



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การกำจัดสีย้อม เบสิค แอซิด และรีแอคทีฟโดยการใช่ไซยาโนแบคทีเรีย
Nostoc muscorum ที่มีชีวิต
Biosorption of basic, acid and reactive dye by living
cyanobacterium *Nostoc muscorum*



รศ. ดร. สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์
ผศ. ดร. ปวีณา ทวีกิจการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557
คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



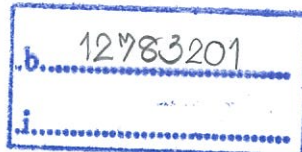
รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การกำจัดสีย้อม เบสิค แอซิด และรีแอกทีฟโดยการใช่ไซยาโนแบคทีเรีย
Nostoc muscorum ที่มีชีวิต
Biosorption of basic, acid and reactive dye by living
cyanobacterium *Nostoc muscorum*

รศ. ดร. สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์
ผศ. ดร. ปวีณา ทวีกิจการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557
คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
88217
2557



สาขา.....
เอกสารนี้เก็บ.....
เลขทะเบียน 142865
ในวารสารได้.....
ในเดือน.....ปี..... - 6 ส.ย. 2559

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การกำจัดสีย้อม เบสิค แอซิด และรีแอคทีฟโดยการใช้อนุภาคที่เรีย *Nostoc muscorum* ที่มีชีวิต

แหล่งเงิน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557

หัวหน้าโครงการและผู้ร่วมโครงการวิจัย รศ. ดร. สุวีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

ผศ. ดร. ปวีณา ทวีกิจการ

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การศึกษาการใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่มีชีวิตดูดซับสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ Malachite Green (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red (acid dye) โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ (ค่าพีเอช ระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ) ที่มีผลต่อการดูดซับของสาหร่าย พบว่าสาหร่าย *Nostoc muscorum* ดูดซับสีย้อม Malachite Green ได้สูงสุดที่พีเอช 5 ($24.29 \pm 0.26\%$) ส่วนสีย้อม Benefix Blue ดูดซับได้สูงสุดที่พีเอช 2 ($84.86 \pm 0.83\%$) และสีย้อม Benewol Red ดูดซับได้สูงสุดที่พีเอช 3 ($90.30 \pm 0.23\%$) โดยพบว่าระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อม Malachite Green, Benefix Blue และ Benewol Red อยู่ที่ 6, 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ สาหร่าย *Nostoc muscorum* มีรูปแบบการดูดซับสีย้อมแบบ Langmuir adsorption isotherm โดยมีค่าการดูดซับสีย้อม Malachite Green, Benefix Blue และ Benewol Red สูงสุด (Q_{max}) เท่ากับ 267.68 ± 51.26 , 322.80 ± 6.01 และ 468.98 ± 7.22 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ผลของปริมาณตัวดูดซับพบว่าค่าการดูดซับ (q) ต่อ 1 กรัม น้ำหนักสาหร่าย (mg/g) จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมลดลง โดยมีอันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน และขั้นกำหนดความเร็วในการดูดซับคือ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) จากผลการทดลองพบว่าสาหร่าย *Nostoc muscorum* สามารถนำมาใช้เพื่อการลดสีย้อมในกลุ่มแอซิดจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ : มาลาโคท์กรีน, สีรีแอคทีฟ, สีแอซิด, นอสตอค, การบำบัดน้ำเสีย

II

Research Title: Biosorption of basic, acid and reactive dye by living cyanobacterium
Nostoc muscorum

Researcher: Assoc. Prof. Dr. Suneerat Ruangsomboon

Faculty: Faculty of Agricultural Technology **Department:** Department of Fisheries
Science

ABSTRACT

The effect of pH, contact time, initial dye concentration and biomass concentration on dye (Malachite Green (basic dye), Benefix Blue (reactive dye), Benewol Red (acid dye)) removal by living *Nostoc muscorum* were studied. The maximum removal of Malachite Green, Benefix Blue and Benewol Red was showed at pH 5, 2 and 3 with percentage removal of 24.29 ± 0.26 , 84.86 ± 0.83 and $90.30 \pm 0.23\%$, respectively. The equilibrium time for Malachite Green, Benefix Blue and Benewol Red removal by *N. muscorum* was 6, 24 and 48 h. Malachite Green, Benefix Blue and Benewol Red removal by *N. muscorum* was fitted well to Langmuir adsorption isotherm with the maximum uptake capacity (Q_{max}) of 267.68 ± 51.26 , 322.80 ± 6.01 and 468.98 ± 7.22 mg/g dw respectively. The dye uptake capacity (mg/g) of *N. muscorum* was decreased when their biomass was increased. The dye uptake capacity (mg/g) of *N. muscorum* was decreased when the initial dye concentration was decreased. The order of reaction of dye removal by *N. muscorum* was pseudo-second order with film diffusion as rate limiting step. This study indicated that *N. muscorum* was an alternative promising biosorbent for acid dye.

Key words: Malachite Green, reactive dye, acid dye, *Nostoc*, wastewater treatment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

“การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก หลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557”

รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
ผศ. ดร. ปวีณา ทวีกิจการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สมมุติฐานงานวิจัย.....	2
1.5 คำสำคัญของการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดจากสีย้อม.....	3
2.2 ลักษณะของสีย้อม.....	4
2.3 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน.....	5
2.4 การกำจัดสีย้อมโดยวิธีชีวภาพ.....	5
2.5 สาหร่ายและความเหมาะสมในการนำมาดูดซับสีย้อม.....	6
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยสาหร่าย.....	7
2.7 กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม.....	10
2.8 การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการดูดซับสีย้อม.....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 การเตรียมสาหร่าย.....	16
3.2 การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม.....	16
3.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อมในพีเอชที่เหมาะสม.....	16
3.4 การหาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย.....	17
3.5 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	17
3.6 การวัดปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	20
4.1 ระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม.....	20
4.2 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม.....	21
4.3 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม (ไอโซเทอร์ม).....	22
4.4 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	28
4.5 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม.....	29
4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ประวัติผู้เขียน.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i> ที่มีชีวิต.....	21
4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ ที่จุดสมดุลโดยสาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i>	25
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับของ <i>Nostoc muscorum</i>	26
4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i>	29
4.5 เปอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i> ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน.....	31
4.6 อันดับปฏิกิริยาของสีย้อม Benewol Red RS โดย <i>Nostoc muscorum</i>	34
4.7 ความเข้มข้นของสีย้อม Benewol Red RS เริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในขั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Nostoc muscorum</i>	35

VII

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในขบวนการ Adsorption.....	14
3.1 สาหร่ายและสีย้อมหลังการดูดซับโดยสาหร่าย.....	18
4.1 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับที่ระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) โดยใช้สาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i> ปริมาณ 10 g/L ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	23
4.2 ปริมาณการดูดซับที่ระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS(acid dye) โดยใช้สาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i> ปริมาณ 10 g/L ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	24
4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ (A-C) และไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ (D-F) โดย <i>Nostoc muscorum</i>	27
4.4 เปรอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีย้อม Benefix Blue โดยสาหร่าย <i>Nostoc Muscorum</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน.....	30
4.5 การดูดซับสีย้อม Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Nostoc muscorum</i> ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	33

