3	61
0.982 Å	Americium	Am	3	95
0.99 Å	Calcium	Ca	2	20
0.995 Å	Neodymium	Nd	3	60
1.013 Å	Praseodymium	Pr	3	59
1.02 Å	Sodium	Na	1	11
1.02 Å	Mercury	Hg	2	80
1.03 Å	Bismuth	Bi	3	83
1.034 Å	Cerium	Ce	3	58
1.061 Å	Lanthanum	La	3	57
1.1 Å	Nobelium	No	3	102
1.119 Å	Actinium	Ac	3	89
1.12 Å	Strontium	Sr	2	38
1.19 Å	Lead	Pb	2	82
1.26 Å	Silver	Ag	1	47
1.33 Å	Fluorine	F	-1	9
1.35 Å	Barium	Ba	2	56

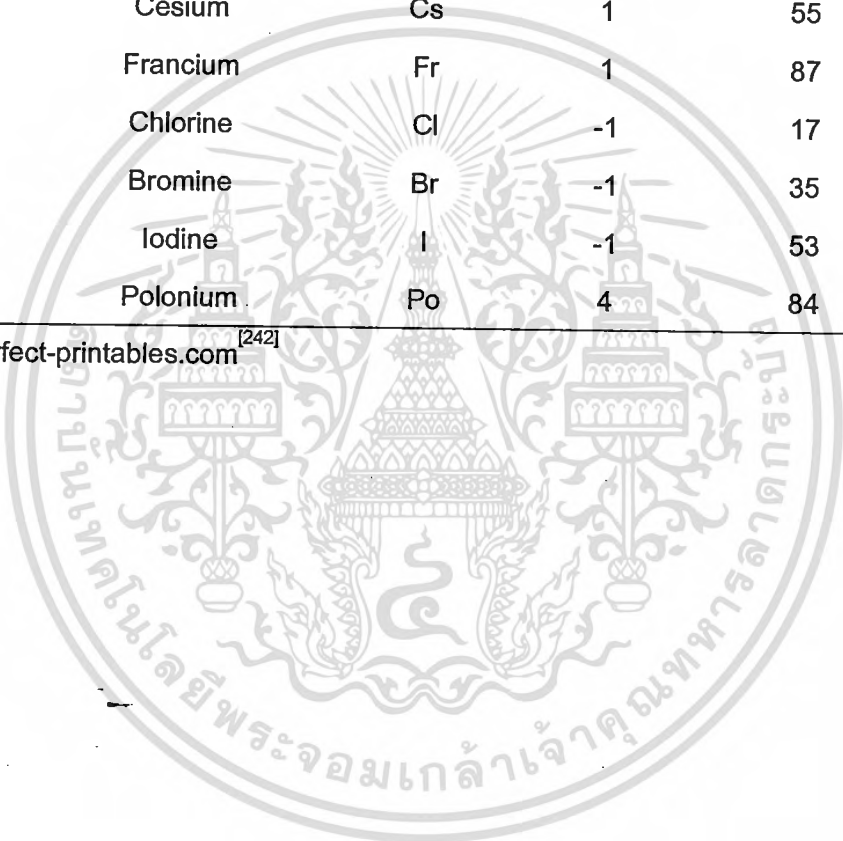
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

รัศมีไอออน (อังสตรอม)	ชื่อธาตุ	สัญลักษณ์	Oxidation state	หมายเลข อะตอม
1.38 Å	Potassium	K	1	19
1.4 Å	Oxygen	O	-2	8
1.43 Å	Radium	Ra	2	88
1.5 Å	Thallium	Tl	1	81
1.52 Å	Rubidium	Rb	1	37
1.67 Å	Cesium	Cs	1	55
1.8 Å	Francium	Fr	1	87
1.81 Å	Chlorine	Cl	-1	17
1.96 Å	Bromine	Br	-1	35
2.2 Å	Iodine	I	-1	53
2.3 Å	Polonium	Po	4	84

ที่มา : <http://perfect-printables.com>^[242]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาคผนวกใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 3 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) และความหนาแน่น (density) ของธาตุ

