ปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การใช้ *Stigonema* บำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

Lead (Pb^{2+}) removal from synthetic wastewater by *Stigonema*

โดย

นางสาวพุทธิพร ศรวรเวทย์ 46040718

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

Department of Fisheries Science Faculty of Agricultural Technology

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bangkok 10520

ใบรับรองปัญหาพิเศษ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

เรื่อง การใช้ *Stigonema* บำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

Lead (Pb^{2+}) removal from synthetic wastewater by *Stigonema*

ชื่อนักศึกษา นางสาวพุทธิพร ศรวรเวทย์

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา.....

(ผศ. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์)

ภาควิชารับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ)

หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

วันที่ 17 **เดือน** ต.ค. **พ.ศ.** 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร พระจอมเกล้าลาดกระบัง

23114

ปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การใช้ *Stigonema* บำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

Lead (Pb^{2+}) removal from synthetic wastewater by *Stigonema*

T099430

โดย

นางสาวพุทธิพร ศรวรเวทย์

รหัสนักศึกษา 46040718

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

ปีการศึกษา 2549

2พ.
พ8877ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....99430
วัน,เดือน,ปี.....

.b.....11955431
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อปัญหาพิเศษ
เรื่อง

การใช้ *Stigonema* บำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

Lead (Pb^{2+}) removal from synthetic wastewater by *Stigonema*

การศึกษาความสามารถของ *Stigonema* ในการบำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก พบว่าระดับพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วคือพีเอช 5 สามารถกำจัดตะกั่ว ได้ถึง 52.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณเซลที่มีความเหมาะในกำจัดตะกั่ว คือ 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำจัดได้ 84.44 มิลลิกรัมต่อกรัม และ อายุเซลสาหร่ายที่ 1, 2 ,3 และ4 สัปดาห์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p <0.05) ระยะเวลาที่เป็นจุดอิ่มตัวในการดูดซับตะกั่วคือ 24 ชั่วโมง ความสามารถสูงสุดของ *Stigonema* ในการดูดซับโลหะหนักสามารถแสดงได้โดยใช้สมการของ Langmuir adsorption isotherm ซึ่ง *Stigonema* สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด คือ 1666.67 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่ายแห้ง ในการล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับ พบว่า EDTA และ nitric acid สามารถล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับได้ 82.98 และ 81.96 เปอร์เซ็น ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p <0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนิยม

การจัดทำปัญหาพิเศษในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะทำงาน จนกระทั่งเสร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ คุณบุปผา จงพัฒน์ และคุณนภพล เผ่ามนัส ที่ได้อนุเคราะห์และให้ความดูแลในเรื่องการเบิกใช้อุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงเจ้าหน้าที่ คณาจารย์ทุกท่าน และเพื่อนๆทุกคนในภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมงที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือระหว่างการทดลองที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในการทำปัญหาพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณนารี พันธุจินดาวรรณ ภาควิชาปฐพีวิทยา สำหรับคำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่การใช้เครื่อง AAS รวมถึงการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำการทดลอง

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่ได้ให้สิ่งดีๆในชีวิต**ขอขอบพระคุณค่ะ**

นางสาวพุทธิพร ศรวรเวทย์

พฤษภาคม 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	I
สารบัญตาราง	II
สารบัญภาพ	IV
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	23
ผลการทดลองและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับ Cu^{2+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) และ แบบแลงค์เมียร์ (Langmuir)	14
2	การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับ Fe^{3+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) และ แบบแลงค์เมียร์ (Langmuir	15
3	การเปรียบเทียบค่าคงที่ของฟรุนดิช และ R^2 ในการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+})	18
4	การล้างการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) ออกจากเซลของสาหร่าย *G. gelatincsa* โดยใช้ EDTA (Mean ± SE) ทดลอง 3 ซ้ำ	19
5	ประสิทธิภาพในการล้าง (desorp) ตะกั่ว (Pb^{2+}) ด้วยสารต่างชนิดกัน ในสารละลายตะกั่ว (Pb^{2+}) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที ระยะเวลาการล้างตัวดูดซับ 60 นาที	19
6	การดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Fischerella* ที่ระดับ pH แตกต่างกัน (Mean ± S.E.)	35
7	การดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับ pH แตกต่างกัน (Mean ± S.E.)	36
8	ปริมาณเซลของสาหร่าย *Stigonema* ที่ต่างกันมีผลต่อ q value และ % remove ในการดูดซับตะกั่ว (Mean ± S.E.)	37
9	อายุเซลของสาหร่าย *Stigonema* ที่ต่างกันมีผลต่อ q value และ % remove ในการดูดซับตะกั่ว (Mean ± S.E.)	38
10	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	42
11	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	44
12	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	46
13	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	49
14	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่		หน้า
15	ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (Mean ± S.E.) ที่ระดับความเข้นข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5	52
16	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* สภาวะสมดุลที่ระยะระเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับ ที่ ระดับความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 5	55
17	ค่า K_1 คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว, K_2 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจนอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อกรัม)	56
18	ข้อมูล desorption ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* โดย 0.1 M EDTA, HNO_3 และ DI water ระยะเวลาในการดูดซับนาน 3 ชั่วโมง และ desorp นาน 3 ชั่วโมง	56
19	Desorption ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* โดย 0.1 M EDTA, HNO_3 และ DI water ระยะเวลาในการดูดซับนาน 3 ชั่วโมง และ desorp นาน 3 ชั่วโมง ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Mean ± S.E.)	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเจริญเติบโตของ *A. subcylindrica* ใน Synthetic medium กับ น้ำทิ้งของบริษัทผลิตโซดา El-Soda Company	5
2	การเจริญเติบโตของ *N. muscurum* ใน synthetic medium กับ น้ำทิ้งของบริษัทผลิตโซดา El-Soda Company	6
3	pH มีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *S. maxima*	7
4	ปริมาณตัวดูดซับทางชีวภาพมีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *S. maxima*	8
5	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *G. gelatinosa*	9
6	ช่วงเวลาในการดูดซับ Pb^{2+}, Cd^{2+} และ Hg^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis*	10
7	ระยะเวลาในการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* ซึ่งเลี้ยงในห้องทดลอง ชนิด capsulated	11
8	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของ *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulate ที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลอง	13
9	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Cu^{2+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) ดูดซับโดยสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated	15
10	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Fe^{3+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) ดูดซับโดยสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated	16
11	กลไกการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) แบบแลงค์เมียร์ (Langmuir) ของสาหร่าย *G. gelatinosa*	17
12	การบำบัด Zn^{2+} (A), Cu^{2+} (B) และ Pb^{2+} (C) ระหว่างเซล *Tolypothrix tenuis* ที่เป็น non-treated และ NaOH-treated cells	21
13	ผลของปฏิกิริยา esterification ในการบำบัดแคดเมียมของเซล *Tolypothrix tenuis* ที่ทรีทต์ด้วย NaOH	22
14	แนวโน้มการดูดซับตะกั่วต่อจำนวนเซลของสาหร่าย *Stigonema*	37
15	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	43
16	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่		หน้า
17	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	47
18	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	48
19	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	51
20	ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	53
21	Kinetics ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	54
22	กราฟกลไกการดูดซับตะกั่วแบบแลงเมียร์ของสาหร่าย*Stigonema*	55
23	ภาพถ่ายของ *Stigonema* อบแห้งนาน 24 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 10,000 เท่า	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เป็นมลพิษส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลพวงมาจากภาคอุตสาหกรรมน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนก่อให้เกิด ผลเสียต่อคุณภาพน้ำ และสะสมในห่วงโซ่อาหาร เป็นสารตกค้างอยู่ในสัตว์ที่มนุษย์นำมาบริโภค ปัจจุบันจึงมีการศึกษาถึงการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งชีวะบำบัดนับเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่างมาก

Stigonema เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue – green algae) จัดอยู่ในดิวิชัน Cyanophyta เป็นไซยาโนแบคทีเรียชนิดหนึ่งแพร่กระจายตามแหล่งน้ำจืด ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน มูลค่าต่ำ เราจึงทดลองใช้ *Stigonema* บำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น และศึกษาถึงปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของ *Stigonema* พีเอช, ปริมาณเซล, อายุเซล, ความเข้มข้น, ระยะเวลา ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้สัมพันธ์กับการศึกษา kinetic และ isotherm ซึ่งเกี่ยวกับ การเกิดปฏิกิริยาจนคงที่ และ กลไกการดูดซับทางกายภาพ สามารถวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในสารละลายได้หลังจากผ่านตัวดูดซับทางชีวภาพ

รายงานฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาและทดลองการบำบัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ *Stigonema* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้คาดหวังว่า *Stigonema* จะเป็นหนึ่งในตัวดูดซับที่มีส่วนช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการบำบัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ ของ *Stigonema sp*
2. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน และมีมูลค่าต่ำเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจเอกสาร

1. พิษของโลหะหนัก

โลหะหนักในสัตว์น้ำเป็นสารปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่ ความเจริญของประเทศทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและการส่งเสริมอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกที่ขาดแผนรองรับเรื่องผลกระทบที่จะตามมา การพัฒนาทางด้านการเกษตร การปศุสัตว์และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ น้ำทิ้งจากชุมชนเมือง เหล่านี้เป็นปัจจัยให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ สิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการปนเปื้อนของโลหะหนักซึ่งถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่นอุปกรณ์ผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย ทางด้านการเกษตร ใช้เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ทางด้านการแพทย์ใช้เป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ ดังนั้น การปนเปื้อนของโลหะหนักในสัตว์น้ำจึงเป็นสิ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งโลหะหนักจัดนับเป็นสารพิษที่มีอันตราย (http://www.fisheries.go.th/industry/news/)

1.1 สารพิษในอาหารจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม

1.1.1 สารพิษในอาหารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบได้ในพืชและสัตว์ต่างๆ ที่คนเรานำมาใช้บริโภคเป็นอาหาร จึงทำให้ได้รับสารพิษเหล่านี้ ได้แก่ สารต้านฤทธิ์สารอาหาร สารพิษที่เป็นส่วนประกอบของพืช สารพิษที่เป็นส่วนประกอบของสัตว์ สารพิษจากเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

1.1.2 สารพิษในอาหารที่มนุษย์เป็นผู้เติมลงไป หมายถึง สารพิษที่มีอยู่ ในอาหารเนื่องจากกรรมวิธีต่างๆ ที่มนุษย์ใช้ เช่น การใช้สารเคมีต่างๆ ในการป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ใช้ในการเก็บรักษาและถนอมอาหาร ใช้ในการปรุงแต่งกลิ่นรสและสีของอาหาร เช่น สารพิษตกค้างจากยาฆ่าแมลง สารพิษจากโลหะหนักต่างๆ สารพิษจากสีผสมอาหาร สารพิษจากสารให้รสหวาน พิษจากสารปรุงแต่งชูรสอาหาร

แร่ธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมีอยู่ประมาณ 106 ธาตุ เป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย ประมาณ 22 ธาตุ ซึ่งจะอยู่ในรูปของไอออน อนุมูล หรือสารประกอบอินทรีย์ บางธาตุร่างกายต้องการมากบางธาตุต้องการน้อยเพื่อทำหน้าที่เฉพาะบางอย่างภายในเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากร่างกายได้รับแร่ธาตุบางชนิดมากเกินพอก็อาจทำให้เกิดพิษได้ นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุกลุ่มโลหะหนัก ได้แก่ ปรอท (mercury) แคดเมียม (cadmium) ตะกั่ว (lead) และสารหนู (arsenic) ซึ่งจัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย

1.2 ความเป็นพิษของตะกั่ว

ตะกั่วจะไปยับยั้งการสังเคราะห์ธาตุเหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบของ hemoglobinในเม็ดเลือดแดง โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ธาตุเหล็ก เช่น δ-aminolevulinic acid (ALA) รบกวนการสังเคราะห์โปรตีนโกลบิน โดยจะเข้าไปจับกับหมู่ Thiols ในโมเลกุลของเอนไซม์ ซึ่งการวัดเอนไซม์ ALA dehydratase ในเลือดเพื่อตรวจหาปริมาณตะกั่ว พบว่า เมื่อมีระดับตะกั่วในร่างกายเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์ลดน้อยลง ตะกั่วเป็นสารพิษที่ทำให้เกิดโรคเรื้อรัง เพราะการดูดซึมตะกั่วเป็นไปอย่างช้ามาก การขับถ่ายออกจากร่างกายก็ช้าด้วย ตะกั่วถูกดูดซึมเข้าที่ลำไส้เล็ก และระบบทางเดินหายใจจากการสูดดม โดยจะสะสมที่ตับสูงกว่าที่อื่นๆ และสะสมไว้ที่กระดูกมากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณข้อต่อของกระดูก ปริมาณตะกั่วในเลือดของคนทั่วไปอยู่ในช่วง 0.001-0.09 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ส่วนใหญ่จะอยู่ในเม็ดเลือดแดง และยังพบในน้ำนมคนอีกด้วย หากได้รับตะกั่วเพิ่มมากขึ้นจะพบตะกั่วได้ในน้ำดี อาการพิษของตะกั่วจะเกิดขึ้นเมื่อในเลือดมีระดับตะกั่วสูงประมาณ 0.06-0.10 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ในคนปกติจะมีตะกั่วถูกขับออกมาทางปัสสาวะประมาณ 0.01-0.076 มิลลิกรัมต่อลิตร และในอุจจาระประมาณ 0.22-0.27 มิลลิกรัมต่อ 24 ชั่วโมง ตะกั่วจะออกฤทธิ์ที่หมู่ Thiols ที่เมมเบรน โดยเฉพาะที่ไต และระบบประสาทจะถูกทำลาย ยังมีผลทำให้การสังเคราะห์ ATP ที่ไมโตคอนเดรียลดลง การดูดซึมกลับของน้ำตาลที่ไตลดลง เม็ดเลือดแดงแตกมากขึ้น การสร้างฮีโมโกลบิน และเฮมาโตคริตลดลง เกิดภาวะโลหิตจางเนื่องจากเหล็กไม่สามารถนำไปรวมกับพอร์ไพรินเพื่อนำไปสร้างเฮมได้จึงมีเหล็กสะสมมากขึ้นเกิดภาวการณ์คั่งของเหล็กตามเนื้อเยื่อต่างๆ (http://techno.msu.ac.th/)

1.2.1 การปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร

ผลการวิเคราะห์ปลาทะเลในบริเวณที่ไม่มีปัญหาสิ่งแวดล้อมพบว่า มีตะกั่วประมาณ 0.3 ส่วนต่อพันล้านส่วน (ppb) ผักบริเวณที่ปลูกอยู่ใกล้แหล่งอุตสาหกรรมและถนนมีตะกั่วประมาณ 0.2-0.25 ส่วนต่อล้านส่วน (ppm) ซึ่งพืชผักที่อยู่ใกล้ถนนจะมีปริมาณตะกั่วมากกว่าพืชผักในชนบทประมาณ 100 เท่า สารตะกั่วที่สะสมอยู่ในร่างกายแบ่งออกเป็น 3 ส่วนอยู่ในกระแสเลือดและเนื้อเยื่อบางชนิด อยู่ในเนื้อเยื่อและจับกันอย่างหลวมๆ กับกระดูก และอยู่อย่างถาวรที่กระดูกโครงร่าง ซึ่งสามารถสะสมได้ 60-90% ของปริมาณทั้งหมดในร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 การดูดซึมตะกั่ว

1.2.2.1 รูปของสารประกอบตะกั่ว สารประกอบตะกั่วที่เป็นสารอินทรีย์จะดูดซึมได้ดี ในรูปสารอนินทรีย์ดูดซึมได้เพียง 5-10% เท่านั้น ร่างกายจะขับออกทางปัสสาวะ 75% และทางอุจจาระ 15%

1.2.2.2 ปัจจัยของอาหาร อาหารที่มีแคลเซียมต่ำจะเพิ่มการดูดซึมตะกั่ว หากร่างกายได้รับสังกะสีน้อยจะเพิ่มการดูดซึมตะกั่วเช่นเดียวกัน (http://techno.msu.ac.th/)

2. สารพัดวิธีในการบำบัดตะกั่ว

การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี โดยการ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 โมลต่อลิตรและสะเทินด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ระบบบำบัดนี้สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ครั้งละ 1.5 ลูกบาศก์เมตรใช้เวลาบำบัด คราวละ 5 ชั่วโมง โครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาและติดตามประสิทธิภาพการบำบัดและการวิเคราะห์น้ำทิ้งทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) การวิเคราะห์อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (DS) ค่า pH ค่า COD ปริมาณอิออนโลหะหนักซึ่งได้แก่ ตะกั่ว (Pb^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และ แมงกานีส (Mn^{2+}) พบว่าระบบบำบัดดังกล่าวสามารถบำบัดได้ด้วยดี โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (http://library.kmitnb.ac.th/projects/sci/IC/ic0053t.html)

การใช้สารสกัดจากเมล็ดมะรุมบำบัดน้ำเสีย สารสกัดจากเมล็ดมะรุมในน้ำเย็นสามารถกำจัดโลหะหนักบางชนิดคือ ตะกั่วและเหล็กในน้ำได้โดยสารสกัดจากเมล็ดมะรุม 300 g/น้ำเย็น 1500 cm^3 จำนวน 3 cm^3 สารกำจัดตะกั่วในสารละลายเลดทูไนเตรท 0.1% โดยมวล/ปริมาตร 5cm3 ได้หมดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมนอกจากนี้สารสกัดจากเมล็ดมะรุมในน้ำเย็นสามารถลดปริมาณ E coli ในน้ำได้ 20.76% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมและมีประสิทธิภาพภายในการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำได้เท่ากับสารส้ม ดังนั้นสารสกัดจากเมล็ดมะรุมจึงเป็นสารที่น่าสนในที่จะนำมาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น(http://elib.ipst.ac.th/elib)

การใช้ palm shell activated carbon บำบัดตะกั่ว ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากกะลาปาล์มนำมาบดและร่อนผ่านรูขนาด 0.8-1.0 *mm* มีลักษณะเป็นผง โดยจะสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้และนับว่าเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูง ที่พีเอช 5 ดูดซับ 95.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ราคายังต่ำอีกด้วย (Issabayeva *et al.*, 2005)