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทเพื่อรองรับการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำทิ้งที่ระบายจากการผลิตปล่อยจากโรงงานเหล่านี้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานหลายประเภทมีสิ่งปนเปื้อนที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น โลหะหนัก สารพิษ เชื้อโรค และ สีย้อม โดยสีย้อมจัดเป็นสีสังเคราะห์ มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อาหาร เครื่องสำอาง และมีปริมาณการใช้สีย้อมเพิ่มมากขึ้นตามการผลิต การผลิตสีย้อมทั่วโลกมีมากถึงเจ็ดแสนตันต่อปี ซึ่งประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ของสีย้อมที่ผลิตขึ้นทั้งหมดนี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีกรกำจัดออกจากน้ำทิ้ง (Aksu and Tezer, 2005; Mishra and Tripathy, 1993) การระบายน้ำที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงแหล่งน้ำทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงตามมา โดยสีย้อมจะมีความคงตัวอยู่ในแหล่งน้ำ ไม่ย่อยสลายด้วยวิธีการทางธรรมชาติ ทำให้มีปริมาณ BOD, COD ในน้ำสูงขึ้น สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite Green) ซึ่งมีการแพร่เข้าไปสะสมและตกค้างในตัวสัตว์น้ำ เมื่อมนุษย์นำมาบริโภคจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง มีอาการหายใจผิดปกติ คลื่นไส้ อาเจียน

สีย้อมมีสามกลุ่มหลักคือ basic dye, acid dye และ reactive dye ซึ่งทั้งสามกลุ่มมีคุณสมบัติและมีวิธีการบำบัดที่แตกต่างกัน ได้มีการหาวิธีการลดปริมาณสีย้อมจากน้ำเสียด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการใช้โอโซน ทึนลอยน้ำไฟฟ้า การกรองด้วยเยื่อกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน และการตกตะกอน ซึ่งล้วนมีราคาสูงและมีการสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) ปริมาณมากหลังจากการบำบัด ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป โดยวิธีหนึ่งซึ่งเป็นวิธีทางเลือกในการบำบัดสีย้อมและกำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่วิธีการดูดซับชีวภาพ (biosorption) เพราะมีประสิทธิภาพสูง จึงได้มีการพยายามในการหาตัวดูดซับที่ต้นทุนต่ำ ศักยภาพในการดูดซับสูง โดยพบว่าสาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยม เพราะมีปริมาณมากในธรรมชาติ เพาะเลี้ยงได้ง่าย วัฏจักรชีวิตสั้น และมีรายงานว่า สาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดี (Pandey et al., 2007) โดยพบว่าสาหร่ายที่มีชีวิตจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าสาหร่ายที่ตาย เพราะมีกลไกการทำงานของเซลล์ช่วยในการดูดซับ แต่พบปัญหาคือสาหร่ายขนาดเล็กเมื่อดูดซับสีย้อมเสร็จแล้ว การแยกสาหร่ายออกจากน้ำเสียทำได้ยาก เพราะขนาดสาหร่ายที่เล็กเกินไป ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการคัดเลือกสาหร่ายที่มีการรวมตัวเป็นโคโลนี หรือการรวมเป็นแผ่นในขณะที่ยังเจริญเติบโต เพื่อจะทำให้กำจัดออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย หลังจากการดูดซับสีย้อมได้ง่าย ๆ

การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตในการดูดซับสีย้อมทั้งสามกลุ่มคือ basic dye, acid dye และ reactive dye โดยทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการที่จะทำให้สาหร่ายสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุด และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ในการดูดซับสีของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc muscurum* ที่มีชีวิต (พีเอช ค่าพีเอช ระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ) ที่ทำให้ไซยาโนแบคทีเรียมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงสุด

ศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม (adsorption kinetics) ของไซยาโนแบคทีเรีย เพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาศักยภาพของไซยาโนแบคทีเรียมีชีวิต ในการกำจัดสีย้อม Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) โดยหาสภาวะในการดูดซับสีย้อมที่เหมาะสมคือ ระดับพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณไซยาโนแบคทีเรีย ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้น และศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับโดยการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับ (adsorption isotherm) อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) ขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (rate limiting step)

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

สาหร่ายมีหมู่ฟังก์ชันในการจับกับประจุของสีย้อมได้ดี หมู่ฟังก์ชันต่างชนิดสามารถจับกับสีย้อมที่แตกต่างกัน สาหร่ายมีชีวิตมีกลไกการกำจัดสีย้อมที่ดีกว่าสาหร่ายไม่มีชีวิต เพราะมีกลไกในการใช้พลังงานนำเข้าสู่เซลล์ได้

1.5 คำสำคัญของการวิจัย

มาลาไคท์กรีน, สีรีแอคทีฟ, สีแอซิด, นอสตอค, การบำบัดน้ำเสีย
Malachite Green Crystal, reactive dye, acid dye, *Nostoc*, wastewater treatment

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมและลดปริมาณของเสียอันตรายในน้ำทิ้ง และแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้ง โดยใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อม ซึ่งช่วยลดต้นทุนในขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัด
2. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับนักวิจัยท่านอื่น ๆ ต่อไปทางด้าน สาหร่ายวิทยาด้านการบำบัดน้ำเสีย ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม
3. ทำให้ประชาชนมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอันตรายและผลเสียของสีย้อมเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อหาวิธีในการป้องกัน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดจากสีย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากการตรวจสอบสารเคมีอันตรายในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณใกล้เคียงซึ่งเชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดินตรวจพบโลหะหนักและสารเคมีอันตรายที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงในน้ำและตะกอนดินในคลองที่เชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยา สารเคมีบางชนิดที่พบนั้นมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานน้ำผิวดินในประเทศไทย นอกจากนี้ยังพบสารเคมีที่ยังไม่ถูกรวบรวมอยู่ในมาตรฐานของประเทศไทยอีกด้วย ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมปนเปื้อนไปด้วยสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น สารโนนิลฟีนอล (Nonyl phenols) เป็นสารที่คงทนในสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติรบกวนการทำงานของฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิตและระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ และสาร 2-นฟทาสินามีน หรือ 2-นฟทิลเอมีน (2-Naphthalenamine หรือ 2 naphthylamine) เป็นสารที่ได้จากการสลายตัวของสีย้อมผ้าบางชนิด ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในกระเพาะปัสสาวะคน และพบสารไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (tri-iso-butyl phosphate; TiBP) ซึ่งเป็นสารพิษที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกและย้อมผ้า (กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำปีประเทศไทย, 2553)

มลพิษจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นปัญหาที่ไม่น้อยกว่าอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งผลการศึกษาน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมนี้ เป็นตัวอย่างบ่งชี้ถึงปัญหาโดยรวมของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ล้วนปล่อยลงสู่แม่น้ำหรือคลองที่เชื่อมต่อ มีรายงานถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากคลองบางนางเก็งพบปนเปื้อนสารโนนิลฟีนอลและไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (TiBP) และยังพบทองแดงและนิกเกิลสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำผิวดินของไทยถึง 2 เท่า (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537)

สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น มาลาโคท์ กรีน เป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่างๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ฝ้ายและกระดาษเป็นผงสีเขียวละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วได้สารสีออกน้ำเงิน มาลาโคท์ กรีน ที่ละลายในน้ำจะถูกดูดซึมเข้าสู่ปลาได้อย่างรวดเร็ว และสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของปลาและเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาโคท์ กรีน (Leucomalachite Green : LMG) ที่ไม่มีสี อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ตรวจพบมากที่บริเวณไขมันในช่องท้องและจะตรวจพบน้อยในน้ำเลือด เนื่องจากสามารถแพร่กระจายไปได้อย่างกว้างขวางทั่วทุกเนื้อเยื่อของปลาทำให้เกิดการสะสมและติดแน่นในเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดี และถูกกำจัดออกจากเนื้อเยื่อได้ช้าทำให้เกิดผลข้างเคียงต่างๆ มากมาย

พิษของมาลาโคท์ กรีน ต่อสัตว์น้ำ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำในการเกิดเนื้องอกและสามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ ตับ ในสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความผิดปกติทางพันธุกรรมในสัตว์น้ำ โดยการเพิ่มความยาวของสาย DNA การพัฒนาของตัวอ่อนหลังฟักออกจากไข่มีความผิดปกติไปจากเดิมถึง 3-5 เท่า เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือด ระดับของแคลเซียมและโปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่ายพืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิษของมาลาโคท์ กรีน ต่อมมนุษย์ ส่งผลต่อต่อระบบการหายใจของเซลล์ ซึ่งเป็นแหล่งสร้างพลังงานสังเคราะห์ทางเคมี ทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หากร่างกายสะสมสารเหล่านี้เข้าไปมากๆ อาจมีอาการเป็นอัมพาตที่แขน ขา จะส่งผลต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (กรมประมง, 2548) ดังนั้นจึงถือเป็นสารต้องห้าม ไม่ให้มีตกค้างในสัตว์น้ำ ซึ่งประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ ได้ออกกฏระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค (www.nfi.or.th)

สีย้อมมีหมู่ฟังก์ชันหลายประเภท โครงสร้างซับซ้อน จึงทำให้มีความคงตัวในแหล่งน้ำสูง ถูกกำจัดด้วยขบวนการตามธรรมชาติได้ยาก (Bhattacharyya and Sharma, 2004) การทิ้งน้ำที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ และทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่รุนแรงตามมา เนื่องจากความเป็นพิษโดยตรงของสีย้อม และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย (El-Sheekh et al., 2009)

น้ำทิ้งที่มาจากรองงานอุตสาหกรรมที่มีสีย้อมปนเปื้อนในความเข้มข้นที่สูง เมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี (Mohan et al., 2002) สีย้อมเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้น้ำมีสีเข้มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน (Gupta et al., 2004a) โดยสีจะบดบังการส่องแสงลงในแหล่งน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และสีย้อมยังเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยตรง เพราะมีโลหะต่าง ๆ และคลอไรด์ ฯลฯ ปะปนอยู่

นอกจากนี้สีย้อมในน้ำทิ้งยังทำให้มีปริมาณ BOD, COD ในระบบนิเวศของแหล่งน้ำสูงขึ้น (Bekci, 2009) สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษสูงต่อปลา ส่วนพิษต่อแพลงก์ต่อนั้นขึ้นกับชนิดของแพลงก์ตอน บางชนิดอาจได้รับพิษจากสีย้อมอย่างรุนแรง แต่บางชนิดกลับไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ (Novotny et al., 2006) สีย้อม Malachite green เป็นสีย้อมในกลุ่ม cationic dye นิยมใช้เป็นยาฆ่าฟองน้ำ ปรสิตรในสัตว์น้ำ สารนี้มีความเป็นพิษสูงเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ โดยสามารถสะสมในตัวสัตว์น้ำ และเมื่อมีผู้สูดสัตว์น้ำเหล่านั้นมาบริโภค สารนี้จะมีผลทำลายเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และทำให้เป็นมะเร็งตับ (www.nfi.or.th) ดังนั้นการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก

2.2 ลักษณะของสีย้อม

สีย้อม (Dyes) เป็นวัตถุที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ พอกหนัง เครื่องสำอาง งานพิมพ์กระดาษ เคลือบกล่องกระดาษ พลาสติก ยา และอาหาร ฯลฯ (Bekci, 2009; El-Sheekh et al., 2009) และมีปริมาณการใช้เพิ่มมากขึ้นตามกำลังผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้น (Mohan et al., 2002) เฉพาะในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้สีย้อมมากกว่า 10,000 ประเภทที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละปีทั่วโลกมีการผลิตสีมากถึง 700,000 ตัน (Aksu and Tezer, 2005; Daneshvar et al., 2004b, 2007b; Gupta et al., 2000)

สีย้อมเป็นสารเคมีจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิมตัวสามารถเปลี่ยนให้เป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใยและกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป สีย้อมจะยึดติดกับเส้นใยด้วยอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force), แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) แรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป

บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโคเวเลนต์ การเกิดสีของสีย้อมให้มองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอม

สีแอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง ประกอบด้วยหมู่ซัลโฟเนต (SO-3), คาร์บอกซิเลต (CO-3) หรือ ซัลเฟต (SO-4) (Ozer et al. 2006) สีแอซิด เป็นแอนไอออนิก (anionic) ถูกผลิตขึ้นเพื่อให้ติดบนเส้นใยขนสัตว์ นิยมใช้ย้อมผ้าไหมและเส้นใยโปรตีนชนิดอื่นๆ เป็นสีที่มีความสว่างสดใสมากและมีเฉดสีต่างๆ มากสามารถละลายตัวได้ง่ายและรวดเร็วในน้ำร้อน ดูดซึมติดเส้นใยได้ง่ายและรวดเร็ว มีคุณสมบัติคงทนต่อแสงแดด การขัดถูก เทื่อ น้ำและการซักฟอกอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดีมาก

สีเบสิก (basic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและไยอะคริลิก ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนแต่ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ประกอบด้วยหมู่ แอมโมเนียมไอออน (NR+4) และไนโตรเนียมไอออน (NO+2) (Marungrueng and Pavasant, 2007)

2.3 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน

การกำจัดสีย้อมโดยทั่วไป วิธีในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนที่ใช้อยู่มีหลายวิธี อาจมีการใช้วิธีทางชีวภาพร่วมกับวิธีทางเคมีและกายภาพ เพื่อให้สามารถลดปริมาณสีย้อมได้มากที่สุด เช่นการใช้สารเคมี การใช้โอโซน การใช้แสงให้เกิดการออกซิเดชัน การใช้ไฟฟ้า การใช้รังสี ไซริเวอร์ส ออสโมซิส ใช้การแลกเปลี่ยนไอออน การกรองด้วยเยื่อกรอง และการทำให้รวมกลุ่มตกตะกอน (Daneshvar et al., 2004a, b; Gupta et al., 2004a, b; Jain et al., 2003; Mittal et al., 2005; Robinson et al., 2001) แต่พบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมแบบดั้งเดิมไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้หรือกำจัดได้มีประสิทธิผลต่ำ มีราคาแพง มีข้อจำกัดในการใช้ และยังสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป (Kumar et al., 2006)