ธาตุ	สัญลักษณ์	หมายเลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	ความหนาแน่น
Actinium	Ac	89	227	10.07
Aluminum	Al	13	26.98	2.7
Americium	Am	95	(243)	11.87
Antimony	Sb	51	121.75	6.68
Argon	Ar	18	39.94	1.784
Arsenic	As	33	74.92	5.727
Astatine	At	85	211	
Barium	Ba	56	137.34	3.5
Berkelium	Bk	97	(247)	
Beryllium	Be	4	9.01	1.845
Bismuth	Bi	83	208.98	9.3
Bromine	Br	35	79.90	3.12
Boron	B	5	10.81	2.34
Cadmium	Cd	48	112.4	8.65
Calcium	Ca	20	40.08	1.54
Californium	Cf	98	(251)	
Carbon	C	6	12.01	1.88
Cerium	Ce	58	140.12	6.66
Cesium	Cs	55	132.90	1.873
Chlorine	Cl	17	35.45	3.214
Chromium	Cr	24	51.99	7.19
Cobalt	Co	27	58.93	8.90
Columbium (Niobium)	Cb	41	92.90	8.57
Copper	Cu	29	63.54	8.94
Curium	Cm	96	(247)	13.51
Dysprosium	Dy	66	162.5	8.536
Einsteinium	Es	99	(254)	
Erbium	Er	68	167.26	9.051
Europium	Eu	63	151.96	5.259
Fermium	Fm	100	(257)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ธาตุ	สัญลักษณ์	หมายเลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	ความหนาแน่น
Fluorine	F	9	18.99	1.69
Francium	Fr	87	223	
Gadolinium	Gd	64	157.25	7.895
Gallium	Ga	31	69.72	5.907
Germanium	Ge	32	72.59	5.32
Gold	Au	79	196.96	19.32
Hafnium	Hf	72	178.49	13.29
Helium	He	2	4.00	0.178
Holmium	Ho	67	164.93	8.803
Hydrogen	H	1	1.007	0.089
Indium	In	49	114.82	7.31
Iodine	I	53	126.90	4.93
Iridium	Ir	77	192.2	22.42
Iron	Fe	26	55.84	7.87
Krypton	Kr	36	83.80	3.74
Lanthanum	La	57	138.91	6.174
Lawrencium	Lr	103	(260)	
Lead	Pb	82	210	9.398
Lithium	Li	3	6.939	0.534
Lutetium	Lu	71	174.97	9.842
Magnesium	Mg	12	24.31	1.74
Manganese	Mn	25	54.93	7.44
Mendelevium	Md	101	(258)	
Mercury	Hg	80	200.59	13.55
Molybdenum	Mo	42	95.94	10.22
Neodymium	Nd	60	144.24	7.004
Neon	Ne	10	20.18	0.900
Neptunium	Np	93	237	20.45
Niobium	Nb	41	92.90	8.57
(Columbium)				
Nickel	Ni	28	58.71	8.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ธาตุ	สัญลักษณ์	หมายเลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	ความหนาแน่น
Nitrogen	N	7	14.006	1.25
Nobelium	No	102	(259)	
Osmium	Os	76	190.2	22.5
Oxygen	O	8	15.99	1.429
Palladium	Pd	46	106.4	12.02
Phosphorus	P	15	30.97	1.82
Platinum	Pt	78	195.09	21.4
Plutonium	Pu	94	(244)	19.84
Promethium	Pm	61	147	7.22
Protactinium	Pa	91	231.05	15.37
Potassium	K	19	39.10	0.87
Praseodymium	Pr	59	140.90	6.782
Radium	Ra	88	226.05	5
Radon	Rn	86	222	9.73
Rhenium	Re	75	186.2	21.02
Rhodium	Rh	45	102.90	12.44
Rubidium	Rb	37	85.47	1.53
Ruthenium	Ru	44	101.07	12.4
Samarium	Sm	62	150.35	7.536
Scandium	Sc	21	44.95	2.99
Selenium	Se	34	78.96	4.79
Silicon	Si	14	28.08	2.33
Silver	Ag	47	107.87	10.49
Sodium	Na	11	22.98	0.97
Strontium	Sr	38	87.62	2.6
Sulfur	S	16	32.06	2.07
Tantalum	Ta	73	180.94	16.6
Technetium	Tc	43	99	11.49
Tellurium	Te	52	127.6	6.25
Terbium	Tb	65	158.92	8.272
Thallium	Tl	81	204.37	11.85