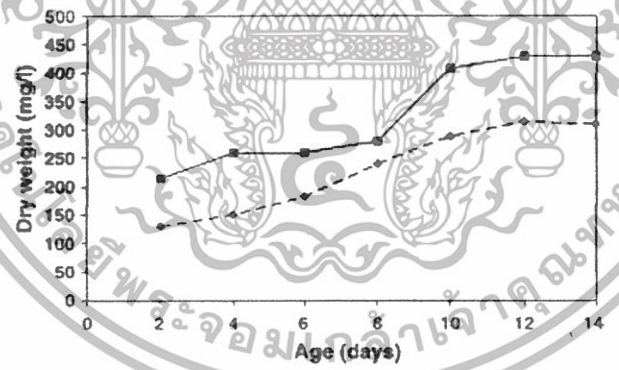
นอกจากนี้ แบคทีเรีย ยีสต์ รา และสาหร่าย สามารถเป็นตัวดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายได้ ไอออนโลหะหนักจะถูกเก็บไว้ ที่บริเวณผิวและภายในเซล ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำไปใช้ ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ (วัลภา และคณะ, 2543) *Sargassum sp.*, *Padina sp.*, *Ulva sp.* และ *Gracillaria sp.* ซึ่งเป็นสาหร่ายทะเลที่นำมาใช้เป็น biosorbent เช่นกัน (Sheng *et al.*, 2004)

3. ทำไมจึงเลือกใช้ไซยาโนแบคทีเรียในการบำบัด

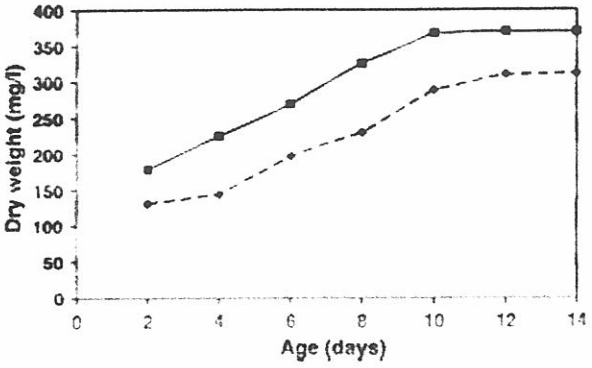
ประเด็นที่เป็นปัญหาในไทย คือ ภาคอุตสาหกรรม การที่น้ำเสียจากโรงงานมีสารตะกั่ว หรือ โลหะหนักชนิดอื่นปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งจะสะสมในห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์เรื้อรัง แหล่งน้ำจืดมักเป็นแหล่งที่ได้รับผลกระทบก่อน (Chen *et al.*, 2005) ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุในการเลือกไซยาโนแบคทีเรีย จากการศึกษาของ El-Sheekh *et al.* (2004) พบว่า *N. muscurum* และ *A. subcylindrica* ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย สามารถเจริญเติบโตได้ในแหล่งน้ำเสียจากโรงงานผลิตโซดา น่าจะเป็นแนวทางที่สามารถนำมาใช้จริงได้ ผนวกกับ Inthorn *et al.* (2001) รายงานว่า สภาพภูมิการในประเทศไทยนั้นจัดอยู่ในเขตร้อนและสาหร่ายจำพวกไซยาโนสามารถเติบโตได้ดี มีราคาถูกเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยสารเคมี นอกจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักที่สูงแล้ว ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



ภาพที่ 1 : การเจริญเติบโตของ *A. subcylindrica* ใน Synthetic medium (- - - -)
กับน้ำทิ้งของบริษัทผลิตโซดา El-Soda Company (——)

ที่มา : El-Sheekh *et al.* (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 : การเจริญเติบโตของ *N. muscurum* ในน้ำที่มี synthetic medium (- - - -)
กับน้ำทิ้งของบริษัทผลิตโซดา El-Soda Company (——)

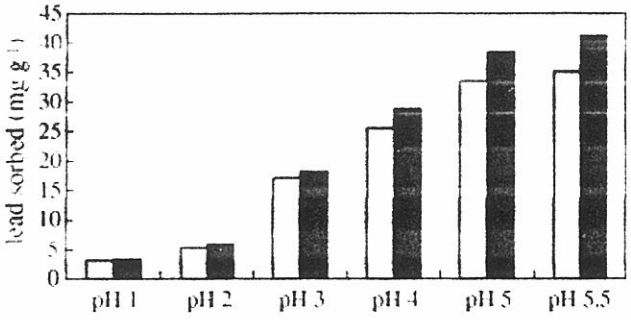
ที่มา : El-Sheekh *et al.* (2004)

4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับตะกั่ว และโลหะหนัก ชนิดอื่นๆ ของไซยาโนแบคทีเรีย

4.1 พีเอช

พีเอชของสารละลายมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากการศึกษาสาหร่ายสายพันธุ์ *S. maxima* ที่พีเอช ต่ำกว่า 2 การดูดซับไอออนตะกั่วลดลง เมื่อระดับพีเอชสูงขึ้นช่วง 2 - 5.5 การดูดซับสูงขึ้นตาม และมีการดูดซับไอออนตะกั่วสูงที่สุดที่ระดับพีเอช 5.5 (ภาพที่ 3) เพราะสารละลายที่มีพีเอชต่ำ พื้นที่ผิวของเซลที่ทำหน้าจะยึดติดกับไอออนของโลหะหนักจะยึดกับไฮโดรเจนไอออนแทน จึงไม่สามารถยึดกับไอออนที่มีประจุบวกอื่นๆ ได้ เมื่อพีเอชสูงขึ้น ลิแกนด์ (ส่วนที่ยึดกับไอออนของโลหะแล้วเกิดเป็นสารเชิงซ้อน) มีสภาพเป็นประจุลบเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การยึดจับกับไอออนบวกได้เพิ่มขึ้น (Gong *et al.*,2004) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Raungsomboon *et al.* (2006) ซึ่งทดลองกับสาหร่าย *G. gelatinosa* กลไกที่ทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของ CPS เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่า ค่า pKa (pKa ของ carboxyl group คือ 2.9-3.4) จะทำให้ carboxyl group อยู่ในรูป (COO^-) ทำให้สามารถจับ Pb^{2+} ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



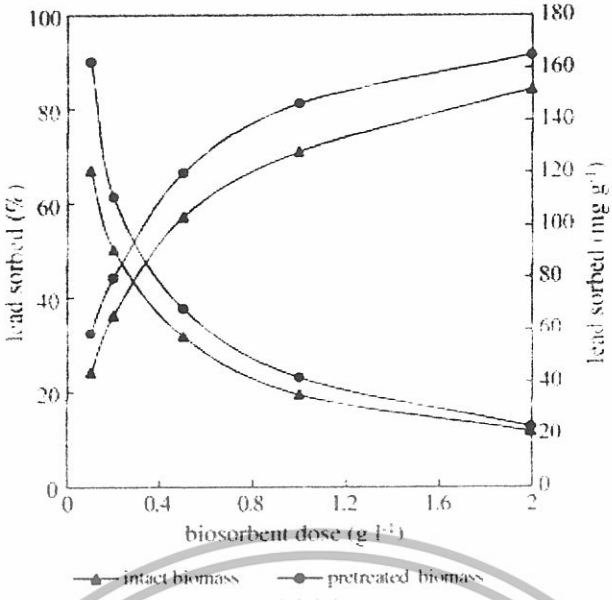
ภาพที่ 3 : พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *S. maxima* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ; ตัวดูดซับทางชีวภาพ 1 กรัมต่อลิตร ; ระยะเวลา 180 นาที) คอลัมน์สีขาวแทน intact biomass (สาหร่ายที่ไม่ได้ทรีทต์ด้วย $CaCl_2$) ขณะที่ คอลัมน์สีดำ แทน pretreated biomass (สาหร่ายที่ผ่านการทรีทต์ด้วย สารละลาย $CaCl_2$ 0.2 โมลาร์ และเขย่าช้าๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และล้างออกด้วยน้ำ DI หลายๆครั้ง ซึ่งจะล้างแคลเซียมไอออนออกจากสาหร่าย)

ที่มา : Gong *et al.* (2004)

4.2 ปริมาณตัวดูดซับ

อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับทางชีวภาพ ในการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *S. maxima* พบว่า เมื่อปริมาณของตัวดูดซับทางชีวภาพเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพในการดูดซับกลับลดลง เมื่อปริมาณของตัวดูดซับทางชีวภาพเพิ่มขึ้น ภาพที่ 4 เมื่อปริมาณของตัวดูดซับทางชีวภาพเพิ่มขึ้น ช่วง 0.1 - 2.0 กรัมต่อลิตร เปอร์เซ็นการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น 24 – 84 เปอร์เซ็น เป็น intact biomass และจาก 32 – 92 เปอร์เซ็น เป็น pretreated biomass แต่ประสิทธิภาพการดูดซับกลับลดลง 121 – 21 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 162 – 23 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาเหตุดังกล่าวอาจเป็นเพราะเมื่อความหนาแน่นของปริมาณเซลเพิ่มขึ้นจะทำให้รบกวนการยึดเกาะของไอออน เนื่องจากพื้นที่ ที่มีโอกาสที่ไอออนจะเข้ายึดเกาะลดลง (Gong *et al.*, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4 : อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับทางชีวภาพ (biosorbent dose) ในการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *S. maxima* (สาระลายตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที พีเอช 5.5

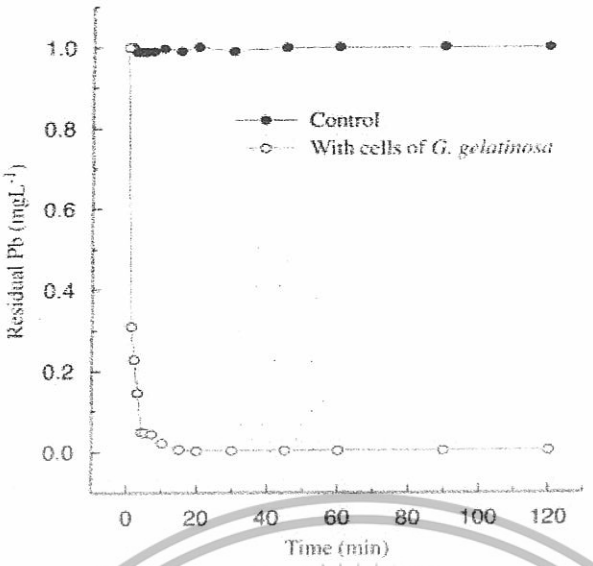
ที่มา : Gong *et al.* (2004)

4.3 ระยะเวลา

เมื่อตัวดูดซับทางชีวภาพอยู่ในน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักระยะเวลาที่อยู่ในน้ำนั้น ส่งผลต่อปริมานการลดต่ำลงของไอออนโลหะนั้นๆ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มโอกาสให้การยึดเกาะระหว่าง ลิแกนด์ กับ ไอออนโลหะ ระยะเวลาเป็นปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา kinetic (Singh et al., 1997)

Raungsomboon *et al.* (2006) พบว่า สาหร่าย *G. gelatinosa* ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่สารละลายตะกั่วเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4 สามารถดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่า 95.3 เปอร์เซ็นในระยะเวลาเพียง 5 นาที หลังจากนั้นเข้าสู่สภาวะสมดุล หลังจาก 120 นาที มีไอออนตะกั่วที่ตกค้างอยู่ในสารละลาย 2.26 ไมโครกรัมต่อลิตร และ ในกลุ่มควบคุมตกค้างอยู่ในสารละลาย 998.10 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *G. gelatinosa* 0.1 กรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร, ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกันต่อลิตร ที่พีเอช 4 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

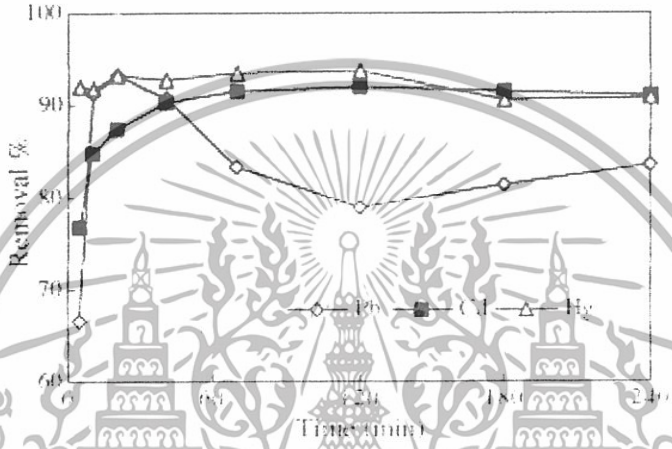
ที่มา : Raungsomboon *et al.* (2006)

4.3.1 kinetics

การศึกษา kinetic ของสาหร่าย *M. aeruginosa* ในการดูดซับตะกั่ว, แคดเมียม และปรอท (ภาพที่ 6) มีการดูดซับ Cd^{2+} อย่างรวดเร็วภายใน 10 นาทีแรก และ ค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงที่หลังจาก 40 นาที ของการดูดซับ การดูดซับ Hg^{2+} เกิดขึ้นรวดเร็วกว่า Cd^{2+} มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Hg^{2+} สูง หลังจาก 5 นาที แรกของการดูดซับ การดูดซับก็ค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับ Hg^{2+} จนถึงสภาพอิ่มตัวเป็นช่วงสั้นเพียง 5 นาที ในการดูดซับ Pb^{2+} มีการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งสูงสุดภายใน 20นาทีแรก หลังจากนั้น กลับพบว่า การดูดซับลดลงจนกระทั่งนาทีที่ 120 และค่อยๆ เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงในการดูดซับ Pb^{2+} ที่ไม่แน่นอนนี้อธิบายได้ว่า viscous nature ซึ่งเป็นคุณสมบัติความหนืดอย่างหนึ่งของแคปซูลของสาหร่าย *Microcystis* เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะต่ำ ความหนืดของแคปซูลจะเพิ่มขึ้น และตรงกันข้าม เมื่อไอออนชนิดเดียวกันมีความเข้มข้นสูงขึ้น จะเหนี่ยวนำให้ความหนืดของแคปซูลลดลง อย่างไรก็ตามเหตุผลดังกล่าวไม่สามารถใช้อธิบายในการทดลองการดูดซับ Cd^{2+} และ Hg^{2+} ของ *M. aeruginosa* ในครั้งนี้ได้ (Chen *et al.*, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

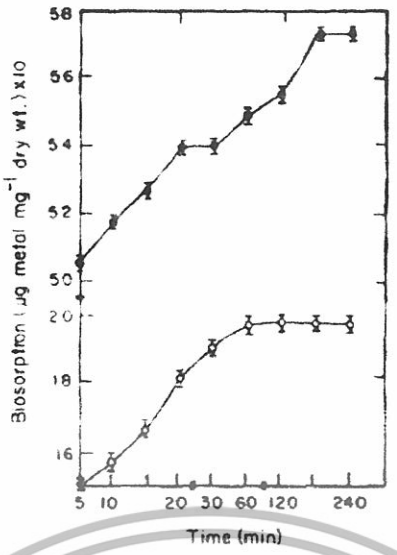
ส่วนการดูดซับโลหะอื่นๆ (ภาพที่ 7) Singh *et al.* (1997) ศึกษาการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* พบว่า การดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสูงสุดจนกระทั่งอิ่มตัว หลังจาก 60 นาทีแรกของการดูดซับเข้าสู่สภาพสมดุล อย่างไรก็ตามการดูดซับเหล็ก (Fe^{3+}) แตกต่างจากการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) เนื่องจาก curve ของการดูดซับเหล็ก (Fe^{3+}) นั้นไม่ต่อเนื่องแต่มีลักษณะเพิ่มเป็นขั้นๆ การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก่อน 20 นาที มีลักษณะอิ่มตัวในช่วงสั้นเพียง 10 นาที เกิดการดูดซับต่อจนกระทั่งนาทีที่ 180 จึงอิ่มตัว



ภาพที่ 6 : ช่วงเวลาในกระบวนการดูดซับ Pb^{2+}, Cd^{2+} และ Hg^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis aeruginosa*

ที่มา : Chen *et al.* (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7 : ระยะเวลาในการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated ซึ่งเลี้ยงในห้องทดลอง ปริมาณเซลสาหร่าย 80 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร โดย ● แทน Fe^{3+} เข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ; ○ แทน Cu^{2+} เข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

ที่มา : Singh *et al.* (1997)

4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะ

Singh *et al.* (1997) ได้ศึกษาพบว่า การดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} โดยสาหร่าย *Microcystis* สามารถนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงค์เมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) ได้

แบบจำลองของแลงค์เมียร์ (Langmuir)

$$C/Q = K_1/K_2 + C/K_2$$

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

Q = ความสามารถในการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)

K_1 = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

K_2 = ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของฟรุนดิช (Freundlich)

$$\log x/m = \log K_f + 1/n \log C$$

K_f = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)