การกำจัดสีย้อมโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตันรวมกับการตกจม เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียนั้นน้อย (แต่ยังเป็นค่าที่เป็นอันตรายต่อแหล่งน้ำ) การใช้สารเคมีจะมีต้นทุนสูง ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณมาก ๆ ซึ่งการใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพในการกำจัดสีจากน้ำเสียต่อจากขั้นตอนการตกตะกอนด้วยสารเคมีจะมีความเหมาะสมมากกว่า (จินทิมา, 2552)

2.4 การกำจัดสีย้อมโดยวิธีชีวภาพ

วิธีที่นิยมในปัจจุบันในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม คือใช้วิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี และส่วนใหญ่ในอดีตตัวดูดซับที่นิยมคือคาร์บอนกัมมันต์ ที่มีค่าการดูดซับสีย้อมหลายประเภทได้ค่อนข้างสูง (Choy et al., 1999; Robinson et al., 2001) แต่ปัญหาคือราคาของคาร์บอนกัมมันต์ยังมีราคาสูง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาวิธีบำบัดที่มีค่าใช้จ่ายลดลง เช่นการหาประเภทตัวดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เช่นการใช้เปลือกส้ม (Namasivayam et al., 1996) กากผลปาล์ม (Nassar and Magdy, 1997) ถ่าน (Ho

and McKay, 1998) เปลือกไม้ เศษฝ้าย แกลบ (McKay et al., 1999) ชานอ้อย (Khattari and Singh, 1999) ถั่วจากชานอ้อย (Gupta et al., 2000) ถั่วจากไม้ (McKay et al., 2003) และสาหร่าย (Marungrueng and Pavasant, 2007; Bekci et al., 2009; Hoffmann and Bauknecht, 1999; Ozer et al., 2006a, b; El-Sheekh et al., 2009)

สาหร่ายเป็นตัวดูดซับชีวภาพที่มีปริมาณมากในธรรมชาติ หลายชนิดไม่มีการนำไปใช้เพื่อเพิ่มมูลค่า และยิ่งกว่านั้นยังพบมีรายงานว่าสาหร่ายบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์ (Marungrueng and Pavasant, 2007)

2.5 สาหร่ายและความเหมาะสมในการนำมาดูดซับสีย้อม

ความเหมาะสมในด้านคุณภาพของสาหร่ายในการกำจัดสีย้อม : การดูดซับทางชีวภาพในสาหร่ายส่วนใหญ่เกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ผนังเซลล์เป็นส่วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง เมื่อสัมผัสกับสารละลายสีย้อม ไอออนของสีย้อมจะจับกับผนังเซลล์หรือกับเยื่อหุ้มเซลล์ของสาหร่าย (Rothstein, 1959) โดยที่ผิวนอกสุดของเซลล์สาหร่ายทั้งกลุ่มโปรคาริโอตและยูคาริโอต ประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต (พอลิแซ็กคาไรด์) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะจับกับประจุที่มีอยู่ในสีย้อม (Marungrueng and Pavasant., 2006)

หมู่ฟังก์ชันที่พบที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายที่ทำหน้าที่จับสีย้อมคือหมู่คาร์บอนิล (C=O) กลุ่ม -COOH, SO_4^{2-} , $-NH_2$, OH และ -SH (Volesky, 1990; Percival, 1967; Eccles, 1999) หมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และซัลโฟนิล สามารถแตกตัวได้และกลายเป็นประจุลบ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถไปจับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นโครงสร้างของสีย้อมเบสิก เช่น โครงสร้างจตุรภูมิของแอมโมเนียมไอออน (NH^+) และไนโตรเนียมไอออน (NO^+) ซึ่งทำให้สามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ (Marungrueng and Pavasant, 2007)

ในสาหร่ายหมู่คาร์บอกซิลเป็นตัวหลักที่จับไอออน โดยหมู่คาร์บอกซิลจะพบใน glucuronic ของสาหร่ายสีเขียว และยังพบ amino acid, carboxyl, sulfhydryl, amine, amide, amidazole ด้วย ซึ่งพวกนี้ประกอบอยู่ที่ผนังเซลล์และทำหน้าที่จับสีย้อมได้เช่นกัน สาหร่ายหลายชนิดแสดงศักยภาพในการลดปริมาณสีย้อมและทำให้สีจางลงได้ เช่น *Oscillatoria* sp., *Chlorella pyrenoidosa* และ *C. vulgaris* สามารถกำจัดสีย้อมกลุ่ม azo dye ได้ดี (สีย้อมที่มี -N=N- เป็นองค์ประกอบ) (Acuner and Dilek, 2004) สาหร่ายขนาดเล็กในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย และสาหร่ายสีเขียว สามารถกำจัดสีย้อมจากสารละลายโดยการสะสมไว้ในเซลล์ หรือการเปลี่ยนรูปให้ไม่เป็นพิษ แต่ความสามารถในการกำจัดขึ้นกับชนิดของสาหร่ายขนาดเล็กเหล่านั้น (Lei et al., 2002)

และพบรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถในการทำลายสีย้อมได้สูง โดยการพัฒนาระบบเอนไซม์เพื่อใช้ในการลดสี (decolorisation) และลดปริมาณแร่ธาตุ ไอออนต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในสีย้อม (mineralization) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แน่นอน (Dandey et al., 2007) และมีข้อดีอีกคือขนาดของสาหร่ายจะมีขนาดใหญ่สามารถกำจัดได้ง่ายกว่าการใช้กลุ่มแบคทีเรียหรือฟังไจเป็นตัวดูดซับสีย้อม

ข้อดีของการใช้สาหร่ายในการดูดซับสีย้อม : สาหร่ายทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและสาหร่ายขนาดใหญ่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ (Hu, 1998; Volesky, 1990; Van-Hille et al, 1999) ซึ่งข้อดีของสาหร่ายขนาดเล็กคือ สามารถเพาะเลี้ยงเพื่อขยายให้มีปริมาณมากได้เร็ว ไม่ต้องรอเก็บเกี่ยวจากธรรมชาติเหมือนสาหร่ายขนาดใหญ่ซึ่งผลผลิตจะขึ้นกับฤดูกาล แต่มีต้นทุน

ในการเพาะเลี้ยง (Lee, 2001) สาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสี้อมได้อย่างเฉพาะเจาะจงคือสามารถเลือกดูดสี้อมบางชนิดได้ และสาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสี้อมหลาย ๆ ชนิดได้พร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังสามารถล้าง (desorption) สี้อมออกมาจากเซลล์สาหร่ายได้ ซึ่งการที่สามารถล้างสี้อมออกมาได้ทำให้สามารถนำสี้อมเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่ และตัวดูดซับหรือสาหร่ายก็สามารถนำกลับไปใช้ดูดซับสี้อมใหม่ได้

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี้อม โดยสาหร่าย

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสี้อมของสาหร่ายนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสี้อม ปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น (Akhtar et al., 2003) โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับสี้อมโดยสาหร่ายมีดังนี้

พีเอช : ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมโดยสาหร่าย เพราะค่าพีเอชมีความเกี่ยวข้องกับการละลายของสี้อมในน้ำ และการทำงานของหมู่ฟังก์ชันหรือตำแหน่งยึดจับที่อยู่นิวเคลียสของสาหร่าย หมู่ฟังก์ชันแต่ละประเภทมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid dissociation constant- pKa) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำงานหรือจะสามารถยึดจับกับไอออนของสี้อมได้ก็ต่อเมื่อมีค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมคือเท่ากับหรือสูงกว่าค่า pKa นั้นเอง โดยมีรายงานถึงค่า pKa ของหมู่ carboxyl, phosphate และ hydroxyl ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะทำหน้าที่ในการจับไอออนได้ดีที่พีเอชในช่วง 2-5, 5-9 และ 9-12 ตามลำดับ (Cho et al., 1994)