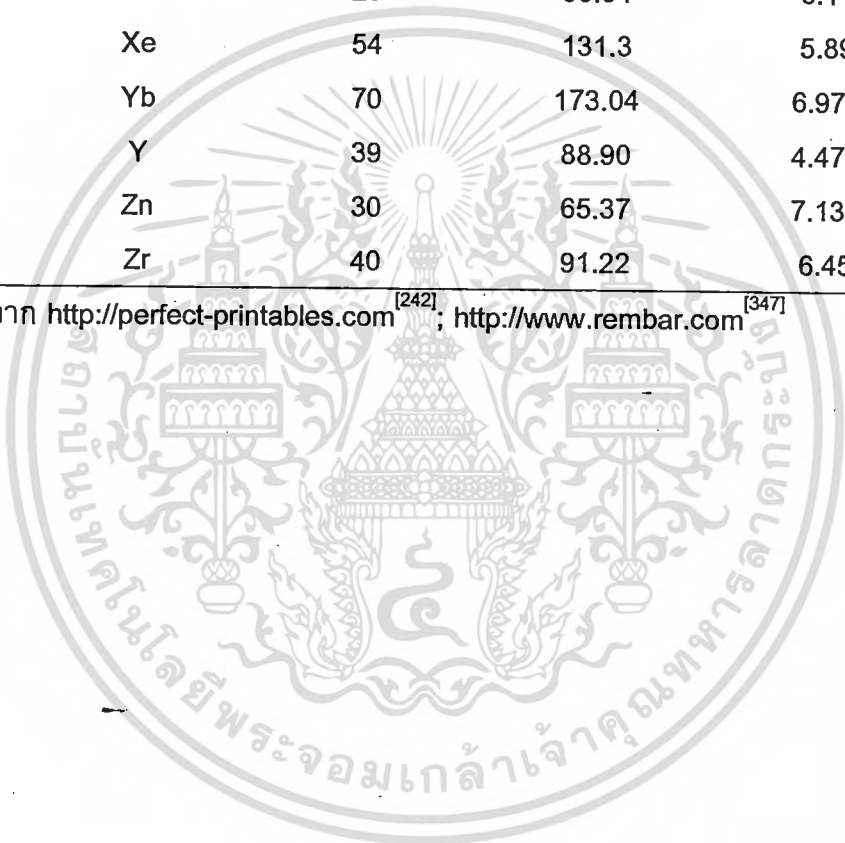
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ธาตุ	สัญลักษณ์	หมายเลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	ความหนาแน่น
Thorium	Th	90	232.04	11.66
Thulium	Tm	69	168.93	9.332
Tin	Sn	50	118.69	7.3
Titanium	Ti	22	47.90	4.54
Tungsten	W	74	183.85	19.3
Uranium	U	92	238.03	19.07
Vanadium	V	23	50.94	6.11
Xenon	Xe	54	131.3	5.89
Ytterbium	Yb	70	173.04	6.977
Yttrium	Y	39	88.90	4.472
Zinc	Zn	30	65.37	7.133
Zirconium	Zr	40	91.22	6.45

ที่มา: ดัดแปลงจาก <http://perfect-printables.com>^[242]; <http://www.rembar.com>^[347]



ตารางหมวดที่ 4 ค่าคงที่ความคงตัว (stability constants/log K₁) ของโลหะบางชนิด

โลหะ (ด้านขวา)	Al(III)	Ba	Ca	Co(II)	Cu	Fe(II)	Fe(III)	Hg	Mg	Mn	Ni	Sr	Zn
ลิแกนด์ (ด้านล่าง)													
Acetic acid		0.39	0.53	2.24				3.7	0.51		0.74	0.43	1.03
Adenine					3.35								
Adipic acid		1.92	2.19										
ADP		2.36	2.82	3.68	5.90				3.11	3.54	4.50	2.50	4.28
Alanine		0.80	1.24	4.82	8.18					3.24	5.96	0.73	5.16
β-Alanine					7.13						4.63		4
Albumin			2.20										
Arginine						3.20				2.0			
Ascorbic acid			0.19									0.35	
Asparagine			0									0.43	
Aspartic acid		1.14	1.16	5.90	8.57				2.43	3.74	7.12	1.48	2.90
ATP	9.8	3.29	3.60	4.62	6.13				4.0	3.98	5.02	3.03	4.25
Benzoic acid					1.6						0.9		0.9
n-Butyric acid		0.31	0.51		2.14				0.53			0.36	1.00
Casein			2.23										
Citraconic acid			1.3									1.3	
Citric acid	11.7	2.3	3.5	4.4	6.1	3.2	11.85	10.9	2.8	3.2	4.8	2.8	4.5
Cysteine				9.3	19.2	6.2		14.4	< 4	4.1	10.4		9.8
Dehydracetic acid					5.6						4.1		