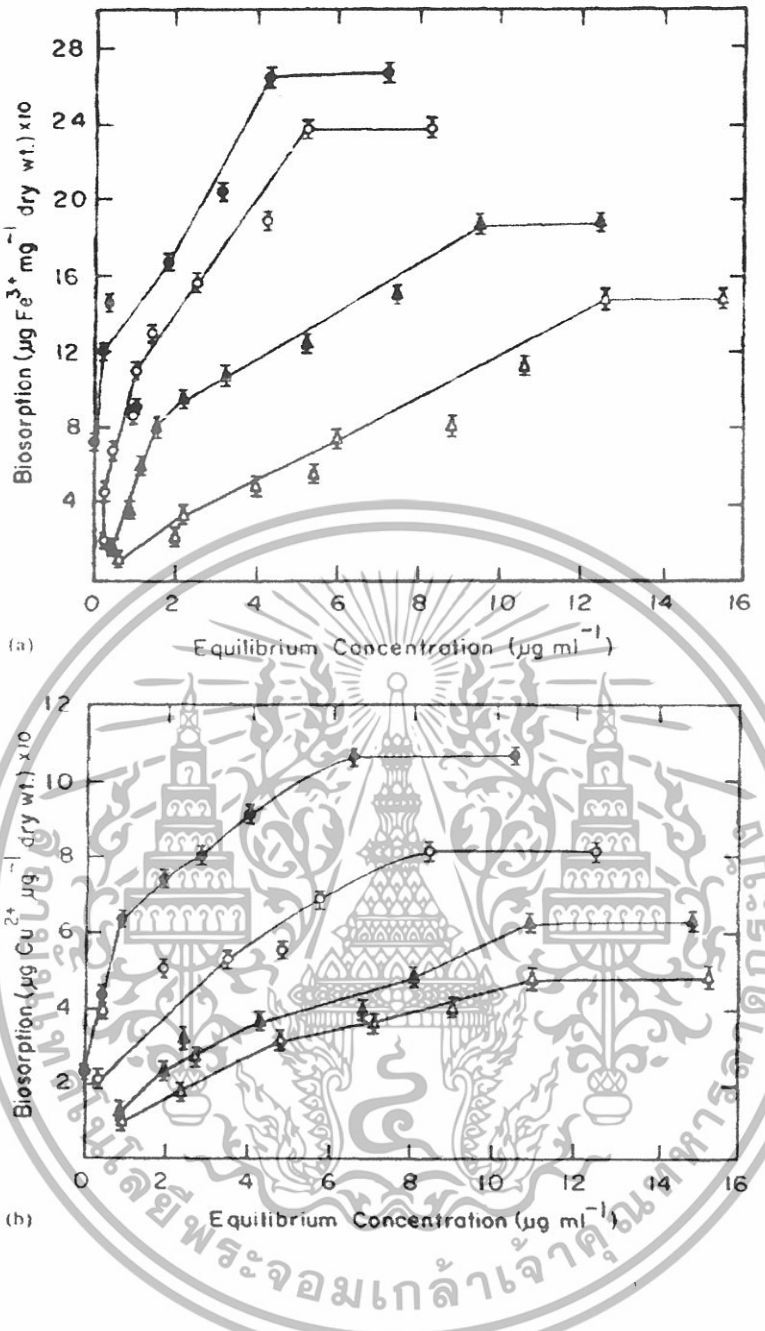
n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

x/m = ความสามารถในการดูดซับ (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)

โดยศึกษาการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated ซึ่งเก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลอง จากการศึกษาการดูดซับ Fe^{3+} พบว่า *Microcystis* ชนิด capsulated ที่เก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลอง มีค่า C เท่ากับ 4.36, 5.33 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และชนิด decapsulated ที่เก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลอง มีค่า C เท่ากับ 9.42, 12.64 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับของทั้ง 4 ชนิด 265.77, 239.65, 188.50 และ148.21 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 8a) ซึ่งทดลองในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 2-30 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีการเปรียบเทียบพบว่าชนิด capsulated ที่เก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลองสามารถดูดซับได้สูงกว่าชนิด decapsulated 29 และ 38 เปอร์เซ็น ชนิด capsulated แบบที่เก็บจากธรรมชาติสามารถดูดซับได้ดีกว่าแบบเลี้ยงในห้องทดลอง 10 เปอร์เซ็น

จากการศึกษาการดูดซับ Cu^{2+} พบว่า *Microcystis* ชนิด capsulated ที่เก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลอง มีค่า C เท่ากับ 6.508, 8.412 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และชนิด decapsulated ที่เก็บจากธรรมชาติและเลี้ยงในห้องทดลอง มีค่า C เท่ากับ 10.930, 11.340 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของทั้ง 4 ชนิด เท่ากับ 106.68, 82.85, 53.78 และ 48.66 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 8b) ซึ่งทดลองในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 2-20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ไม่สามารถประเมินความแตกต่างได้สำหรับ ชนิด decapsulated ส่วนชนิด ชนิด capsulated ที่เลี้ยงในห้องทดลองสามารถดูดซับ Cu^{2+} น้อยกว่าแบบที่เก็บจากธรรมชาติ 22 เปอร์เซ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8 : (a) แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับ Fe^{3+} ของ *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulate ที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลอง (b) แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับ Cu^{2+} ของ *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulate ที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลอง ปริมาณสาหร่าย 80 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร, Fe^{3+} และ Cu^{2+} ความเข้มข้น 2 – 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ● Capsulated เก็บจากธรรมชาติ ○ Capsulated เลี้ยงในห้องทดลอง ▲ decapsulated เก็บจากธรรมชาติ △ decapsulated เลี้ยงในห้องทดลอง

ที่มา : Singh *et al*. (1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับ Cu^{2+} มาหาค่าสมการฟรุนดิช (Freundlich) และสมการแลงค์เมียร์ (Langmuir) ตารางที่ 1 ข้อมูลการดูดซับ Fe^{3+} มาหาค่าสมการฟรุนดิช (Freundlich) และสมการแลงค์เมียร์ (Langmuir) ตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าการดูดซับ Fe^{3+}และ Cu^{2+}ของ *Microcystis* ชนิด capsulated ทั้งแบบที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลองมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะดีกว่า ชนิด decapsulate (ภาพที่ 9 และ ภาพที่ 10) นอกจากนั้นค่า R^2 ของกลไกการดูดซับ Cu^{2+}แบบแลงค์เมียร์ พบว่ามีค่าน้อยมากทุกทรีทเมนต์ ซึ่งสามารถบอกถึงอิทธิพลการดูดซับว่า ในการดูดซับ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* นี้เป็นไปตามกลไกการดูดซับแบบฟรุนดิช มากกว่า (Singh *et al.*, 1997)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับ Cu^{2+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) และแบบแลงค์เมียร์ (Langmuir)

	Freundlich			Langmuir		
condition	K_f	n	R^2	K_1	K_2	R^2
capsulated (field)	1.761	3.164	0.977	1.333	125.000	0.203
capsulated (lab)	1.569	2.940	0.943	0.454	100.000	0.012
decapsulated (field)	1.236	2.136	0.928	0.280	71.428	0.111
decapsulated (lab)	1.106	1.897	0.947	0.197	66.666	0.018

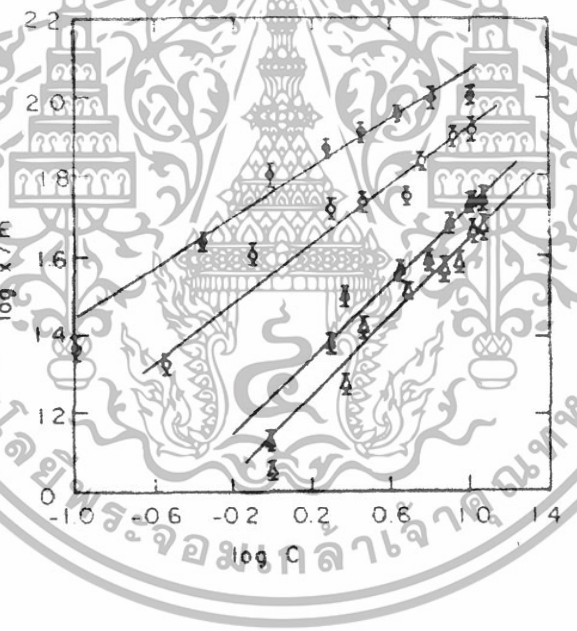
ที่มา : Singh *et al.* (1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับ Fe^{3+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) และแบบแลงค์เมียร์ (Langmuir)

	Freundlich			Langmuir		
condition	K_1	n	R^2	K_1	K_2	R^2
capsulated (field)	2.161	3.676	0.727	3.003	333.333	0.935
capsulated (lab)	1.976	2.118	0.849	0.500	333.333	0.954
decapsulated (field)	1.675	1.814	0.930	0.055	32.258	0.370
decapsulated (lab)	1.092	1.135	0.969	0.041	28.571	0.263

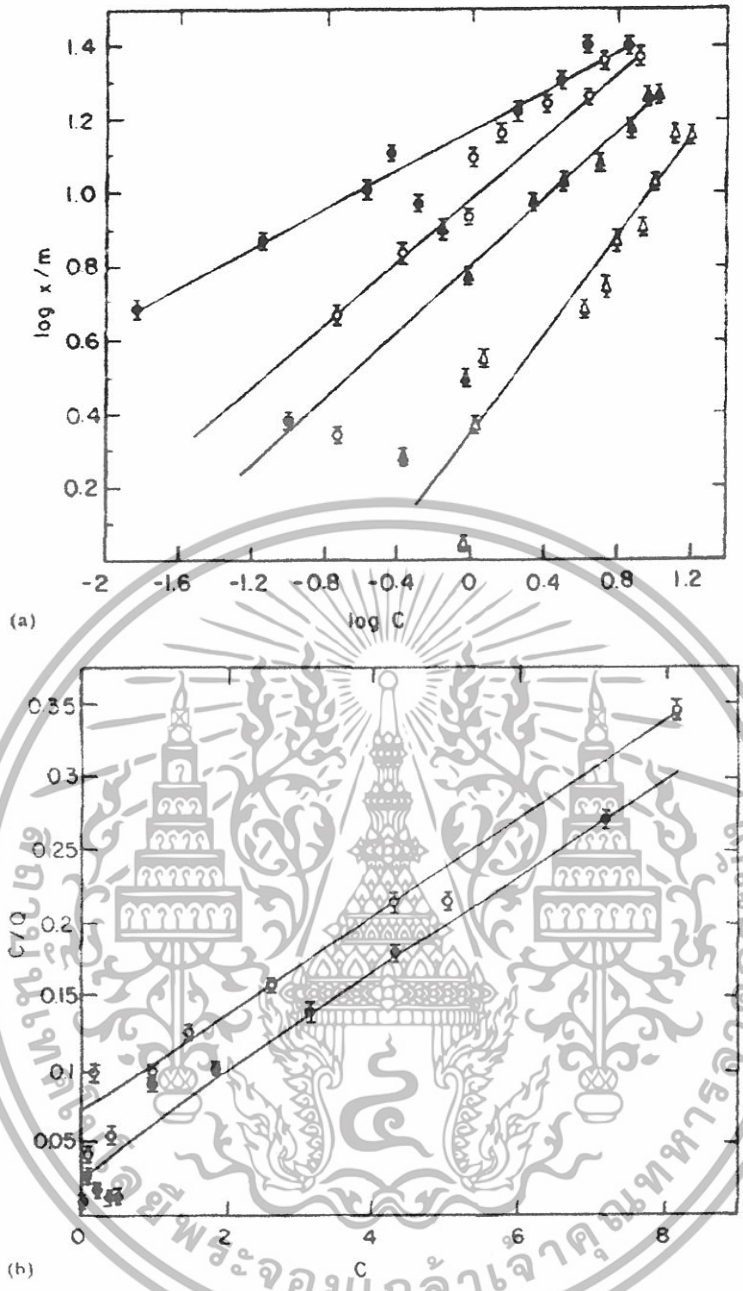
ที่มา : Singh *et al.* (1997)



ภาพที่ 9 : ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Cu^{2+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) ถูกดูดซับโดยสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated ทั้งแบบที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลอง ซึ่งเหมือนกับภาพที่ 8

ที่มา : Singh *et al.* (1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



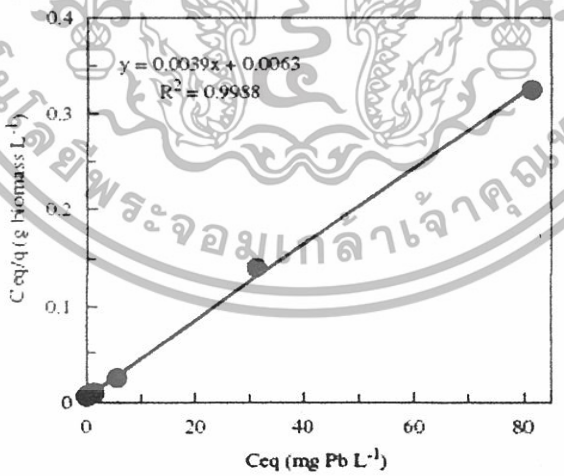
ภาพที่ 10 : (a) ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Fe^{3+} แบบฟรุนดิช (Freundlich) ถูกดูดซับโดยสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated ทั้งแบบที่เก็บจากธรรมชาติ และเลี้ยงในห้องทดลอง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับภาพที่ 8 (b) ไอโซเทอร์มการดูดซับ Fe^{3+} แบบแลงค์เมียร์ ถูกดูดซับโดยสาหร่าย *Microcystis* ชนิด capsulated และ decapsulated ทั้งแบบที่เก็บจากธรรมชาติ และ เลี้ยงในห้องทดลอง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับในภาพที่ 8

ที่มา : Singh *et al.* (1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) Raungsomboon *et al.* (2006) ได้ศึกษาในสาหร่าย *G. gelatinosa* พบว่า เป็นกลไกการดูดซับแบบแลงค์เมียร์ สังเกตจากค่า R^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบฟรุนดิช 0.9988 และ 0.8551 ตามลำดับ ดังนั้นลักษณะการดูดซับ Pb^{2+} โดยไซยาโนแบคทีเรียเป็นแบบชั้นเดียวของแลงค์เมียร์ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 256.41 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในเซลของสาหร่าย *G. gelatinosa* ปกคลุมด้วย Mucilage sheets (CPS) ที่หนา ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นกลไกในการดูดซับ Pb^{2+} ของพวกไซยาโนแบคทีเรีย มีการเปรียบเทียบกันระหว่างเซลที่มี CPS กับ ไม่มี พบว่า ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 8.59 $\pm$ 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 92.06 เปอร์เซ็น และ 1.50 $\pm$ 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 16.3 เปอร์เซ็น ตามลำดับ ซึ่งการดูดซับ Pb^{2+} ของเซลที่มี CPS มีประสิทธิภาพเหนือกว่าไม่มี CPS มากถึง 5.7 เท่า นอกจากนี้เมื่อนำสารสกัด CPS มาบำบัด Pb^{2+} พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 82.22 $\pm$ 4.82 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า CPS ในสาหร่าย *G. gelatinosa* เพียงอย่างเดียวที่มีผลในการบำบัด Pb^{2+} ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปราศจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของไซยาโนแบคทีเรียซึ่งเป็นสมมุติฐานหนึ่งที่ว่า CPS ในสาหร่าย *G. gelatinosa* มีบทบาทสำคัญในการบำบัดตะกั่ว ในการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยใช้สาหร่าย *Spirulina maxima* ตารางที่ 3 พบว่าเป็นแบบฟรุนดิช และมีค่า *K* ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับพบว่า Pretreated biomass มีสูงที่สุด 8.11 (Gong *et al.*, 2004)



ภาพที่ 11 : กลไกการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) แบบแลงค์เมียร์ของสาหร่าย *G. gelatinosa* ที่พีเอช 4, 25 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ 0.1 กรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร, ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (Pb^{2+}) เริ่มต้น 1-120 มิลลิกรัมต่อลิตร, n = 7

ที่มา : Raungsomboon *et al.* (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
99430

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าคงที่ของฟรุนดิช และ R^2 ในการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+})

Type of biomass	Freundlich constant and coefficient			Reference
	K	$1/n$	R^2	
Intact biomass	**4.97**	**0.72**	**0.9852**	**This work**
Pretreated biomass	8.11	0.76	0.9928	This work
Aspergillus niger	**1.69**	**0.39**	**0.93**	**Wang et al., 2001**
Saccharomyces cerevisiae	1.072	0.33	0.9479	Ferraz and Teixeira, 1999

ที่มา : Gong *et al.* (2004)

5. Desorption

Raungsomboon *et al.* (2006) ได้ศึกษาการล้างการดูดซับ (desorp) ตะกั่ว (Pb^{2+}) ออกจากเซลของสาหร่าย *G. gelatinosa* โดยใช้ EDTA ซึ่งเป็นตัวล้างที่ได้ผลดี แบ่งระยะเวลาที่ทดลองล้างเซลด้วย EDTA เป็น 60 นาที และ 24 ชั่วโมง ซึ่งเปรียบเทียบกับการล้างด้วย Milli-Q water ซึ่งสามารถล้าง Pb^{2+} ได้เล็กน้อย น้อยกว่า 1.5 เปอร์เซ็นของที่ดูดซับไว้ ตรงกันข้ามกับการล้างด้วย EDTA สามารถล้างได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นในเบื้องต้นที่เพิ่มเซลลงไปใน Pb^{2+} สามารถสรุปได้ว่า Pb^{2+} จะจับกับหมู่ฟังก์ชันของเซลไซยาโนแบคทีเรียซึ่งมีความซับซ้อนไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ และจากการทดลองในช่วงระยะเวลาที่กำหนด (60 นาที และ 24 ชั่วโมง) ไม่สามารถล้าง Pb^{2+} ออกจากเซลได้ทั้งหมดโดยใช้ EDTA สาเหตุที่ไม่สามารถล้างออกได้ทั้งหมดอาจจะเป็นเพราะมีการดูดซับเข้าสู่ภายในเซล หรือยึดจับด้วยพันธะที่แข็งแรงบริเวณผิวเซล การดูดซับนั้นเกิดอย่างรวดเร็วในและเข้าสู่สภาวะสมดุลช่วง 30 นาที ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพอาจเกิดขึ้นก่อนนาทีที่ 30 หลังจากนั้นมีการดูดซับ Pb^{2+} ผ่านเซลเมมเบรนเข้าสู่ด้านใน นอกจากนี้อาจเป็นเพราะระยะเวลาในการล้างที่อาจจะสั้นไปจึงทำให้ไม่สามารถล้าง Pb^{2+} ออกจากเซลได้ทั้งหมด และเมื่อสังเกตการณ์ล้างครั้งที่ 3 พบว่าตัวเลขยังค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับครั้งที่ 1 และ 2 เป็นไปได้ว่า Pb^{2+} ยึดกับบริเวณผิวเซลด้วยพันธะที่แข็งแรง ถ้าหากเพิ่มระยะเวลาจะทำให้สามารถล้างตะกั่ว (Pb^{2+}) ออกจากเซลได้เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4)