พีเอชยังมีผลต่อการละลายของสี้อม โดยสี้อมแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายได้แตกต่างกันไป ซึ่งสาหร่ายจะกำจัดสี้อมได้ดีเมื่อสี้อมอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่เป็นไอออน แต่อย่างไรก็ตาม แม้พีเอชต่ำจะทำให้สี้อมละลายซึ่งทำให้สาหร่ายสามารถจับหรือกำจัดสี้อมเหล่านั้นได้ดี แต่พีเอชต่ำมีข้อเสียคือมีปริมาณ H^+ สูง ซึ่งสามารถไปแข่งขันกับประจุบวกของสี้อม ในการจับกับตำแหน่งยึดจับที่นิวเคลียสสาหร่ายได้ ดังนั้นพีเอชที่ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมของสาหร่ายลดลงได้เช่นกัน (Ahner et al., 1994; Matheickal et al., 1999) แต่ยกเว้นในกรณีที่มีสี้อมบางชนิดมีค่าเป็นประจุลบที่พีเอชต่ำ พบว่าการดูดซับที่พีเอชต่ำเกิดได้ดี เป็นเพราะประจุลบของสี้อม จับกับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่าย

โดยพบว่าเมื่อนำสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* มาดูดซับสี้อม acid dyes ซึ่งเป็นสี้อมที่มีไอออนลบ ที่พีเอชของสารละลายสี้อมเท่ากับ 2-6 พบว่าสาหร่ายดูดซับสี้อมได้ดีที่พีเอช 2-3 (Ozer et al., 2005) ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสี้อม เมื่อ pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประจุลบที่อยู่นิวเคลียสของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นและประจุบวกลดลง นิวเคลียสที่มีประจุลบจะไม่ส่งผลให้ดูดซับสี้อมที่มีไอออนลบ โดยทั่วไปการดูดซับสี้อมที่เป็นกรดจะดูดซับได้มากในสภาวะสารละลายที่เป็นกรดมากกว่าที่เป็นกลางและด่าง (Ozer et al., 2006a)

จากการทดลองของ Sevçil and Gonul (2006) ได้มีการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟ Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB โดยสาหร่ายสด *Synechococcus* sp. ปริมาณ 1 mL ที่พีเอชเริ่มต้น 7.5, 8.5 และ 9.5 และความเข้มข้นของสี้อม 25 mg l^{-1} หลังจากการสัมผัส 9 วัน จะมีค่าการดูดซับระหว่าง 7.5 - 31.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสี

ย้อม Reactive Red RB จะมีการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ที่ค่าพีเอช 9.5 ส่วนการดูดซับสีย้อม Remazol Blue และ Reactive Black B จะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดที่ 8.5

ในการทดลองของ Sevgil and Gonul (2006) ได้ทดลองการดูดซับสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB โดย *Phormidium* sp. ที่มีชีวิต ปริมาณ 1 mL ที่พีเอชเริ่มต้น 7.5, 8.5 และ 9.5 ความเข้มข้นของสีย้อม 25 mg l^{-1} บ่มที่อุณหภูมิ 45°C หลังจากการสัมผัส 9 วัน พบว่า การดูดซับสีย้อม Reactive Red RB จะมีค่าระหว่าง 10.7 - 19.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 9.5 ส่วนการดูดซับสีย้อม Remazol blue และ Reactive Black B จะมีค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดที่ 8.5 ผลการดูดซับสีย้อม Remazol blue สูงสุดที่ 33.5 เปอร์เซ็นต์ และ Reactive Black B สูงสุดที่ 44.5 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ในการดูดซับสีย้อมโดย *Phormidium* sp. ที่ผ่านการตรึงเซลล์ (Living Immobilized *Phormidium* sp.) ปริมาณ 0.1 กรัม ได้มีการทดสอบกับสีย้อม Remazol Blue และ Reactive Black B ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 25 mg l^{-1} โดยมีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 6.5, 7.5, 8.5 และ 9.5 บ่มที่อุณหภูมิ 45°C ออคาเซลเซียส หลังจากการสัมผัส 6 วัน Sevgi et al. (2008) พบว่า ค่า pH ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสีย้อม อยู่ที่ 8.5 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Sevgil and Gonul (2006)

ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสีย้อม : ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับโดยสาหร่ายขึ้นกับระยะเวลาในการที่สาหร่ายนั้นสัมผัสกับสารละลาย หรือระยะเวลาที่ตำแหน่งยึดจับสัมผัสกับไอออนของสีย้อมในสารละลายนั่นเอง โดยเมื่อสาหร่ายเริ่มสัมผัสกับไอออนของสีย้อมจะเกิดการดูดซับที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งยึดจับพื้นที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายนั้นว่างอยู่และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งตำแหน่งยึดจับที่ผิวของสาหร่ายดูดซับสีย้อมไว้เต็มแล้วทำให้ปริมาณที่ถูกดูดซับไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ณ จุดนี้คือจุดสมดุลของการดูดซับ (equilibrium)

ซึ่งการเข้าสู่จุดสมดุลของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อมขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและชนิดของสีย้อมที่แตกต่างกันด้วย เพราะชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกันทำให้รูปร่างเซลล์หรือกลุ่มเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันมีผลต่อพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชันตำแหน่งของตัวยึดจับหรือจำนวนตัวยึดจับบนผิวสาหร่ายแต่ละชนิดนั้น ๆ ที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ช้า เร็ว ต่างกัน โดยมีรายงานการศึกษาว่า การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentilifera* ดูดซับสีย้อม basic dye (astrazon blue) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 60 นาที (Marungrueng and Pavasant, 2006), การใช้สาหร่าย *Enteromorpha* ดูดซับสีย้อม basic dye (methylene blue) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 90 นาที (Ncibi et al., 2009), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสีย้อม reactive dye (synazol) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 18 ชั่วโมง (Khalaf, 2008)

ความเข้มข้นของสีย้อม : ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดสีย้อมโดยสาหร่าย ความเข้มข้นสีย้อมที่สูงในสารละลายจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับระหว่างผนังเซลล์ของสาหร่าย จึงทำให้มีแรงผลักของประจุสูง ทำให้การขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายเกิดได้แรงและเร็ว ทำให้กำจัดสีย้อมได้เร็วและได้มาก ความเข้มข้นเริ่มต้นมีความสำคัญในการเป็นแรงผลักดันให้ชนะแรงต้านของมวลการขนถ่ายของโมเลกุลระหว่างน้ำและของแข็ง Ozer et al. (2006b) ได้

ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่อการดูดซับของ AR 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่ 25-3600 mg/L พบว่าที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่ำ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นปริมาณสีย้อมจะถูกดูดเพิ่มขึ้นแบบ linear