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

โลหะ (ด้านขวา)	Al(III)	Ba	Ca	Co(II)	Cu	Fe(II)	Fe(III)	Hg	Mg	Mn	Ni	Sr	Zn
ลิแกนด์ (ด้านล่าง)													
Desferri-ferrichrysin							29.9						
Desferri-ferrichrome							29.0						
Desferri-ferrinoxamin E				11.8	13.7						12.2		12.0
3,4-Dihydroxybenzoic acid			3.71	7.96	12.79		32.5		5.67	7.22	8.27		8.91
Dimethylglyoxime					11.94						14.6		7.7
O,O-Dimethylpurpurogallin			4.5	6.6	9.2				4.9		6.7		6.8
DNA	<5.6												
EDTA	16.13	7.78	10.70	16.21	18.8	14.3	25.7	21.5	8.69	13.56	18.56	8.63	16.5
Formic acid		0.60	0.80		1.98		3.1					0.66	0.60
Fumaric acid	1.59		2.00		2.51					0.99		0.54	
Globulin			2.32										
Gluconic acid	0.95		1.21		18.29				0.70			1.00	1.70
Glutamic acid	1.28		1.43	5.06	7.85	4.6			1.9	3.3	5.9	1.37	5.45
Glutaric acid	2.04		1.06		2.4				1.08			0.6	1.60
Glyceric acid	0.80b		1.18b						0.86			0.89	1.80
Glycine	0.77		1.43	5.23	8.22	4.3	10.0	10.3	3.45	3.2	6.1	0.91	5.16
Glycolic acid	0.66		1.11	1.60	2.81		4.7		0.92			0.80	1.92
Glycylglycine			1.24	3.00	6.7	2.62	9.1		1.34	2.19	4.18		3.91
Glycylsarcosine				3.91	6.50					2.29	4.44		

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

โลหะ (ด้านขวา)	Al(III)	Ba	Ca	Co(II)	Cu	Fe(II)	Fe(III)	Hg	Mg	Mn	Ni	Sr	Zn
ลิแกนด์ (ด้านล่าง)													
Guanosine				3.2	6	4.3			3.0		3.8		4.6
Histamine				5.16	9.55	9.60	3.72				6.88		5.96
Histidine				7.30	10.60	5.89	4.00			3.58	8.69		6.63
β-Hydroxybutyric	0.43		0.60						0.60			0.47	1.06
3-Hydroxyflavone				9.91	13.20								9.70
Inosine				2.6	5	3				4.57	3.3		
Inosine triphosphate			3.76	4.74			24.6		4.04				
Iron-free ferrichrome													
Isovaleric acid			0.20		2.08								
Itaconic acid			1.20		2.8						1.8	0.96	1.9
Kojic acid			2.5	7.11	6.6		9.2		3.0		7.4		4.9
Lactic acid	7.7		1.07	1.89	3.02		6.4		0.93	1.19	2.21	0.70	1.86
Leucine	0.55			4.49	7.0	3.42	9.9			2.15	5.58		4.92
Lysine							4.5			2.18			
Maleic acid		2.26	2.43		3.90					1.68	2.0	1.1	2.0
Malic acid		1.30	1.80		3.4				1.55	2.24		1.45	2.80
Methionine						3.24	9.1				5.77		4.38
Methylsalicylate					5.90		9.77						
NTA	>10	4.82	6.41	10.6	12.68	8.84	15.87		5.41	7.44	11.26	4.98	10.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจทางวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