นอกจากการล้างการดูดซับ (desorp) ตะกั่ว (Pb^{2+}) ด้วย EDTA แล้วยังมีการล้างด้วยสารชนิดอื่นอีก Gong *et al.* (2004) ได้ศึกษา การล้าง Pb^{2+} เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย HCl, HNO_3, EDTA และ Citric acid ซึ่งมีระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที และระยะเวลาในการล้าง 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพในการล้างประมาณ 90 เปอร์เซ็นของ HNO_3และ EDTA แต่เมื่อทดสอบทางสถิติกลับพบว่า HCl, HNO_3และ EDTA สามารถล้าง Pb^{2+} ได้อย่างไม่แตกต่างทางสถิติ และล้าง Pb^{2+} ได้ดีกว่า Citric acid อย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 การล้างการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) ออกจากเซลของสาหร่าย *G. gelatinosa* โดยใช้ EDTA (Mean ± SE) ทดลอง 3 ซ้ำ

Table 1 – Desorption of Pb from the loaded *G. gelatinosa* biomass by EDTA (mean ± SE of three replicate)

Exposure time of loaded biomass	Pb on loaded biomass (μg)	Desorbing agent	Pb desorbed (μg)			Total Pb desorbed (μg)
			First desorption	Second desorption	Third desorption	
60 min	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 h	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 : Raungsomboon *et al.* (2006)

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพในการล้าง (desorp) ตะกั่ว (Pb^{2+}) ด้วยสารต่างชนิดกัน ในสารละลายตะกั่ว (Pb^{2+}) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ; ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ; ระยะเวลาของการดูดซับ 180 นาที ; ระยะเวลาการล้างตัวดูดซับ 60 นาที เมื่อ *P* เท่ากับ 0.05

Type of biomass	Lead desorbed (%)			
	HCl (1.00[a])	HNO_3 (1.00[a])	EDTA (4.53[a])	Citric acid (1.84[a])
Intact biomass	85	92	91	75[a]
Pretreated biomass	89	93	91	81[a]

ที่มา : Gong *et al.* (2004)

6. การพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพในตัวดูดซับทางชีวภาพ

Nagase *et al.* (2005) ได้กล่าวว่า ผิวน้ำและน้ำใต้ดินในประเทศเขตร้อน ส่วนมากเป็นน้ำกระด้าง 3.6 mM ของ Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} หรือไม่ก็สูงกว่านั้น แม้ว่าไอออนนั้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับ Cd^{2+} ของเซลสดของ *Tolypothrix tenuis* ลดลง การดูดซับ Cd^{2+} ในน้ำที่มี Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} มากกว่า 4 mM ก็เป็นผลสำเร็จโดยทรีทต์เซลด้วย NaOH 0.1 M ในการศึกษาการดูดซับ Cd^{2+} โดยทรีทต์เซลด้วย NaOH บ่งบอกถึงลักษณะความเหมาะสมในการบำบัดของโลหะหนักตัวอื่นๆที่เป็น bivalent ซึ่งมีการสืบหาเหตุผลจนเป็นที่แน่ใจว่า การใช้ NaOH ทรีทต์เซลสาหร่ายเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการบำบัดโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติ

ขณะที่ การพิจารณาประยุกต์การใช้ได้จริงของเทคนิคนี้ในประเทศเขตร้อนพวกเราประเมินผลของ NaOH treatment ในการดูดซับโลหะหนักใน cyanobacteria อื่น *Anabaena variabilis* และ *Microcystis aeruginosa* ซึ่งพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำ และสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายในพื้นที่เขตร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

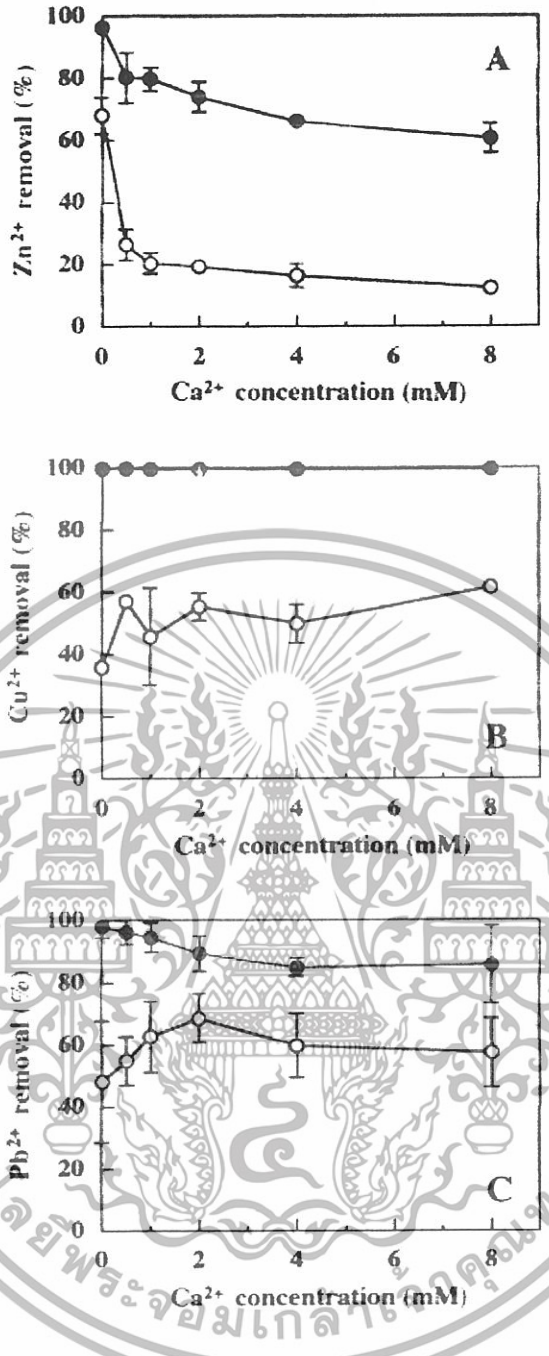
การดูดซับที่เฉพาะเจาะจงอย่างสูงของไอออนโลหะหลักยอมรับว่าการทรีทต์เซลด้วย NaOH สามารถใช้ได้จริงและประยุกต์ให้เหมาะสม ดังนั้นเราศึกษาการดูดซับของโ,หะหนักที่เป็น bivalent อื่นๆ เช่น Zn^{2+}, Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในสภาพที่มี Ca^{2+} เซล *Tolypothrix tenuis* ที่ทรีทต์ด้วย NaOH แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในดูดซับ Zn^{2+}, Cu^{2+} และ Pb^{2+} สูงมากๆ ในสภาพที่มี Ca^{2+} อยู่ในสภาพที่มีความเข้มข้นเท่ากับน้ำกระด้าง (ภาพที่ 12) ความสามารถในการดูดซับของทั้งเซลที่เป็น NaOH – treated และ non-treated สามารถดูดซับ Zn^{2+}, Cu^{2+} และ Pb^{2+} ได้สูงกว่า Cd^{2+} โดยเฉพาะความสามารถในการดูดซับ Cu^{2+} และ Pb^{2+} แทบไม่ลดลงในสภาพที่มี Ca^{2+} เข้มข้น 8 mM ในทั้งเซล 2 ชนิด คือ non-treated กับ NaOH – treated

สรุปได้ว่าตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของ *Tolypothrix tenuis* ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักไม่เพียงเฉพาะ Cd^{2+} แต่ยังรวม Zn^{2+}, Cu^{2+} และ Pb^{2+}

หมู่ฟังก์ชันนอลใดมีส่วนร่วมในการดูดซับโลหะหนักทำให้มีลักษณะเป็นประจุบวกโดยเซลที่ทรีทต์ NaOH ถูกพิจารณาโดยไตเตรตด้วย HCl ได้บรรยายไว้แล้วกรด 3 ชนิด ค่า pKa เป็น 4.4 , 5.5 และ 6.35 ค่า pKa 4.4 คิดว่า พื้นที่ จะเป็นหมู่คาร์บอกซิล จำนวนของการดูดซับ Cd^{2+} จะลดลงโดยขบวนการ esterification ของหมู่คาร์บอกซิล (ภาพที่ 13) ผลของขบวนการ esterification ของหมู่คาร์บอนบอซิลในเซลที่ทรีทต์ NaOH ต่อการดูดซับ Cd^{2+} ในสภาพที่มี Ca^{2+} ขบวนการ esterification ของหมู่คาร์บอกซิลจะใช้ methanol เป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรด การบำบัด Cd^{2+} เห็นได้ชัดว่าลดลงเมื่อมี methanol และ HCl ในการเปรียบเทียบ กับ treatment ที่มีแต่ methanol อย่างเดียว เมื่อเซลที่มีสภาพเป็น เอสเตอร์ถูกไฮโดรไลซิส ความสามารถในการบำบัด cd^{2+} จะกลับคืนมา

สรุปได้ว่าส่วนใหญ่หมู่คาร์บอกซิลจะจับ Cd^{2+} ในเซลที่ผ่านการทรีทต์ NaOH นอกจากการทรีทต์ด้วย NaOH Gong *et al.* (2004) ได้ศึกษาโดยทรีทต์เซลสาหร่าย *S. maxima* ด้วย $CaCl_2$ ซึ่งเปรียบระหว่าง intact biomass (สาหร่ายที่ไม่ได้ทรีทต์ด้วย $CaCl_2$) กับ pretreated biomass (สาหร่ายที่ผ่านการทรีทต์ด้วย สารละลาย $CaCl_2$ 0.2 โมลาร์ และเขย่าช้าๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และล้างออกด้วยน้ำ DI หลายๆครั้ง ซึ่งจะล้างแคลเซียมไอออนออกจากสาหร่าย) ซึ่งการศึกษานี้พบว่า pretreated biomass มีประสิทธิภาพสูงกว่า intact biomass (ภาพที่ 3, ภาพที่ 4 และตารางที่ 3)

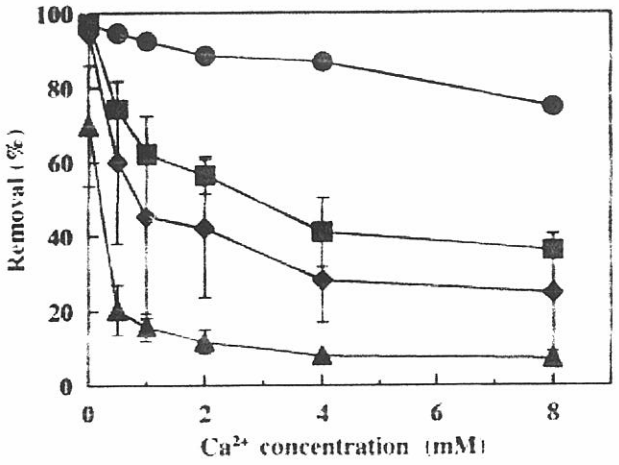
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 12 การบำบัด Zn^{2+} (A), Cu^{2+} (B) และ Pb^{2+} (C) ระหว่างเซล *Tolypothrix tenuis* ที่เป็น non-treated และ NaOH-treated cells. Non-treated (วงกลมเปิด) และ NaOH-treated (วงกลมปิด) เซลถูก incubated ในสารละลายโลหะหนัก10 ไมโครโมลาร์ ที่สภาพความเข้นข้นของ Ca^{2+} ต่างๆนาน 30 นาที

ที่มา : Nagase *et al.* (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 13 ผลของปฏิกิริยา esterification ในการบำบัดแคดเมียมของเซล *Tolypothrix tenuis* ที่ทรีทต์ด้วย NaOH แล้ว Non-treated (วงกลม), esterified (สามเหลี่ยม), esterified ที่ถูก hydrolyzed (สี่เหลี่ยม) และ methanol-treated (ข้าวหลามตัด)เซลถูกincubate ในสารละลายแคดเมียม 10 ไมโครโมลาร์ ในสภาพที่มีความเข้นของ Ca^{2+} ต่างกัน นาน 30 *min* ที่ 25 °C

ที่มา : Nagase *et al.* (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)
2. Magnetic stirer
3. pH meter
4. ขวดน้ำเกลือ
5. Volumetric pipette
6. หลอดทดลอง
7. กระชอนกรองสาหร่าย
8. ผ้ากรอง
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
10. นาฬิกาจับเวลา
11. สำลี
12. กระดาษฟอย
13. Rack
14. Shaker
15. dropper
16. สายออกซิเจน
17. Syringe
18. Hot air oven
19. เครื่องชั่งสาร
20. ช้อนตักสาร
21. Erlenmeyer flask
22. Volumetric flask
23. Pipette
24. Micropipette
25. Beaker
26. Cylinder
27. แท่งแก้วคนสาร
28. Vortex mixer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี

1. $Pb(NO_3)_2$
2. 0.1 M HNO_3
3. 0.1 M EDTA
4. DI water
5. 10% NaOH
6. ปุ๋ยสูตร Blue green 11 medium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการ

1. แผนการทดลอง

1.1 เตรียมบลูมสาหร่ายก่อนการทดลอง 2 อาทิตย์ ขั้นต่ำ 1.6 ลิตร หรือ 2 ขวดน้ำเกลือ โดยใช้ปุ๋ยสูตร Blue-Green (BG) -11 medium

1.2 ดำเนินงานตามขั้นตอน และวิธีทำที่กำหนด โดยจะทดลองตามลำดับดังนี้

1) ทดลองเรื่อง pH ที่ระดับ 3, 4, 5, 6, 7 โดยในการทดลองนี้จะใช้สาหร่ายชนิด คือ *Fischerella* และ *Stigonema*

2) ทดลองเรื่องปริมาณเซล 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 กรัม ในสารละลาย 30 มิลลิลิตร ของ *Stigonema*

3) ทดลองเรื่องอายุเซล 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ ของ *Stigonema*

4) ทดลองเรื่องความเข้มข้นสารละลายตะกั่วที่ 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง หลังจากเริ่มดูดซับ

5) ทดลองเรื่องการล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับ โดยใช้ DI water, 0.1M EDTA และ 0.1M HNO_3 เป็นตัวล้าง

6) ศึกษาความแตกต่างระหว่างพื้นที่ผิวของ *Stigonema* ที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว กับ ไม่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

วิธีการทดลอง

1. ทดลองเรื่อง pH ที่ระดับ 3, 4, 5, 6, 7 ใช้สาหร่าย 2 ชนิด คือ *Fischerella* และ *Stigonema* การทดลองนี้ทำ treatment ละ 3 ครั้ง โดยทำทีละชนิด

1.1 *Fischerella*

1.1.1 เตรียมน้ำ DI ปรับ pH ให้เป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 โดยที่ระดับ pH ละ 300 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

1.1.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน

1.1.3 กรอง *Fischerella* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ใส่ไว้ในบีกเกอร์

1.1.4 ชั่งสาหร่าย 0.3 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ทั้งหมด 15 ขวด เลเบลให้เรียบร้อย และ เพิ่มขวดชมพู่อีก 3 ขวดในแต่ละ treatment ทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่เซลสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.5 เทสารละลายตะกั่วที่เตรียมไว้ใส่ในขวดชมพู่ขวดละ 30 มิลลิลิตร ทำ treatment ละ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุม 3 ขวด ต่อ treatment เริ่มจับเวลา

1.1.6 นำสำลีอุดที่ปากขวดและปิดฟอย นำไปไว้บน Shaker 2 ชม.

1.1.7 เมื่อครบ 2 ชม. นำขวดออกจาก Shaker และ กรองสารละลายใส่หลอดทดลองโดยใช้ Syringe ดูดสารละลายและกรองผ่านผ้ากรอง เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

1.1.8 นำสาหร่ายของแต่ละขวดที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม.

1.1.9 นำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

1.2 *Stigonema*

1.2.1 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ใส่ไว้ในบีกเกอร์

1.2.2 ทำเช่นเดียวกับ *Fischerella* ทุกประการ เริ่มตั้งแต่ 1.1.4 ถึง 1.1.9

2. ทดลองเรื่องจำนวนเซล *Stigonema* ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 กรัม ในสารละลาย 30 มิลลิลิตร

2.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

2.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน

2.3 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ใส่ไว้ในบีกเกอร์

2.4 ชั่งสาหร่าย 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร treatment ละ 3 ซ้ำ ทั้งหมด 15 ขวด เลเบลที่ขวดให้เรียบร้อย และ เพิ่มขวดชมพู่อีก 3 ขวด ทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่เซลสาหร่าย

2.5 เทสารละลายตะกั่วที่เตรียมไว้ใส่ในขวดชมพู่ที่เตรียมไว้ขวดละ 30 มิลลิลิตร เริ่มจับเวลา

2.6 นำสำลีอุดที่ปากขวดและปิดฟอย นำไปไว้บน Shaker 2 ชม.

2.7 เมื่อครบ 2 ชม. นำขวดออกจาก Shaker และ กรองสารละลายใส่หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองโดยใช้ Syringe ดูดสารละลายและกรองผ่านผ้ากรอง เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

2.8 นำสาหร่ายของแต่ละขวดที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม.