ผลของความเข้มข้นของสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB ในการดูดซับโดย *Synechococcus* sp. ที่มีชีวิต ปริมาณ 1 mL ได้ถูกตรวจสอบที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่าง 11.0 - 88.4 mgL⁻¹ หลังจากการสัมผัส 9 วัน ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส Sevgil and Gonul (2006) พบว่า การดูดซับสีย้อม Remazol blue และ Reactive Black B โดย *Synechococcus* sp. ที่มีชีวิต ไม่สามารถดูดซับได้ที่ความเข้มข้นของสีย้อมสูง แต่สำหรับสีย้อม Reactive Red RB สามารถดูดซับได้ 8.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นสูงถึง 75 mgL⁻¹

ผลของความเข้มข้นของสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB ในการดูดซับโดย *Phormidium* sp. ที่มีชีวิต พบว่า Sevgil and Gonul (2006) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมในการดูดซับสีย้อมโดย *Phormidium* sp. มีชีวิต ปริมาณ 1 mL ได้ถูกตรวจสอบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันระหว่าง 10.5 - 78.4 mgL⁻¹ การสัมผัสระหว่าง 9 - 14 วัน พบว่า การดูดซับสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB ที่ดีที่สุดในช่วงความเข้มข้น 10.5 - 13.9 mgL⁻¹ ซึ่งการดูดซับสีย้อมที่สูงที่สุด คือ Reactive Black B 90%, Remazol blue 80% และ Reactive Red RB 50% โดยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นการดูดซับสีย้อมจะลดลง

ผลของอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB โดย *Synechococcus* sp. ที่มีชีวิต ปริมาณ 1 mL ในการทดลองได้มีการเลี้ยงเชื้อในอาหารผสมสีย้อมที่ความเข้มข้น 15 mgL⁻¹ และที่อุณหภูมิ 40, 45, 50 องศาเซลเซียส หลังจากการสัมผัส 9 วัน พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การดูดซับสีย้อมของ *Synechococcus* sp. ที่มีชีวิตลดลง ซึ่งเกิดจาก *Synechococcus* sp. ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในความเข้มข้นและอุณหภูมิที่สูง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ *Synechococcus* sp. ที่มีชีวิตสามารถดูดซับสีย้อม Reactive Red RB, Remazol blue และ Reactive Black B ได้ดีที่สูงสุดถึง 45.2, 69.2 และ 68.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Sevgil and Gonul, 2006)

ผลของอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม Remazol blue, Reactive Black B และ Reactive Red RB โดย *Phormidium* sp. ที่มีชีวิต ปริมาณ 1 mL ในการทดลองได้มีการเลี้ยงเชื้อในอาหารผสมสีย้อมที่ความเข้มข้นของสีย้อมแตกต่างกัน และที่อุณหภูมิ 40, 45, 50 องศาเซลเซียส หลังจากการสัมผัส 9 วัน พบว่าการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจาก *Phormidium* sp. ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในความเข้มข้นและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งการดูดซับที่สูงที่สุดจะอยู่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสีย้อม 12 mgL⁻¹ โดย *Phormidium* sp. สามารถดูดซับสีย้อม Remazol blue ได้ 88.3% และ Reactive Black B ได้ 97.8%

ผลของอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อม โดย Living Immobilized *Phormidium* sp. ปริมาณ 0.1 กรัม ในการทดลองได้มีการเลี้ยงเชื้อในสีย้อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส หลังจากการสัมผัส 7 วัน พบว่าความผันแปรของอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อ การกำจัดสีย้อม เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง และสีย้อมที่ความ

เข้มข้นต่ำร่วมกับอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส จะทำให้ระดับการดูดซับมีค่ามากที่สุด (Sevgi et al. 2008)

ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ : ปริมาณหรือความหนาแน่นของสาหร่าย (ตัวดูดซับ) ในสารละลายสีเขียว (biomass concentration/ density of biosorbent) แสดงถึงปริมาณของตำแหน่งยึดจับ เมื่อจำนวนสาหร่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสีเขียวที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (Carr et al., 1998) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับถึงแม้จะเพิ่มปริมาณสีเขียวที่ถูกดูดซับหรือถูกกำจัด แต่เป็นผลทำให้ปริมาณสีเขียวที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักสาหร่ายลดลง (Franklin et al., 2001) ซึ่งเป็นเพราะว่าที่ตัวดูดซับจำนวนมากจะเกิดการเกาะกลุ่มกันของตัวดูดซับในระหว่างการดูดซับ หรือเป็นการลดระยะห่างระหว่างตัวดูดซับลง ทำให้จำนวนตำแหน่งยึดจับสำหรับจับกับสีเขียวลดลง หรือทำให้พื้นที่ผิวสำหรับจับสีเขียวลดลง เพราะตัวดูดซับเกาะติดกันเอง (Ahuja et al. 1999a; Donmez et al, 1999) ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณตัวดูดซับที่สูงสามารถชักนำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ

2.7 กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีเขียว

ไอโซเทอร์มการดูดซับ : การใช้สาหร่ายดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนมีศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) จนอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับเรียกว่าเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลย์ (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและภายใต้อุณหภูมิคงที่

ไอโซเทอร์มของการดูดซับนั้นเป็นเส้นกราฟที่สร้างขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับของสารหรือไอออนที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับไว้ได้ เส้นกราฟนี้เป็นเส้นที่เกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ในการอธิบายค่าไอโซเทอร์มนั้นนิยมเปลี่ยนจากเส้นโค้งเป็นเส้นตรงด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายความสามารถในการดูดซับ และที่นิยมได้แก่ Langmuir model (Q_{max} ; mg/g) และ Freundlich model (K_F ; $Vg^{1/n}$) ซึ่งทำให้สามารถประเมินค่าความสามารถในการดูดซับสีเขียวของสาหร่ายได้ โดยไอโซเทอร์มของ Langmuir มีลักษณะการดูดซับเป็น homogeneous binding site คือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งยึดจับที่เหมือนกัน Langmuir adsorption isotherm มีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{Q_{max} K_a C_e}{1 + K_a C_e} \quad \text{สมการที่ 1}$$

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_{max}} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m} \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดย q_e คือปริมาณสีเขียวที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่าย (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง), Q_{max} คือ ปริมาณสีเขียวสูงสุด (maximum capacity) ที่สาหร่ายสามารถดูดซับได้ (มิลลิกรัมต่อกรัม

น้ำหนักแห้ง), C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), K_o คือ ค่าคงที่ในการดูดซับสีย้อมของสารละลายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพันธ์ของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ไอโซเทอร์มของ Freundlich มีลักษณะการดูดซับเป็น heterogeneous binding site พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งยึดจับที่ต่างชนิดกัน ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว Freundlich adsorption isotherm มีสมการดังนี้

$$q_e = K_F * C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 3}$$

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง), C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), K_F และ $1/n$ คือ ค่าคงที่, ค่า K_F เป็นดัชนีถึงความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม และ n ความแรงในการดูดซับ (adsorption intensity) และไม่มีหน่วย

การดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายนั้นไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm โดยในแต่ละการทดลองจะมีการนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสีย้อมโดยที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir แสดงว่ามีพื้นผิวของตัวดูดซับแบบ homogeneous มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอนและไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich แสดงว่าตัวดูดซับประกอบด้วยพื้นผิวที่เป็น heterogeneous ซึ่งมีความแตกต่างของชั้นซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่งยึดจับของการดูดซับ