โลหะ (ด้านขวา) ลิแกนด์ (ด้านล่าง)	Al(III)	Ba	Ca	Co(II)	Cu	Fe(II)	Fe(III)	Hg	Mg	Mn	Ni	Sr	Zn
Orotic acid				6.39							6.82		6.42
Ornithine				4.02	6.90	3.09	8.7			<2	4.85		4.10
Oxalic acid	7.26	2.31	3.0	4.7	6.3	>4.7	9.4		2.55	3.9	5.16	2.54	4.9
β-Phenylalanine				1	7.74	3.26	8.9						
Pimelic acid										1.08			
Pivalic acid			0.55		2.19								
Polyposphosphate			3.0		3.5	3.0			3.2	5.5	3.0		2.5
Proline						4.07	10.0			3.34			
Propionic acid		0.34	0.50		2.2		3.45		0.54			0.43	1.01
Purine					6.90						4.88		
Pyrophosphate			5.0		6.7		22.2		5.7		5.8		8.7
Pyruvic acid			0.8		2.2								
Riboflavin				3.9	<6					3.4	4.1		<4
Salicylaldehyde				4.67	7.40	4.22	8.70		3.69	3.73	5.22		4.50
Salicylic acid	14.11			6.72	10.60	6.55	16.35		4.7	2.7	6.95		6.85
Sarcosine				4.34	7.83	3.52	9.7				5.41		
Serine			1.43			3.43	9.2				5.44		
Succinic acid		1.57	1.20	2.08	3.3		7.49		1.2	2.11	2.36	0.9	1.78

ในวาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

โลหะ (ด้านขวา)	Al(III)	Ba	Ca	Co(II)	Cu	Fe(II)	Fe(III)	Hg	Mg	Mn	Ni	Sr	Zn
ลิแกนด์ (ด้านล่าง)													
(±)-Tartaric acid	1.95	1.80			3.2		7.49		1.36		3.78	1.94	2.68
Tetrametaphosphate	4.9	5.2			3.18				5.17		4.95	2.8	
Threonine						3.30	8.6						
Transferrin	12.3												
Trimetaphosphate			2.50		1.55				1.11	3.57	3.22	1.95	
Triphosphate			6.5		9.8				5.8			3.80	9.7
Tryptophan		6.3					9.0						
Uridine diphosphate									3.17				
Uridine triphosphate			3.71	4.55					4.02	4.78			
n-Valeric acid	0.20		0.30		2.12								
Valine					7.92	3.39	9.6			2.84	5.37		5.0
Xanthosine				2.8	3.4	<2					3.0		2.4

ที่มา: <http://george-eby-research.com>^[223]

ตารางผนวกที่ 5 สารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบ

ชนิดของสารอินทรีย์	หมู่ฟังก์ชัน	ชื่อของหมู่ฟังก์ชัน	สูตรทั่วไป	ตัวอย่าง
แอลเคน	-	-	R-H	CH ₃ CH ₂ CH ₃ โพรเพน
แอลคีน	>C=C<	พันธะคู่	R-CH=CH-R'	CH ₂ =CH ₂ (เอทิลีน)
แอลไคน์	$\text{—C}\equiv\text{C—}$	พันธะสาม	R-C≡C-R'	CH≡CH (อะเซทิลีน)
แอลกอฮอล์	-OH	ไฮดรอกซิล	R-OH	CH ₃ CH ₂ OH เอทานอล
อีเทอร์	-O-	ออกซี	R-O-R'	CH ₃ -O-CH ₃ ไดเมทิลอีเทอร์ (เมทอกซิลมีเทน)
แอลดีไฮด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—H} \end{array}$	ฟอร์มิล หรือคาร์บอกซัลดีไฮด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R—C—H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{—C—H} \end{array}$ เอทานอล (อะเซตัลดีไฮด์) หรือ CH ₃ CHO
คีโตน	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—} \end{array}$	คาร์บอนิล	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R—C—R}' \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{—C—CH}_3 \end{array}$ โพรพาโนน (อะซีโตน) หรือ CH ₃ COCH ₃
กรดอินทรีย์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—OH} \end{array}$	คาร์บอกซิล	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R—C—OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{—C—OH} \end{array}$ กรดแอทาโนอิก (กรดแอซิดิก)
เอสเทอร์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—} \end{array}$	แอลคอกซิคาร์บอนิล	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R—C—O—R}' \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{—C—O—CH}_3 \end{array}$ เมทิลแอซิเตต
เอมีน	-NH ₂	อะมิโน	R-NH ₂	CH ₃ -NH ₂ เมทิลเอมีน (อามิโนมีเทน)
เอไมด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—NH}_2 \end{array}$	เอไมด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R—C—NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{—C—NH}_2 \end{array}$ แอเซทาไมด์ (เอทานาไมด์)

ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://www.school.net.th> [351]