2.9 นำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

3. ทดลองเรื่องอายุเซล *Stigonema* ที่ 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ ในสารละลาย 30 ml

3.1 เตรียมสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร , 600 มิลลิลิตร ที่ pH 5

3.2 ชั่งสาหร่าย 0.15 กรัม ที่อายุเซล 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ ใส่ flask ขนาด 125 มิลลิลิตร treatment ละ 3 ซ้ำ ทั้งหมด 12 ขวด เลเบลที่ขวด และ เพิ่ม flask อีก 3 ขวด ทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่เซลสาหร่าย

3.3 เทสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ flask 30 ml เริ่มจับเวลา

3.4 นำลำลีอุดที่ปากขวดและปิดฟอย นำไปไว้บน Shaker 2 ชั่วโมง

3.5 เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำขวดออกจาก Shaker และ กรองสารละลายใส่หลอดทดลองโดยใช้ Syringe ดูดสารละลายและกรองผ่านผ้ากรอง เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฟอย เก็บเข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

3.6 นำสาหร่ายผ่านการดูดซับเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชั่วโมง

3.7 นำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4. ทดลองเรื่องความเข้มข้นสารละลายตะกั่วที่ 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง หลังจากเริ่มดูดซับ

4.1 สารละลายตะกั่วเข้นข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.1.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

4.1.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.1.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.1.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.1.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.1.3 เทใส่

4.1.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

4.1.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายกรองผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลองเก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

4.1.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.1.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ ทำทีละซ้ำ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

4.2 สารละลายตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

4.2.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.2.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

4.2.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.2.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.2.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.2.3 เทใส่

4.2.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

4.2.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายกรองผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลองเก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.2.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ทำทีละซ้ำ ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

4.2 สารละลายตะกั่วเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

4.3.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.3.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

4.3.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.3.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.3.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.3.3 เทใส่

4.3.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

4.3.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายแล้วกรองผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลอง เก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

4.3.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.3.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ทำทีละซ้ำ ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

4.3 สารละลายตะกั่วเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.4.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

4.4.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.4.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรฉีดผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.4.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.4.3 เทใส่

4.4.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

4.4.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายแล้วกรองผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลอง เก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

4.4.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.4.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ทำทีละซ้ำ ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

4.4 สารละลายตะกั่วเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.5.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

4.5.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.5.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

4.5.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.5.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.5.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.5.3 เทใส่

4.5.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายแล้วกรองผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลอง เก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

4.5.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.5.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ทำทีละซ้ำ ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

4.5 สารละลายตะกั่วเข้นข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

4.6.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร

4.6.3 นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายตะกั่วไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง ประมาณ 15 นาที

4.6.4 ใช้ Syringe ดูดสารละลาย 3.3.3 ประมาณ 10 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้ากรองใส่ในหลอดทดลอง เป็นชุดควบคุม ปิดฟอย

4.6.5 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ชั่งสาหร่าย 3 กรัม ใส่ไว้ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร นำสารละลายที่เตรียมไว้จาก 3.3.3 เทใส่

4.6.6 นำไปวางบน Magnetic stirer ปรับความเร็วปานกลาง พร้อมจับเวลา

4.6.7 ใช้ Syringe ดูดสารละลายขึ้นแล้วผ่านผ้ากรอง ใส่ในหลอดทดลอง เก็บที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทุกๆ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 นาที, 1, 3, 6, 24, 36, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

4.6.8 นำสาหร่ายของแต่ละระยะเวลาที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม. เมื่อครบกำหนดนำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

4.6.9 ในการทำไม่สามารถทำพร้อมกัน 3 ซ้ำ ได้ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลา ทำทีละซ้ำ ซึ่งแต่ละซ้ำทำเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดลองเรื่องการล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับ โดยใช้ DI water, 0.1M EDTA และ 0.1M HNO_3 เป็นตัวล้าง

5.1 เตรียมน้ำ DI ที่ pH 5 ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปรับ pH โดยใช้ 10% NaOH และ 0.1 M HNO_3 ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH meter

5.2 เมื่อได้น้ำที่ปรับ pH แล้ว นำมาผสมตะกั่วให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน

5.3 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ใส่ไว้ในบีกเกอร์

5.4 ชั่งสาหร่าย 0.15 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร 9 ขวด เลเบลที่ขวดให้เรียบร้อย และ เพิ่มขวดชมพู่อีก 3 ขวด ทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่เซลสาหร่าย

5.5 เทสารละลายตะกั่วที่เตรียมไว้ใส่ในขวดชมพู่ที่เตรียมไว้ขวดละ 30 มิลลิลิตร เริ่มจับเวลา

5.6 นำสำลีอุดที่ปากขวดและปิดฟอย นำไปไว้บน Shaker 3 ชม.

5.7 จากนั้นเตรียม 0.1M EDTA, 0.1 M HNO_3 และ DI water ใส่ในขวดชมพู่อย่าง 3 ขวด ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

5.8 เมื่อครบ 3 ชั่วโมง นำขวดออกจาก Shaker และ กรองสารละลายใส่หลอดทดลองโดยใช้ Syringe ดูดสารละลายและกรองผ่านผ้ากรอง เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

5.9 นำสาหร่ายของแต่ละขวดที่อยู่บนผ้ากรอง ใส่ลงในขวดชมพู่อีก 9 ขวดที่มีสารข้อ 2.7 อยู่ โดยแต่ละขวดจะเลเบล เช่น HNO_3/1, HNO_3/2, HNO_3/3 และจะต้องเลเบลที่มาจากขวดไหนในขั้นตอนดูดซับก่อนหน้านี้ด้วย

5.10 จับเวลาตั้งแต่เริ่มใส่สาหร่ายลงขวดชมพู่ นำสำลีอุดที่ปากขวดและปิดฟอย นำไปไว้บน Shaker 3 ชั่วโมง

5.11 เมื่อครบ 3 ชั่วโมง นำขวดออกจาก Shaker และ กรองสารละลายใส่หลอดทดลอง (เลเบลแล้ว) โดยใช้ Syringe ดูดสารละลายและกรองผ่านผ้ากรอง เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฟอยให้เรียบร้อย เข้าตู้เย็นเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

5.12 นำสาหร่ายของแต่ละขวดที่อยู่บนผ้ากรองใส่กระทงฟอยที่ทำขึ้น พร้อมบันทึกหมายเลขกระทงฟอย ให้ตรงกับตัวอย่าง จากนั้นนำสาหร่ายทุกกระทงไปเข้าตู้ Oven เพื่ออบแห้ง 24 ชม.

5.13 นำสาหร่ายมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ศึกษาความแตกต่างระหว่างพื้นที่ผิวของ *Stigonema* ที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว กับ ไม่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

6.1 กรอง *Stigonema* ด้วยกระชอนกรองแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า 2 รอบ ทำให้หมาดๆ ใส่ไว้ในบีกเกอร์

6.2 ชั่งสาหร่าย 4 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 2 ขวด เลเบลที่ขวดให้เรียบร้อย (ดูดซับตะกั่ว กับ ไม่ดูดซับตะกั่ว)

6.3 เติมสารละลายตะกั่วที่เหลือจากการทดลองก่อนหน้านี้ ใส่ในขวดชมพู่ที่เลเบลว่าดูดซับตะกั่ว ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ส่วนขวดที่เลเบลว่า ไม่ดูดซับตะกั่ว ใส่น้ำ DI water

6.4 อุดสำลีปิดฟอยนำไปไว้บน Shaker 24 ชั่วโมง

6.5 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำมากรองให้สะเด็ดน้ำ ใส่ถ้วยน้ำพลาสติก และเลเบลเหมือนเดิม เข้าอบในตู้ Oven 24 ชม.

6.6 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำมาบดให้เป็นผง และเตรียมตัวอย่างไปส่งถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่คณะวิทยาศาสตร์

7. การคำนวณ เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น , Ceq คือ ความเข้นข้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และ Ceq_d คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS หลังจากการล้างตะกั่วด้วยสารละลายแล้ว

7.1 % remove สูตรคือ $(C_i - Ceq) \times 100 / C_i$

7.2 q value สูตรคือ $(C_i - Ceq) \times 30 /$ (น้ำหนักสาหร่ายแห้ง(กรัม) x 1000)

7.3 % desorp สูตรคือ $Ceq_d \times 100 / (C_i - Ceq)$

การวิเคราะห์ผล

ในเบื้องต้นนำสารละลายที่ได้จากการทดลองไป วิเคราะห์โดยเครื่อง AAS ต่อจากนั้นนำข้อมูลต่างๆที่บันทึก จะถูกนำมาการวิเคราะห์เบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 1 และใช้โปรแกรม DSAASTAT version 1.017 เป็นโปรแกรมในการวิเคราะห์ผล ซึ่งการทดลองนี้ใช้การวิเคราะห์แบบ CRD โดยอธิบายผลเป็น LSD- Multiple comparison tests เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว ในแต่ละการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานที่ทำการทดลอง

1. ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระยะเวลาในการทดลอง

กันยายน 2549 ถึง มีนาคม 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองโดยใช้สาหร่าย *Fischerella และ Stigonema* 0.3 กรัมต่อสารละลาย ลิลิตร ในการบำบัดสารละลายตะกั่ว ($Pb(NO_3)_2$) เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นาน 2 ที่ระดับ pH 3, 4, 5, 6 และ 7 พบว่า *Fischerella และ Stigonema* มีความสามารถในซับตะกั่วสูงสุดที่ระดับ pH 5 เท่ากับ 20.98 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 98.01 เปอร์เซ็น และ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 98.76 เปอร์เซ็น ตามลำดับ ซึ่ง *Stigonema* มีประสิทธิภาพในซับตะกั่วได้ดีกว่า *Fischerella* ซึ่งสังเกตได้จาก q value และ %remove ในตารางที่ 6 ารางที่ 7 ซึ่ง % remove ไม่สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้อย่างเท่ากับ q value ดังนั้นจึงได้เลือก *Stigonema* เพราะมีความสามารถในการดูดซับสูง เลือกสาหร่ายชนิดนี้ในการศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ Gong *et al.* (2004) ได้ทดลองในสาหร่าย *S. maxima* พบว่า ที่พีเอช ต่ำ การดูดซับไอออนตะกั่วลดลง เมื่อระดับพีเอชสูงขึ้นช่วง 2 - 5.5 การดูดซับสูงขึ้นตาม ารดูดซับไอออนตะกั่วสูงที่สุดที่ระดับพีเอช 5.5

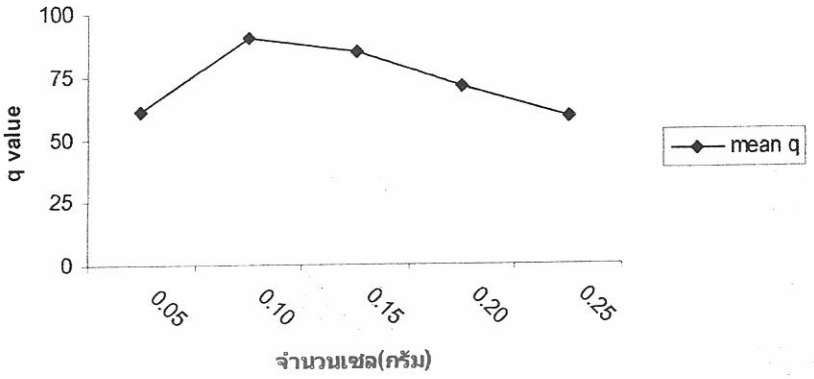
เหตุผลที่ทำให้ระดับพีเอชต่างกันมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เป็นเพราะ ที่ทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย ขึ้นอยู่กับ ะกอบของ CPS (Capsular Polysacalide) เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่า ค่า pKa ของ carboxyl group คือ 2.9-3.4) จะทำให้ carboxyl group อยู่ในรูป (COO^-) ามารถจับ Pb^{2+} ได้ (Raungsomboon *et al.*, 2006)

ที่ 6 การดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Fischerella* ที่ระดับ pH แตกต่างกัน (Mean ± S.E.)

pH_i	pH_f	% remove	q value (mg/g)
3.02 ± 0.00	3.34 ± 0.03	6.74 ± 1.67	2.60 ± 0.38 [a]
4.00 ± 0.00	6.84 ± 0.10	98.11 ± 0.18	15.85 ± 1.72 [b]
5.08 ± 0.00	7.46 ± 0.04	98.01 ± 0.62	20.98 ± 1.01 [c]
6.02 ± 0.00	7.37 ± 0.09	92.09 ± 0.68	16.54 ± 2.82 [b]
7.00 ± 0.00	7.53 ± 0.11	95.71 ± 0.83	14.27 ± 1.91 [b]

ที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 14 : แนวโน้มการดูดซับตะกั่วต่อจำนวนเซลของสาหร่าย *Stigonema*

ตารางที่ 8 ปริมาณเซลของสาหร่าย *Stigonema* มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ (q value) และ เปอร์เซ็นการดูดซับตะกั่ว (%remove) จำนวนกรัมสาหร่ายในปริมาณที่แตกต่างกันในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร pH 5 แสดงค่าเป็น (Mean $\pm$ S.E.)

จำนวนเซล (กรัม)	% remove	q value (mg/g)
0.05	22.94 $\pm$ 0.98	60.88 $\pm$ 3.51 ^{ab}
0.10	59.79 $\pm$ 1.12	89.92 $\pm$ 4.05 ^{c}
0.15	66.98 $\pm$ 0.43	84.44 $\pm$ 3.23 ^{c}
0.20	75.70 $\pm$ 0.74	70.50 $\pm$ 2.88 ^{b}
0.25	80.31 $\pm$ 1.80	58.84 $\pm$ 0.77 ^{a}

อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 อายุเซลของสาหร่าย *Stigonema* มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ (q value) และ เปอร์เซ็นการดูดซับตะกั่ว (% remove) จำนวนสาหร่าย 0.15 กรัมในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร pH 5 แสดงค่าเป็น (Mean ± S.E.)

อายุเซล (สัปดาห์)	%remove	q value (mg/g)
1	22.55 ± 2.25	23.42 ± 1.41[a]
2	20.80 ± 2.07	23.15 ± 3.51[a]
3	23.65 ± 0.87	25.65 ± 0.22[a]
4	21.16 ± 0.95	24.18 ± 1.20[a]

อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

จากการทดลองโดยใช้สาหร่าย 0.15 กรัม ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร pH 5 ที่อายุเซลเซลต่างกัน 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 23.42, 23.15, 25.65 และ 24.18 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ในแต่ละ treatment มีความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 9) ซึ่งในการทดลองต่อๆ ไปเราเลือกใช้อายุเซลประมาณ 2 – 3 สัปดาห์ สาเหตุเพราะช่วงระยะเวลานี้ เซลกำลังบลูมมีปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ Gong *et al.* (2004) ได้ทดลองโดยใช้สาหร่าย *S. maxima* อายุเซล 12 วัน หลังจากเพาะเลี้ยงตลอดการทดลอง ทั้งนี้จะเลือกตามความเหมาะสมในการเจริญเติบโต

จากการทดลองเรื่อง ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ซึ่งใช้เซลอัตรา 3 กรัมต่อน้ำ 600 มิลลิลิตร พีเอช 5 จะทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน คือ 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาในการดูดซับที่ต่างกันเริ่มตั้งแต่หลังการดูดซับ 0.02 ชั่วโมง หรือ 1 นาที เป็นต้นไป ในการทดลองนี้สามารถนำ q value ไปแปรผล kinetic และ Isotherm ได้ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 105.89 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 100 เปอร์เซ็น (ตารางที่ 10) ทั้งนี้เราแบ่งเป็น rapid stage และ lag stage ซึ่งพบว่าในช่วงเริ่มต้น ตั้งแต่ 1 นาที มีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสังเกตจากความสามารในการดูดซับ (ภาพที่ 15) ที่ระดับความเข้นข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 36 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 430.12 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 82.31 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 11) และพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ตั้งแต่ 1 นาที มีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 16) ที่ระดับความเข้นข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 683.28 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 68.72 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 12) และพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ตั้งแต่ 1 นาทีมีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 17) ที่ระดับความเข้นข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 998.79 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 62.47 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 13) ซึ่งพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ตั้งแต่ 1 นาทีมีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 18) ที่ระดับความเข้นข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 1643.76 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 69.39 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 14) จากการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับที่ระดับความเข้มข้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันที่ระดับความเข้นข้นของตะกั่วต่างกัน ซึ่งคาดว่าเป็นระดับความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการดูดซับมากที่สุด สำหรับสาหร่าย *Stigonema* ความหนาแน่น 3 กรัมต่อสารละลาย 600 มิลลิลิตร พีเอช 5 หากระดับความเข้นข้นมากกว่านี้อาจทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง และ พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ตั้งแต่ 1 นาทีมีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 19) ที่ระดับความเข้นข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับมี q value สูงที่สุด 1407.14 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า %remove เท่ากับ 53.35 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 15) และพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ตั้งแต่ 1 นาทีมีการดูดซับอย่างรวดเร็วจนกระทั่งก่อนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* เริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 20) ระยะเวลาส่งผลให้สามารถดูดซับตะกั่วในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับทางชีวภาพอยู่ในน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักระยะเวลาที่อยู่ในน้ำนั้น ส่งผลต่อปริมานการลดต่ำลงของไอออนโลหะนั้นๆ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มโอกาสให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยึดเกาะระหว่าง ลิแกนด์ กับ ไอออนโลหะ (Singh *et al.*, 1997) ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งอาจลดลง หรือ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ในทุกระดับความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับจะมีอัตราการดูดซับอย่างรวดเร็ว ช่วง 1 นาที ถึง ก่อนชั่วโมงที่ 24 (ภาพที่ 21) เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นการดูดซับช้าลง น่าจะเป็นเพราะในช่วงต้นบริเวณที่ยึดเกาะกับตะกั่ว (binding sites) มีมาก เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นมีการดูดซับเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่บริเวณนั้นลดลง อัตราการดูดซับจึงลดลง และเมื่ออัตราการดูดซับลดลงความสามารถในการดูดซับตะกั่วเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (หลังจาก 24 ชั่วโมงของการดูดซับ) ผลการทดลองสอดคล้องกับ Gong *et al.* (2004) ซึ่งทดลองในสาหร่าย *S. maxima* การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการดูดซับ (0 – 30 นาที) หลังจากเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซับกลับลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 60 นาที และจะไม่เพิ่มระดับการดูดซับขึ้นอีก

นอกจากนี้ Singh *et al.* (1997) ศึกษาการดูดซับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} ของสาหร่าย *Microcystis* พบว่า การดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสูงสุดจนกระทั่งอิ่มตัว หลังจาก 60 นาทีแรกของการดูดซับ และเข้าสู่สภาวะสมดุล