Vijayaraghavan and Yeoung-Sang Yun (2008) ได้ทำการศึกษาค่าการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 โดยการใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Laminaria* sp. ที่เก็บมาได้จากบริเวณชายฝั่ง Pohang ประเทศเกาหลี โดยนำเซลล์สาหร่ายมาล้างด้วยน้ำกลั่น ตากให้แห้งและบด ก่อนนำมาผ่านกระบวนการ Protonation ในอัตราส่วนเซลล์สาหร่าย 10 กรัมต่อลิตร ด้วยสารละลาย 0.1 M HCl เป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นก็นำเซลล์สาหร่ายมาหาค่า Adsorption isotherm ว่ามีการดูดซับของสีย้อม Reactive Black 5 ในรูปแบบใดซึ่งใช้รูปแบบการหาค่า isotherm 2 รูปแบบคือ Langmuir model , Freundlich model ซึ่งได้ผลคือ *Laminaria* sp. มีการดูดซับ Reactive Black 5 สูงสุด (Q_{max}) ที่ได้มีค่า 101.5 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่า pH 1 และ อุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า Freundlich model เป็นรูปแบบที่สามารถอธิบาย Adsorption isotherm ได้ดีกว่ารูปแบบของ Langmuir

จลนศาสตร์การดูดซับ : เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพ Marungrueng and Pavasant (2007) รายงานว่าโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้โดย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มต้นด้วยการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ การแพร่เข้าสู่ภายใน และการดูดซับของสารละลายผ่านเข้าสู่ภายในผิวหน้าของรูพรุน และช่อง capillaries ของตัวดูดซับระหว่าง 3 ขั้นตอนนี้ ขั้นตอนที่สุดท้ายมีความสัมพันธ์กับความเร็ว และไม่สามารถพิจารณาอัตราของขั้นต้น การดูดซับสีย้อมถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และแพร่เข้าสู่อนุภาค

การดูดซับสีย้อมโดยการใช้สารถย่นนั้นพบว่าการประยุกต์ใช้รูปแบบของสมการเพิ่มขึ้นให้เหมาะกับการดูดซับ โดยสมการที่ได้รับการยอมรับในการศึกษาอันดับของปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) และ ปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน (Pseudo-second order reaction) ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) มีสมมติฐานคืออัตราการเข้าแทนที่หรือการเข้าจับกับตำแหน่งการยึดจับของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนกับจำนวนของตำแหน่งยึดจับที่ว่าง

โดยแสดงได้ในรูปของสมการคือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t)$$

สมการที่ 5

โดย

q_e คือ ปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับเอาไว้ได้ที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับเอาไว้ได้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Pseudo first-order (ลิตรต่อนาที)

และสามารถเขียนสมการเป็นรูปเส้นตรงได้เป็น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$$

สมการที่ 6

ปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน (Pseudo-second order reaction) มีสมมติฐานคืออัตราการเข้าแทนที่หรือการเข้าจับกับตำแหน่งการยึดจับของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนกำลังสองกับจำนวนของตำแหน่งยึดจับที่ว่าง

โดยแสดงได้ในรูปของสมการคือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2$$

สมการที่ 7

โดย

q_e คือ ปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับเอาไว้ได้ที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

q_t คือ ปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับเอาไว้ได้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Pseudo-second order (กรัมต่อมิลลิลิตรต่อนาที)
 และสามารถเขียนสมการเป็นรูปเส้นตรงได้เป็น

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

สมการที่ 8

จากการทดลองของ Marungrueng and Pavasant (2007) ได้ศึกษารูปแบบจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเบสิก 3 ชนิด ได้แก่ Astrazon Blue FGRL(ALGA/AB), Astrazon Red GTLN(ALGA/AR) และ methylene blue(ALGA/MB) โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* โดยใช้สาหร่ายปริมาณ 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้รูปแบบของจลนพลศาสตร์การดูดซับ 2 แบบคือ Pseudo-First order และ Pseudo-second order พบว่ารูปแบบ Pseudo-second order สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับได้ดีกว่าเมื่อดูจากค่า correlation coefficients (R^2) ซึ่งมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากจลนพลศาสตร์การดูดซับรูปแบบ Pseudo-second order เป็นการดูดซับที่มาจาก การดูดซับทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของผิวหน้าสาหร่ายและโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งที่ผิวหน้าสาหร่ายมีประจุเป็นลบในขณะที่โมเลกุลของสีย้อมมีประจุเป็นบวก

ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining / limited step) คือขั้นควบคุมอัตราเร็วของขบวนการทั้งหมด จากกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ มีการเกิดขึ้นตอน 4 ขั้นตอนย่อย (ภาพที่ 2.1) แต่ละขั้นตอนจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วและช้าแตกต่างกัน โดยขั้นตอนที่เกิดช้ามากที่สุด จะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining step) (สุนีรัตน์, 2549)

กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism) กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน

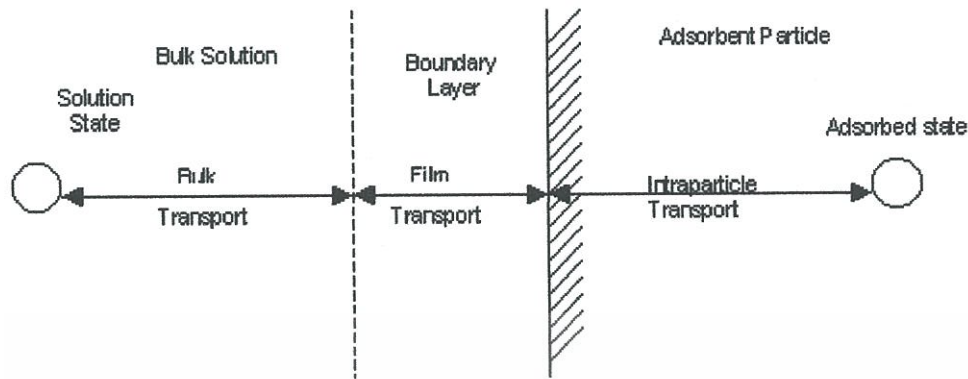
ขั้นตอนที่ 1 Bulk Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ (mass transfer) จากสารละลาย (bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 Film Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ ข้ามฟิล์มน้ำ (boundary layer) ไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 Intra-particle Transport หรือ Pore Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ (mass transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (adsorbent particle)

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในขบวนการ Adsorption
ที่มา : Anonymous (2001)

Marungrueng and Pavasant (2007) ทำการศึกษาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบสิก 3 ชนิดคือ Astrazon Blue, Astrazon Red และ methylene blue โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* โดยรายงานว่าการวิเคราะห์ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่อง 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกันคือ เริ่มต้นด้วยการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ (film diffusion), ขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) และขั้นการดูดซับของสารละลายผ่านเข้าสู่ภายในผิวหน้าของรูพรุนและช่อง capillaries (Adsorption) แต่เนื่องจากขั้นตอนที่ 3 คาดว่าจะเกิดขึ้นเร็วมากจึงไม่ได้นำมาพิจารณาเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ และจากการศึกษาพบว่าทั้งการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ (film diffusion) และขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) เป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.8 การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการดูดซับสีย้อม