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาศึกษา kinetics การเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่าย *Stigonema* พบว่า แบ่งได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเกิดการดูดซับขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่สองการดูดซับลดลง และเกิดขึ้นไม่รวดเร็วซึ่งสังเกตได้จากกราฟ และพบว่า ช่วงก่อน 24 ชั่วโมงเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว เป็น Rapid stage และหลังจากช่วง 24 ชั่วโมง เป็น Lag stage ซึ่งพบว่าที่ 24 ชั่วโมง ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุล ระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับน่าจะเป็นช่วงอิ่มตัวของการดูดซับทำให้เข้าสู่สภาวะสมดุลสังเกตจาก q value (ภาพที่ 7A) และ %remove (ภาพที่ 7B) ซึ่งเมื่อนำ q value ในแต่ละความเข้มข้น ที่ช่วงระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์พบว่าแต่ละค่านั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P>0.05$ ทุกค่า และ จากข้อมูลการศึกษา kinetics สามารถนำไปวิเคราะห์หา Isotherm กลไกลการดูดซับได้ ซึ่งโดยทั่วไปสาหร่ายในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย จะมีกลไกการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Raungsomboon *et al.*, 2006) จากสมการที่ได้จากกราฟ (ภาพที่ 22) y = 0.0006x + 0.0201 พบว่า K เท่ากับ 33.5, Q_{max} เท่ากับ 1666.67 มิลลิกรัมต่อกรัม , R^2 เท่ากับ 0.8479 (ตารางที่ 12) ผลการทดลองสอดคล้องกับ Raungsomboon *et al.* (2006) ทดลองในสาหร่าย *G. gelatinosa* ซึ่งพบว่าเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุด(Q_{max}) เท่ากับ 256.41 มิลลิกรัมต่อกรัม R^2 เท่ากับ 0.9988, K เท่ากับ 1.62 ซึ่ง *G. gelatinosa* เข้าสู่สภาวะสมดุลเพียง 20 นาทีแต่ *Stigonema*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ระยะเวลานานถึง 24 ชั่วโมง จึงเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นี่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดของ *Stigonema* มากกว่า *G. gelatinosa* นอกจากนี้ Singh *et al.* (1997) ได้ทดลองในสาหร่าย *Microcystis* ในการดูดซับ Fe^{3+} พบว่า เป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ *Microcystis* ชนิด capsulated มีความสามารถในการดูดซับเหล็กสูงสุด (Q_{max}) เท่ากับ 333.33 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม R^2 เท่ากับ 0.9540 , K เท่ากับ 3.003

แบบจำลองของแลงค์เมียร์ (Langmuir)

$$C/q = K/Q_{max} + C/Q_{max}$$

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

Q_{max} = ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

สามารถคำนวณหา % absorption และ % desorption ได้อาศัยข้อมูล (ตารางที่ 13)

โดย % absorption หาจากสูตร $(C_i - Ceq) \times 100 / C_i$

และ % desorption หาจากสูตร $Ceq_d \times 100 / (C_i - Ceq)$

โดยที่ C_i คือ ความเข้มข้นควบคุมไม่ได้ใส่สาหร่าย

Ceq คือ ความเข้มข้นตะกั่วที่อยู่ในสารละลายหลังจากผ่านการดูดซับ

Ceq_d คือ ความเข้มข้นตะกั่วที่อยู่ในสารละลายหลังจากผ่านการล้างตะกั่ว

จากผลการทดลองการล้างการดูดซับตะกั่ว หรือ desorption ของสาหร่าย *Stigonema* พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยดูดซับนาน 3 ชั่วโมง จากนั้น ถูก desorb ด้วยสารละลายต่างชนิดกันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า จะให้ % desorb ที่ต่างกัน โดย DI water สามารถล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับได้น้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ เท่ากับ 36.22 เปอร์เซ็น ตรงกันข้าม EDTA และ *nitric acid* สามารถล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับ 82.89 และ 81.96 เปอรเซ็น ตามลำดับ ซึ่งค่า % desorb ระหว่าง EDTA และ nitric acid แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ตารางที่14) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Gong *et al.* (2004) ซึ่งทดลองโดยใช้สาหร่าย *S. maxima* ดูดซับตะกั่ว นาน 3 ชั่วโมง และล้างสาหร่ายโดยใช้ HCl, HNO_3, EDTA และ Citric acid เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง สามารถล้างออกได้ 85, 92, 91 และ 75 เปอร์เซ็น ตามลำดับ ซึ่ง HCl, HNO_3 และ EDTA ให้ผลการล้าง

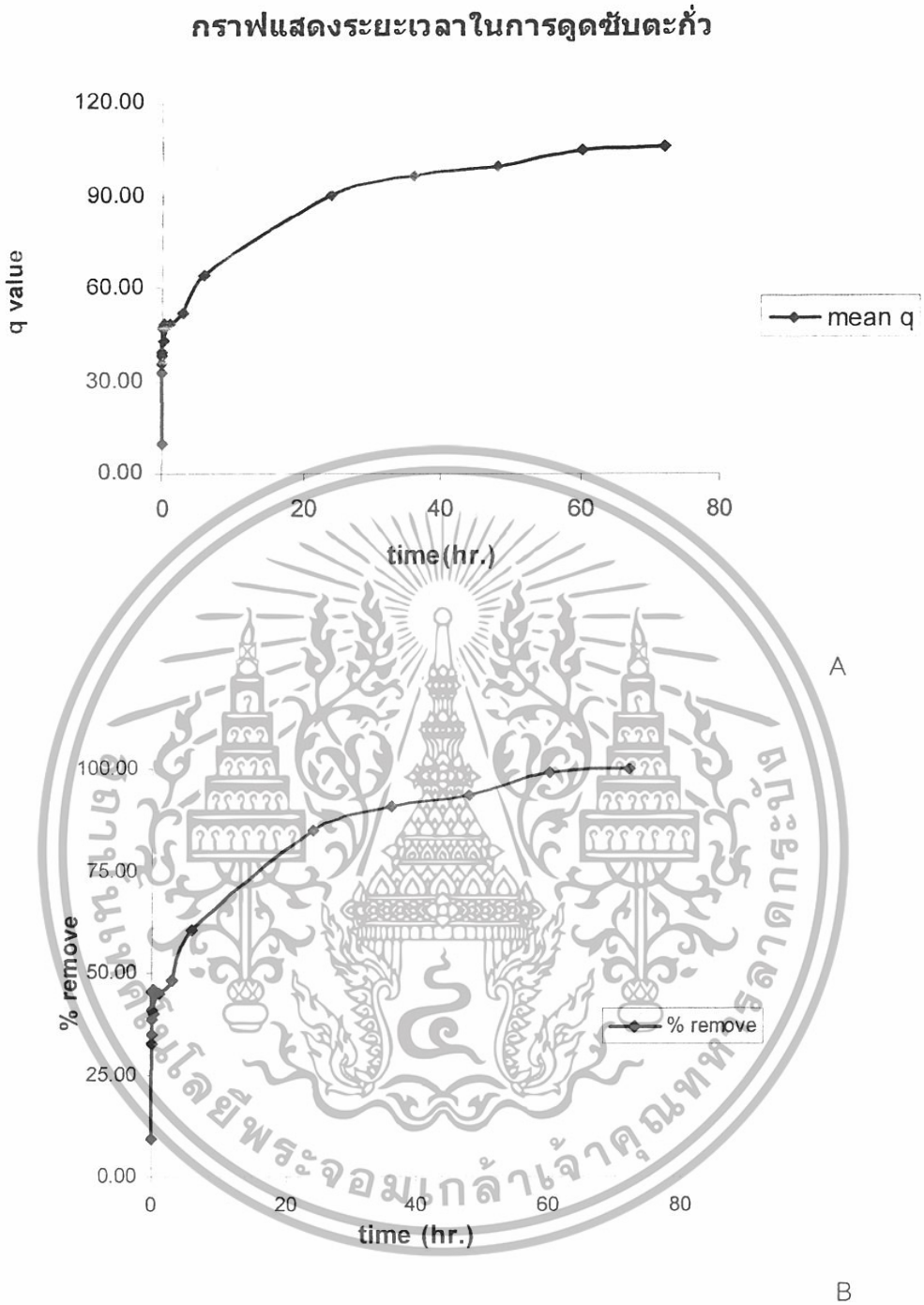
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วน Citric acid สามารถล้างตะกั่วออกน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการล้างการดูดซับตะกั่วหรือ desorption ระหว่างการดูดซับน้ำตาลกรดของสาหร่ายในรูปแบบของคาร์บอกซิลิก เมื่อดูดซับตะกั่วจะอยู่ในรูปอนุพันธ์ของ เอสเทอร์ หรือคาร์บอกลิเลต เมื่อล้างด้วยกรดจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเฉพาะกรดแก่จะยิ่งมีประสิทธิภาพ ทำให้กลับมาอยู่ในรูปเดิม ส่วนกลไกของ EDTA เมื่อสาหร่ายยึดกับ Pb^{2+} ซึ่งถูกปิดล้อมด้วยโมเลกุลของสารอินทรีย์จะเป็น chelated โดย EDTA จะเป็นตัว chelating จับตะกั่วไอออน และละลายในน้ำ (Nagase *et al.*, 2005)

ตารางที่ 10 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	10 mg/l					
	% remove			q value (mg/g)		
0.02 (1 นาที)	9.36	±	3.39	9.51	±	3.25
0.03 (2 นาที)	32.40	±	16.29	32.97	±	16.21
0.05 (3 นาที)	34.71	±	11.92	35.50	±	11.38
0.07 (4 นาที)	38.44	±	16.75	39.37	±	16.45
0.08 (5 นาที)	45.53	±	8.48	37.97	±	7.20
0.12 (7 นาที)	40.65	±	5.61	47.39	±	6.11
0.17 (10 นาที)	46.04	±	7.19	48.55	±	7.10
0.25 (15 นาที)	40.02	±	3.30	42.78	±	6.12
0.50 (30 นาที)	44.80	±	6.18	48.17	±	9.62
1.00	44.86	±	6.23	48.24	±	9.65
3.00	48.13	±	9.36	52.04	±	13.27
6.00	60.69	±	7.91	64.07	±	8.02
24.00	84.94	±	2.68	90.14	±	7.37
36.00	90.96	±	1.50	96.29	±	5.53
48.00	93.72	±	9.36	99.43	±	7.96
60.00	98.92	±	0.88	104.64	±	5.07
72.00	100.00	±	0.00	105.89	±	6.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 15 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น %remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

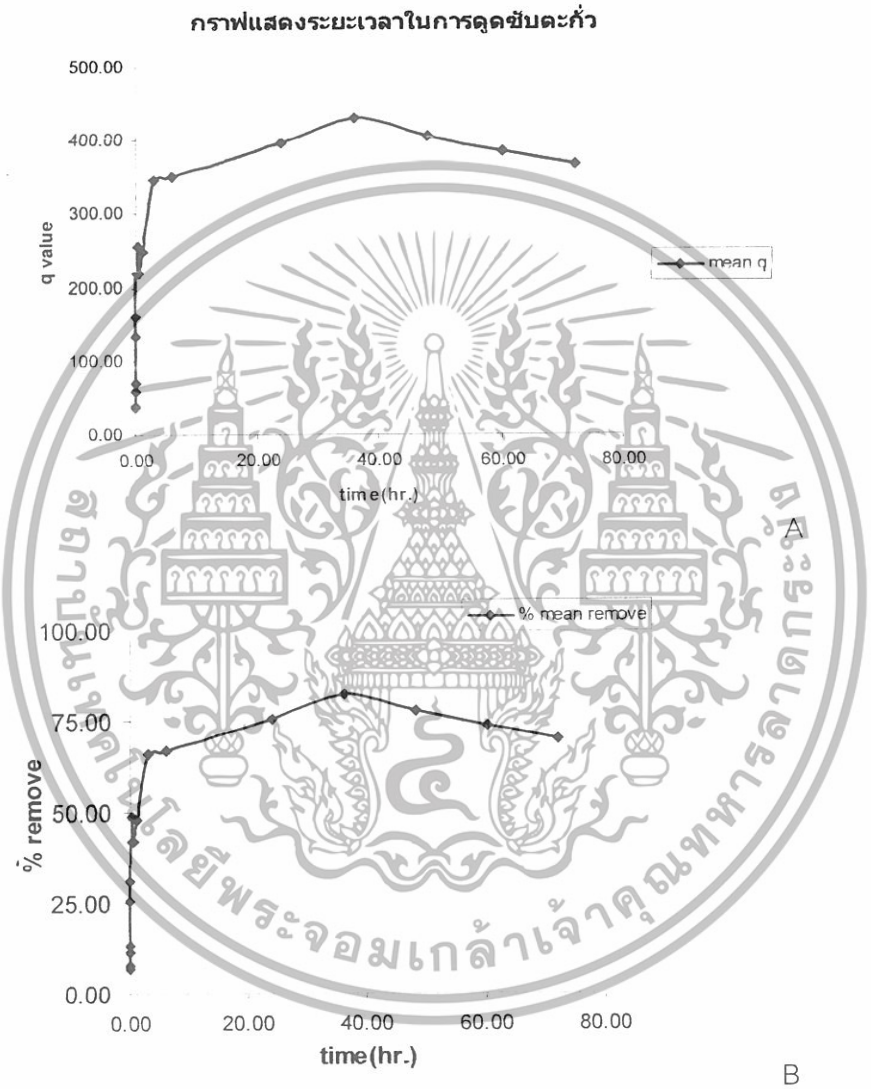
ระยะเวลา(ชั่วโมง)	50 mg/l	
	% remove	q value (mg/g)
0.02 (1 นาที)	7.56 ± 1.34	39.59 ± 4.42
0.03 (2 นาที)	6.97 ± 5.04	36.69 ± 15.33
0.05 (3 นาที)	11.19 ± 7.28	58.89 ± 22.36
0.07 (4 นาที)	13.18 ± 8.03	69.39 ± 24.83
0.08 (5 นาที)	25.59 ± 1.96	134.01 ± 8.00
0.12 (7 นาที)	30.83 ± 4.77	161.48 ± 15.88
0.17 (10 นาที)	48.84 ± 10.98	254.91 ± 31.04
0.25 (15 นาที)	41.89 ± 9.80	219.56 ± 31.48
0.50 (30 นาที)	41.87 ± 8.86	219.49 ± 29.17
1.00	47.56 ± 12.77	249.22 ± 39.99
3.00	66.07 ± 2.04	345.52 ± 8.57
6.00	66.83 ± 9.38	349.91 ± 31.20
24.00	75.52 ± 1.86	394.98 ± 9.86
36.00	82.31 ± 5.89	430.12 ± 15.55
48.00	77.52 ± 0.53	405.40 ± 7.57
60.00	73.47 ± 2.23	384.33 ± 12.07
72.00	69.81 ± 13.18	365.66 ± 42.57

จากการศึกษาพื้นที่ผิวเซล *Stigonema* ผ่านการอบแห้งนาน 24 ชั่วโมง ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เปรียบเทียบระหว่างเซลที่ ไม่ผ่านการดูดซับตะกั่ว กับ ผ่านการดูดซับด้วยตะกั่ว พบว่าเซลที่ไม่ผ่านการดูดซับตะกั่ว (ภาพที่ 23 A) นั้นที่ผิวเซลมีลักษณะเหี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะสูญเสียน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซล ซึ่งต่างจากเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยตะกั่ว(ภาพที่ 23 B) เพราะที่ผิวเซลนั้นไม่เหี่ยวเท่า ซึ่งคาดว่าตะกั่วไอออนแทรกอยู่ในเยื่อเซลแทนที่น้ำ

จึงทำให้ผิวเซลไม่เหี่ยวเท่า หรือ เซลเกิดการสูญเสียน้ำต่างกันจึงทำลักษณะที่ผิวเซลต่างกัน นอกจากนี้ที่ผิวเซลที่ผ่านการดูดซับตะกั่วมีคราบ และจุดขาวๆ ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคของตะกั่วที่ถูกดูดซับไว้



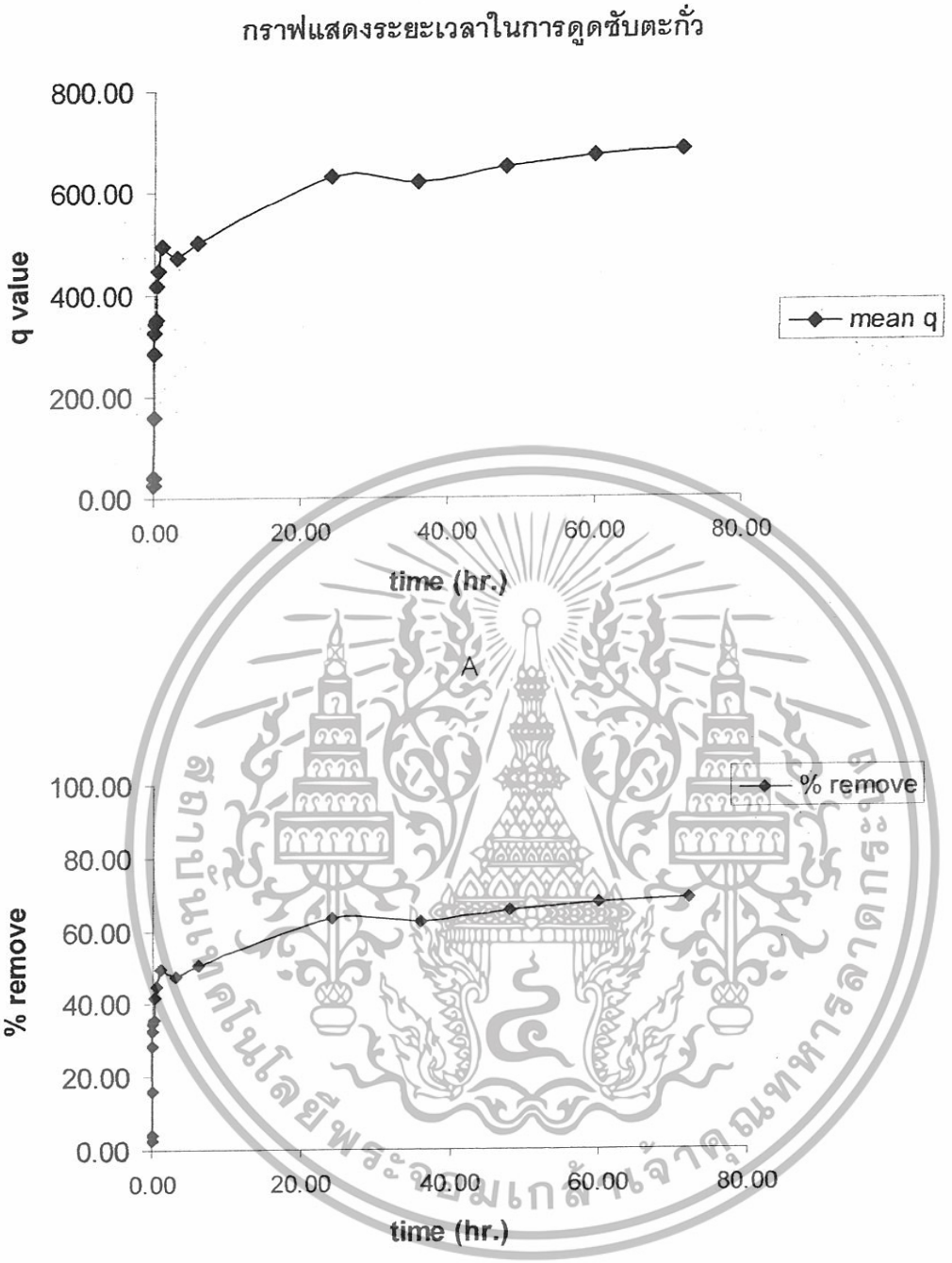
ภาพที่ 16 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น %remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

	100 mg/l	
ระยะเวลา(ชั่วโมง)	% remove	q value (mg/g)
0.02 (1 นาที)	4.15 ± 2.09	41.40 ± 15.61
0.03 (2 นาที)	2.62 ± 1.59	26.54 ± 15.20
0.05 (3 นาที)	15.77 ± 7.72	159.94 ± 60.84
0.07 (4 นาที)	34.57 ± 1.42	344.56 ± 25.11
0.08 (5 นาที)	28.52 ± 2.91	282.57 ± 16.51
0.12 (7 นาที)	32.64 ± 2.68	323.75 ± 21.43
0.17 (10 นาที)	35.39 ± 4.77	350.18 ± 22.82
0.25 (15 นาที)	41.84 ± 2.39	415.98 ± 17.34
0.50 (30 นาที)	44.59 ± 4.99	445.87 ± 56.45
1.00	49.49 ± 2.00	493.37 ± 28.99
3.00	47.57 ± 4.92	471.34 ± 30.36
6.00	50.42 ± 1.19	501.36 ± 35.96
24.00	63.28 ± 1.93	629.61 ± 21.35
36.00	62.25 ± 1.26	619.81 ± 37.89
48.00	65.56 ± 6.32	649.84 ± 53.41
60.00	67.57 ± 2.17	671.68 ± 6.17
72.00	68.72 ± 1.71	683.28 ± 28.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



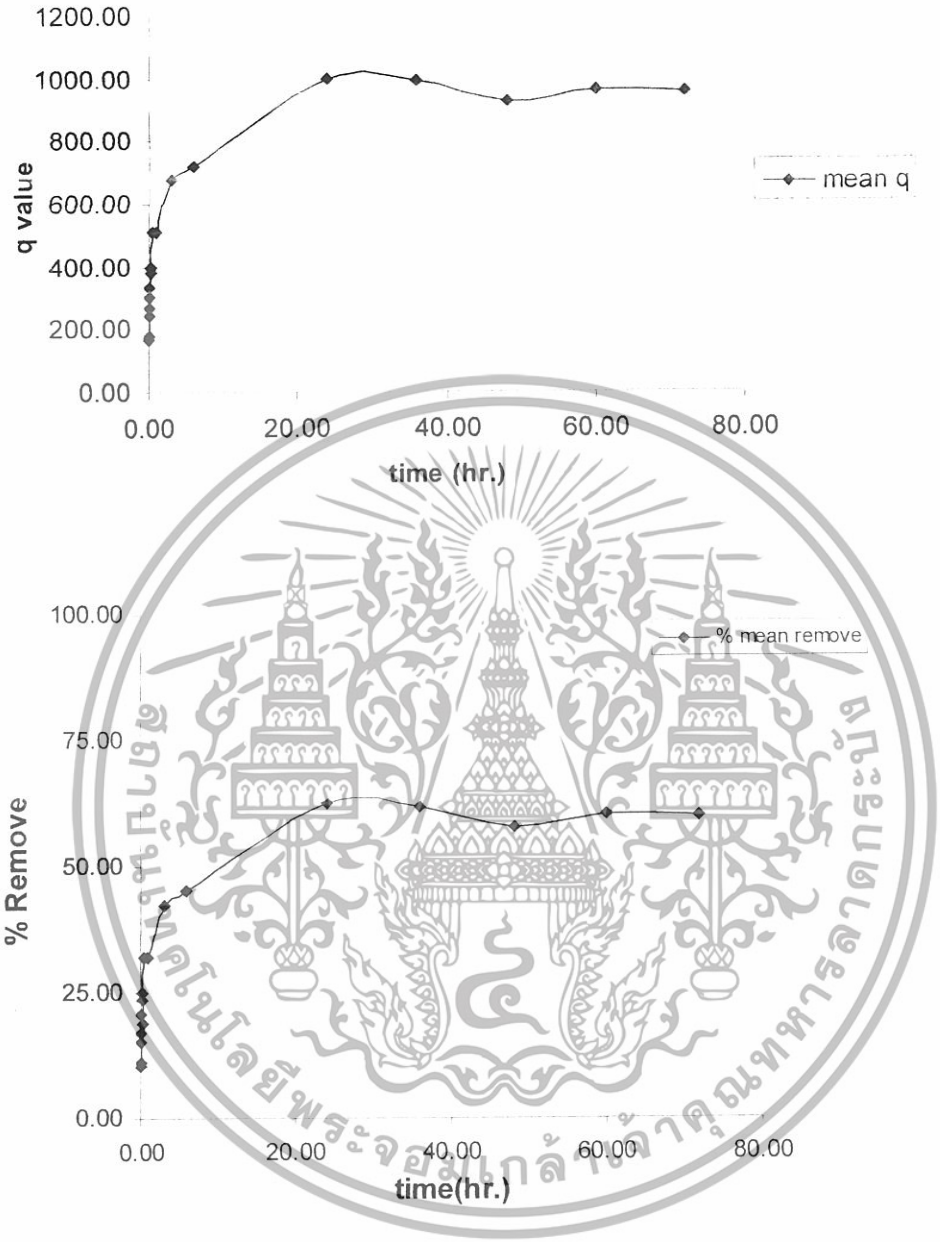
B

ภาพที่ 17 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น

q value B แสดงเป็น % remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงระยะเวลาในการดูดซับตะกั่ว



ภาพที่ 18 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น %remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

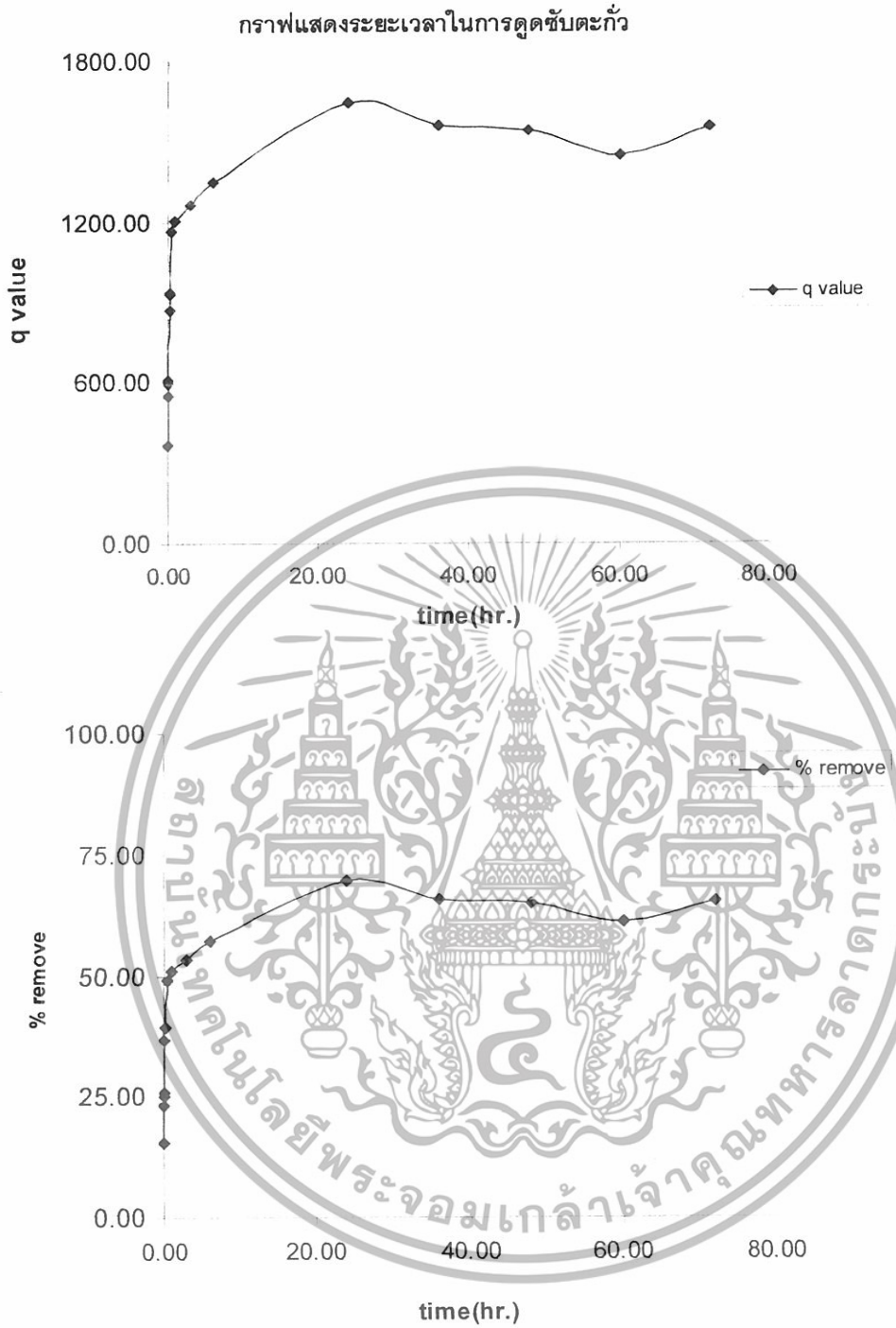
	150 mg/l	
ระยะเวลา(ชั่วโมง)	%remove	q value (mg/g)
0.02 (1 นาที)	10.28 ± 0.04	164.48 ± 7.00
0.03 (2 นาที)	11.21 ± 0.32	180.19 ± 45.81
0.05 (3 นาที)	15.15 ± 0.26	243.14 ± 38.49
0.07 (4 นาที)	16.78 ± 0.33	269.26 ± 48.55
0.08 (5 นาที)	20.69 ± 0.18	331.46 ± 28.84
0.12 (7 นาที)	18.71 ± 0.73	301.38 ± 102.81
0.17 (10 นาที)	23.71 ± 0.44	380.60 ± 65.269
0.25 (15 นาที)	24.90 ± 0.53	399.84 ± 76.393
0.50 (30 นาที)	31.83 ± 0.12	508.56 ± 10.621
1.00	31.83 ± 0.27	509.92 ± 42.896
3.00	42.27 ± 0.15	676.08 ± 24.01
6.00	45.06 ± 0.86	720.88 ± 22.086
24.00	62.47 ± 0.03	998.79 ± 8.2715
36.00	61.71 ± 0.77	989.18 ± 117.18
48.00	57.84 ± 0.68	926.64 ± 102.98
60.00	60.22 ± 0.28	964.52 ± 77.407
72.00	59.95 ± 0.56	959.31 ± 40.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	200 mg/l					
	%remove			q value (mg/g)		
0.02 (1 นาที)	15.51	±	3.15	366.66	±	55.82
0.03 (2 นาที)	22.99	±	5.11	547.12	±	86.08
0.05 (3 นาที)	23.15	±	1.38	548.16	±	34.43
0.07 (4 นาที)	25.12	±	1.04	594.83	±	31.45
0.08 (5 นาที)	25.83	±	1.62	611.58	±	22.36
0.12 (7 นาที)	36.56	±	2.22	867.54	±	56.58
0.17 (10 นาที)	39.24	±	1.57	930.57	±	44.63
0.25 (15 นาที)	39.52	±	3.64	935.14	±	72.68
0.50 (30 นาที)	49.23	±	1.09	1166.79	±	167.27
1.00	50.82	±	1.20	1204.74	±	68.14
3.00	53.33	±	1.93	1263.18	±	69.19
6.00	57.01	±	2.63	1349.94	±	86.00
24.00	69.39	±	2.19	1643.76	±	36.73
36.00	65.70	±	3.42	1555.71	±	34.24
48.00	65.05	±	2.24	1540.77	±	39.63
60.00	61.19	±	9.17	1446.15	±	159.62
72.00	65.33	±	1.96	1548.33	±	23.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



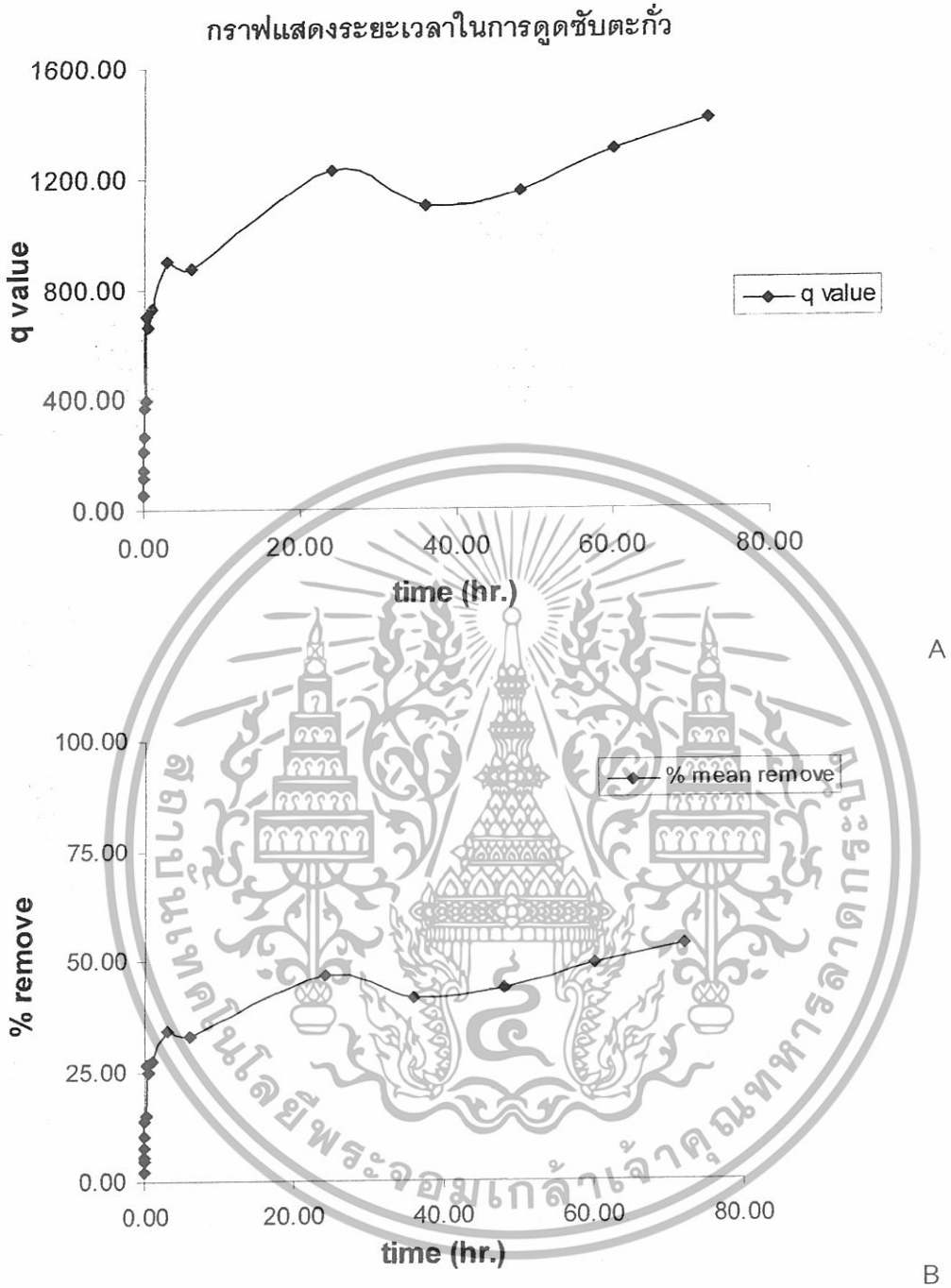
ภาพที่ 19 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น % remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ระยะเวลามีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 (Mean ± S.E.)

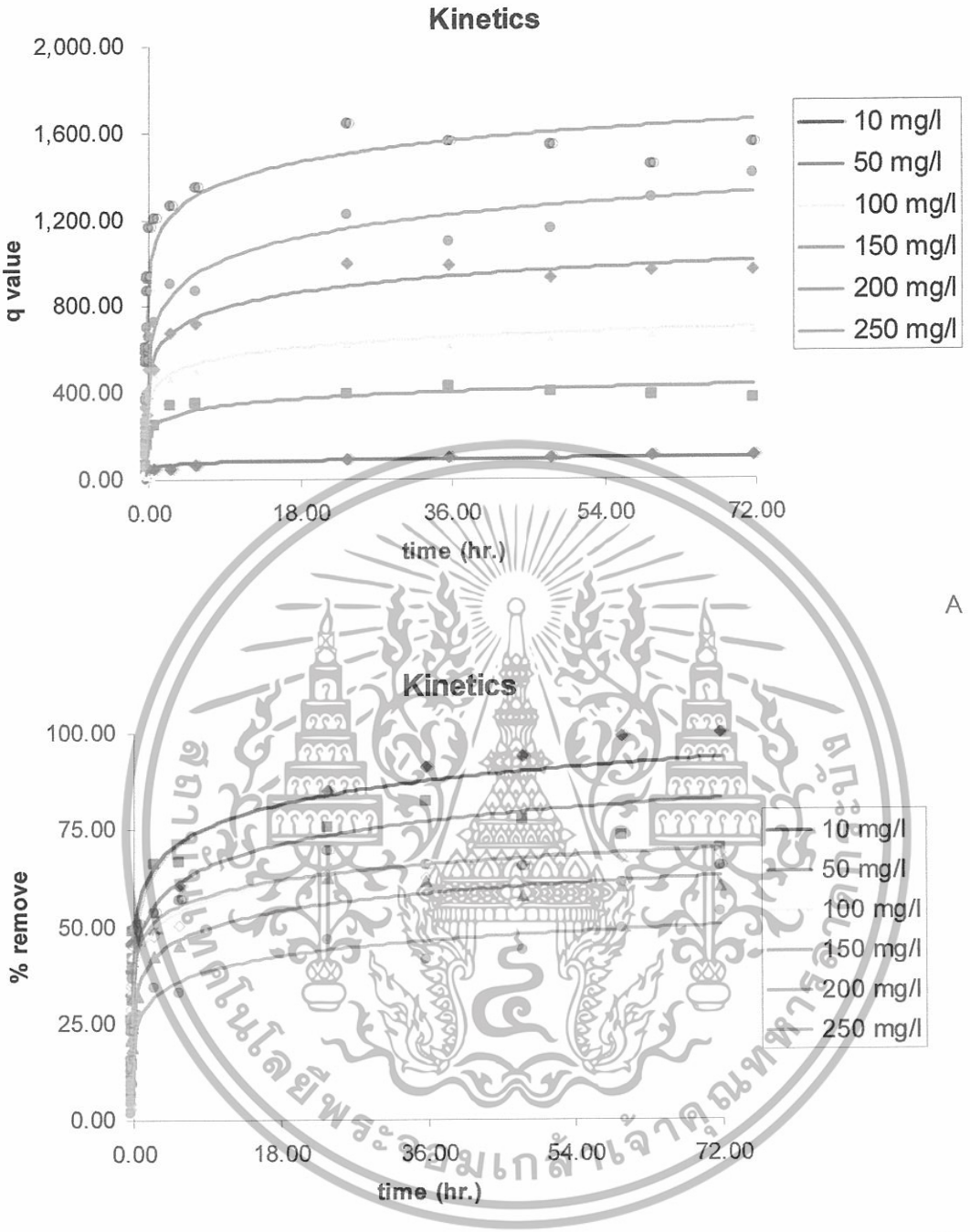
	250 mg/l	
ระยะเวลา(ชั่วโมง)	% remove	q value (mg/g)
0.02 (1 นาที)	4.62 ± 3.27	118.59 ± 82.53
0.03 (2 นาที)	2.10 ± 1.36	56.30 ± 36.62
0.05 (3 นาที)	5.37 ± 2.69	143.35 ± 71.69
0.07 (4 นาที)	7.89 ± 2.01	209.05 ± 55.44
0.08 (5 นาที)	10.07 ± 5.42	268.55 ± 143.78
0.12 (7 นาที)	13.75 ± 5.81	366.23 ± 155.73
0.17 (10 นาที)	14.77 ± 5.79	393.20 ± 155.90
0.25 (15 นาที)	26.57 ± 7.39	703.41 ± 200.70
0.50 (30 นาที)	24.74 ± 9.90	657.62 ± 265.29
1.00	27.43 ± 9.26	727.82 ± 249.76
3.00	34.08 ± 6.70	900.00 ± 184.93
6.00	32.94 ± 10.90	874.24 ± 294.44
24.00	46.48 ± 2.48	1223.60 ± 84.08
36.00	41.50 ± 9.25	1098.17 ± 255.83
48.00	43.53 ± 8.91	1151.13 ± 247.42
60.00	49.26 ± 5.30	1298.60 ± 155.52
72.00	53.35 ± 5.70	1407.14 ± 170.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 20 : ระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* (สารละลายตะกั่วเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง pH 5) A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น % remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



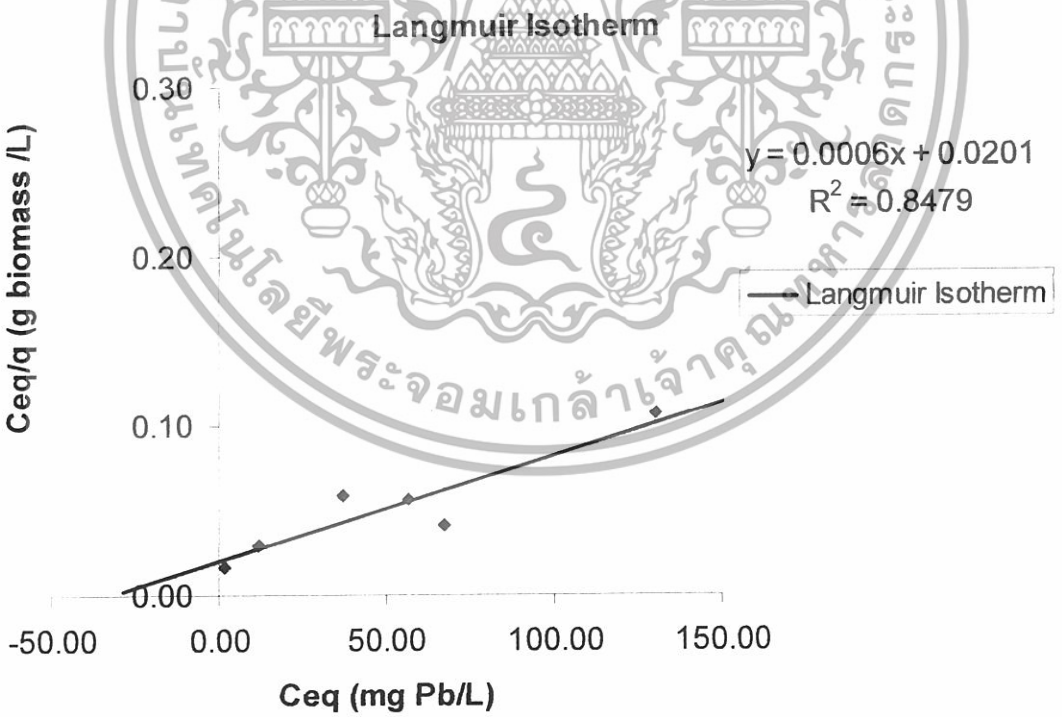
ภาพที่ 21 : Kinetics ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 5 โดย A แสดงเป็น q value B แสดงเป็น % remove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากการดูดซับ ที่ ระดับความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 5

	24 hr.					
มิลลิกรัมต่อลิตร	%remove			q value (mg/g)		
10	84.94	±	2.68	90.14	±	7.37 [a]
50	75.52	±	1.86	394.98	±	9.86 [b]
100	63.28	±	1.93	629.61	±	21.35 [c]
150	62.47	±	0.03	998.79	±	8.27 [d]
200	69.39	±	2.19	1643.76	±	36.73 [e]
250	46.48	±	2.48	1223.60	±	84.08 [f]

อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)



ภาพที่ 22 : กราฟกลไกการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่าย *Stigonema* สมการ คือ y = 0.0006x + 0.0201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17 ค่า K_1 คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว, K_2 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจนอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

	Langmuir Isotherm		
biosorbent	K	Q_{max}(mg/g)	R^2
stigonema	33.5	1666.67	0.8479

ตารางที่ 18 ข้อมูล desorption ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* โดย 0.1 M EDTA, HNO_3 และ DI water ระยะเวลาในการดูดซับนาน 3 ชั่วโมง และ desorp นาน 3 ชั่วโมง

สารเคมี	Ci (mg/l)	Ceq (mg/l)	% adsorption	Ci - Ceq (mg/l)	Ceq_d (mg/l)	% desorption
	10.86	4.89	54.97	5.97	4.88	81.74
	10.86	4.76	56.17	6.10	5.03	82.46
EDTA	10.86	4.83	55.52	6.03	5.11	84.74
	10.86	4.78	55.99	6.08	4.99	82.07
	10.86	4.63	57.37	6.23	5.01	80.42
HNO_3	10.86	4.71	56.63	6.15	5.13	83.41
	10.86	4.69	56.81	6.17	2.12	34.36
	10.86	4.58	57.83	6.28	2.26	35.99
DI water	10.86	4.78	55.99	6.08	2.33	38.32

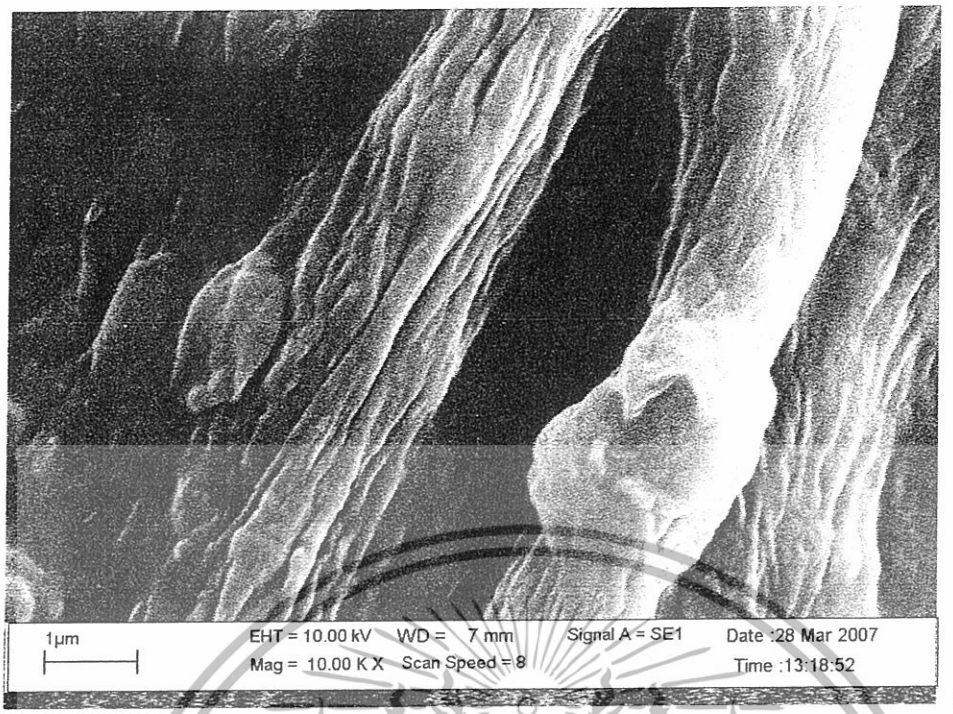
ตารางที่ 19 Desorption ของการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* โดย 0.1 M EDTA, HNO_3 และ DI water ระยะเวลาในการดูดซับนาน 3 ชั่วโมง และ desorp นาน 3 ชั่วโมง ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Mean ± S.E.)

	%adsorb		
incubation	EDTA	HNO_3	DI water
	55.55 ± 0.35 *	56.66 ± 0.40 *	56.86 + 0.53 *
	% desorb		
	EDTA	HNO_3	DI water
3 ชม.	82.98 ± 0.90 [a]	81.96 ± 0.87 [a]	36.22 ± 1.15 [b]

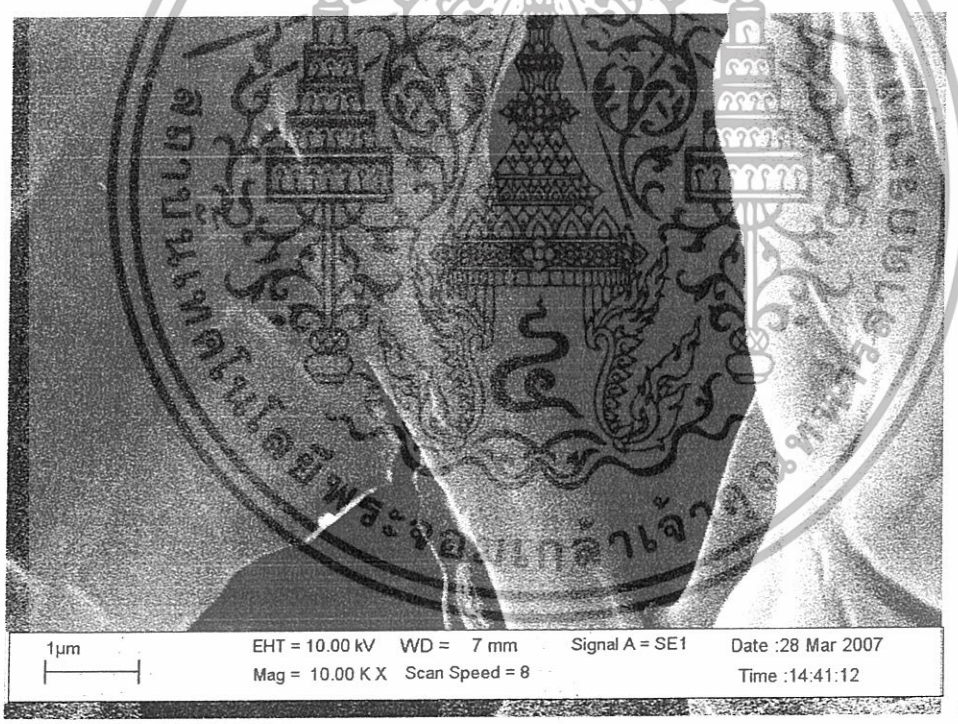
สัญลักษณ์ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

อักษรที่ต่างกันในแนวนอนแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A



B

ภาพที่ 23 : ภาพถ่ายของ *Stigonema* อบแห้งนาน 24 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 10,000 เท่า (A คือ *Stigonema* ไม่ผ่านการดูดซับตะกั่ว, B คือ *Stigonema* ผ่านการดูดซับตะกั่วนาน 24 ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากการศึกษาในครั้งนี้อาจสรุปได้ว่าระดับ pH มีผลต่อการดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Stigonema* และจากการทดลองพบว่า ที่ pH 5 ในสภาพที่มีตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุด สามารถดูดซับได้ถึง 52.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณเซลที่มีความสามารถเหมาะสมที่สภาพตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 2 ชั่วโมง ได้สูงสุดคือ 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ดูดซับตะกั่วได้ 84.44 มิลลิกรัมต่อลิตร อายุเซลสาหร่ายที่ 1, 2 ,3 และ 4 สัปดาห์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วดูดซับเท่ากับ 23.42, 23.15, 25.65 และ 24.18 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p <0.05) ระยะเวลาที่เป็นจุดอิ่มตัวในการดูดซับตะกั่วคือ 24 ชั่วโมง ความสามารถสูงสุดของ *Stigonema* ในการดูดซับโลหะหนักสามารถแสดงได้โดยใช้สมการของ Langrnuir adsorption isotherm ซึ่งทดลองที่ระดับความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการดูดซับที่ 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที, 4 นาที , 5 นาที,7 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, 36 ชั่วโมง, 48 ชั่วโมง, 60ชั่วโมง และ 72 ชั่วโมง พบว่า *Stigonema* สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด คือ 1666.67 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่ายแห้ง ในการล้างตะกั่วออกจากตัวดูดซับ พบว่า EDTA และ nitric acid สามารถล้างตะกั่วออกจากสาหร่าย *Stigonema* ได้เท่ากับ 82.98 และ 81.96 เปอรเซ็น ตามลำดับ ซึ่งค่า % desorb ระหว่าง EDTA และ nitric acid แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p <0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับทางชีวภาพเพื่อขยายผลไปสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ เพราะสาหร่ายในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียเติบโตได้ดีในภูมิภาคเขตร้อนและมีมูลค่าต่ำ อย่างเช่น *Stigonema* ไม่มีประโยชน์ในด้านอื่น หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำมาเป็น biosorbent หรือตัวดูดซับทางชีวภาพอาจเพิ่มมูลค่าได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

วัลภา อาชีวปริสุทธิ์, วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, สมนึก จารุดิลกกุล, ละเอียด เพ็งโสภา และ สุรชิต ฮวดสาขา. 2543. การพัฒนาตัวดูดซับไอออนโลหะหนักจากวัสดุชีวมวลที่ไม่มีชีวิต. เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่ 10. ไบเทค กรุงเทพฯ, หน้า 377-388.

Chen, J., X. Tao, J. Xu, T. Zhang, and Z. Liu. 2005. Biosorption of lead, cadmium and mercury by immobilized *Microcystis aeruginosa* in a column, Process Biochemistry 40: 3675-3679.

El-Sheekh, M., W. El-Shouny, M. Osman and E. El-Gammal. 2005. Growth and heavy metals removal efficienc of *Nostoc muscorum* and *Anabaena subcylindrica* in sewage and industrial wastewater effluents, Environmental Toxicology and Pharmacology 19: 357-365.

Gong, R., Y. Ding, L. Huijun, Q. Chen, Z. Liu. 2004. Lead biosorption and desorption by intact and pretreated *Spirulina maxima* biomass, Chemosphere 58: 125-130.

Inthorn, D., N. Sidtitoon, S. Silapanuntakul and A. Incharoensakdi. 2001. Sorption of mercury, cadmium and lead by microalgae. ScienceAsia 28 : 253-261.

Issabayeva, G., M. Aroua and N. Sulaiman. 2005. Removal of lead from aqueous solutions on palm shell activated carbon, Bioresource Technology 97 : 2350-2355.

Nagase, H., D. Inthron, A. Oda, J. Nishimura, Y. Kajiwara, M. Park, K. Hirata and K. Miyamoto. 2005. Improvement of Selective Removal of Heavy Metals in Cyanobacteria by NaOH Treatment, Bioscience and Bioengineering 99 : 372-377.

Raungsomboon, S., A. Chidthaisong, B. Bunnag, D. Inthorn and N. Harvey. 2006. Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa*, Water Reseach 40 : 3759-3766.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sheng, P., Y. Ting, J. Chen and L. Hong. 2004. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms, Colloid and Interface Science 275 : 131–141.

Singh, S., S. Pradhan and L. C. Rai. 1997. Comparative assessment of Fe^{3+} and Cu^{2+} biosorption by field and laboratory-grown *Microcystis*, Process Biochemistry 33 : 495-504.

http://www.elib.ipst.ac.th/elib

http://www.fisheries.go.th/industry/news/

http://www.library.kmitnb.ac.th/projects/sci/IC/ic0053t.html

http://www.techno.msu.ac.th/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้