เนื่องจากในแหล่งน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการปนเปื้อนของสีย้อมหลากหลายชนิดและหลากหลายประเภท เช่น reative red 198, basic cationic, basic fuchsin และสีย้อมประเภท azo dyes ได้แก่ methyl Red, orange II, G-Red (FN-3G) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพของ *Nostoc lincki* และ *Oscillatoria rubescens* ในการกำจัดสีย้อมที่แตกต่างกัน ตามสภาพการเจริญเติบโตและโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมชนิดนั้น

Mostafa et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วย *Oscillatoria rubescens* มีชีวิต ปริมาณ 3 mL (2×10^4 cell/mL) ในอาหารสูตร Allen medium ผสมสีย้อมที่ความเข้มข้น 5-10 ppm หลังจากการสัมผัสระหว่าง 3-7 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Methyl red และ Basic cationic ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถกำจัดได้ถึง 81.30 และ 85.80 % ตามลำดับ แต่พบว่ามีความมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมประเภท Basic Fuchsin สูงที่สุดถึง 94.85 % และมีรายงานเพิ่มเติมว่าสารประกอบเอโซบางชนิด เช่น Methyl red, Orange II และ G-Red สามารถนำมาใช้ประโยชน์ให้เป็นคาร์บอนเดี่ยวและแหล่งไนโตรเจนได้ ในการลดสีย้อมประเภทเอโซโดยสาหร่าย เนื่องจากสายเอโซจะแตกสลายด้วยเอนไซม์เอโซจาก *Oscillatoria*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rubescens และ aromatic amine สารประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะเปลี่ยนเป็นตัวกลางอื่นๆ ดังนั้นจึงได้มีการค้นพบว่าสาหร่ายจะสามารถใช้ประโยชน์จาก aromatic amine ในการทำลายโครงสร้างของสีย้อม

การกำจัดสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วย *Nostoc lincki* Mostafa et al. (2009) รายงานว่า *Nostoc lincki* มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Methyl red ความเข้มข้น 20 ppm ได้ถึง 81.96% อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมประเภท Basic cationic ความเข้มข้น 20 ppm สูงที่สุดถึง 91.52% และสีย้อมประเภท Basic Fuschin ได้ 83.78 % เนื่องจาก Methyl red สามารถกระตุ้นให้ *Nostoc lincki* สร้าง azo enzyme ส่วน Basic cationic และ Basic Fuschin มีหมู่ไฮดรอกซิล โดยสาหร่ายชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Orange II และ G-Red (FN-3G) น้อยที่สุดเพียง 5–33 % เนื่องจากไม่สามารถเหนี่ยวนำ azo enzyme ได้ ในขณะที่เดียวกัน Sharma et al. (2011) พบว่า *Nostoc lincki* ยังสามารถกำจัดสีย้อม reactive red 198 ซึ่งสามารถกำจัดได้ถึง 94% ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 100 mg l^{-1} , pH 2.0 และที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

การประเมินผลของ azo dye reductase enzyme Mostafa et al. (2009) ซึ่งให้เห็นว่าการเพิ่ม methyl red จะไปเหนี่ยวนำ azo dye reductase ใน *Nostoc lincki* ที่ช่วยในการสลายพันธะเอโซ หลังจาก 3, 5 และ 7 วันของการบ่ม ซึ่งมีค่าประมาณ 69.76 %, 70.73 %, และ 71.01% ตามลำดับ จากผลข้างต้นยืนยันว่าอะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลในสีย้อม Basic cationic และ Basic fuchsin มีการทำลายพันธะมากกว่า nitro group ใน G-Red และ methyl red นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่า azo dye reductase ใน *Nostoc lincki* เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc muscorum* โดยเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 medium ภายในห้องปฏิบัติการ จนสาหร่ายเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะปลายของการเจริญเติบโตเต็มที่ จึงทำการเก็บเซลล์สาหร่ายด้วยวิธีการกรองผ่านผ้ากรอง และล้างสารอาหารที่อาจตกค้างออกจากสาหร่าย

สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง สีเบสิก (basic dye) Malachite Green Crystal

สีแอซิด (acid dye) Benewol Red RS

สีรีแอคทีฟ Benefix Blue (reactive dye)

3.2. การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

นำสาหร่ายใส่ลงในสารละลายสีย้อมที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน ได้แก่ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 โดยการปรับระดับพีเอชของสารละลายสีย้อม ใช้ HNO₃ 0.1 โมลต่อลิตร และ NaOH 0.1 โมลต่อลิตร แล้วใส่สาหร่ายที่เตรียมไว้ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวัดได้โดยเครื่อง spectrophotometer ของแต่ละสี โดยสีย้อมมาลาโคท์กรีน วัดที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร สีย้อมเบนเฟนิคบลูวัดที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร และสีย้อมเบนเวอลเรดวัดที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน Shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยทดลองระดับพีเอชละ 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (สีย้อมที่ไม่มีสาหร่าย) เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองสาหร่ายออกจากสารละลายและนำสาหร่ายไปอบเพื่อหาน้ำหนักแห้ง และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี นำค่าที่ได้คำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสาหร่าย

คำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสาหร่าย (q มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม) ดังสมการ

$$q = V (C_0 - C_{eq}) / M$$

โดย V คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

C₀ คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{eq} คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

M คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย (กรัม)

3.3. การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อมในพีเอชที่เหมาะสม

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม (ผลจากข้อ 2.1) และใส่สาหร่ายปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร ต่อสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมมาลาโคท์กรีน คริสตัล ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมเบนเฟนิคบลูและสีย้อมเบนเวอลเรด อาร์เอส นำไปเขย่าบน Shaker ความเร็วรอบ 120

รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และวัดปริมาณสีที่ย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ระยะเวลาที่ต่างกัน คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำสาหร่ายมากรองและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในเครื่อง Hot air oven เพื่อหาน้ำหนักแห้งของสาหร่าย (dw) และหาจุดสมมูลในการดูดซับโดยการสร้างค่าระหว่างระยะเวลาเก็บค่าการดูดซับ

3.4. การหาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม (ผลจากข้อ 2.1.) ใส่สาหร่ายปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร โดยจะมีความเข้มข้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน คือ 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน Shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่จุดสมมูล (ผลจากข้อ 2.2.) เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำสาหร่ายมากรอง นำไปอบแห้งเพื่อน้ำหนักแห้งของสาหร่าย (dw) และหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ โดยการหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich

3.5. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้สาหร่ายในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยนำสาหร่ายชนิดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุดมาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมคือ การหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ ในการดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ประเภท

ศึกษาหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ : เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชที่เหมาะสม ใส่สาหร่ายโดยผันแปรปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสีย้อมที่สามารถวัดค่าได้ตามข้อ 2.1. ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน Shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนเข้าสู่จุดสมมูล (ผลจากข้อ 2.2.) และวัดปริมาณสีที่ย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี เมื่อสิ้นสุดการทดลอง นำสาหร่ายมากรองและนำไปอบแห้งเพื่อน้ำหนักแห้งของสาหร่าย และคำนวณหาค่า q ตามสมการข้างต้น

ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ : เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสีย้อม 10 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร โดยผันแปรความเข้มข้นของสีย้อม 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าบน Shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนเข้าสู่จุดสมมูล (ผลจากข้อ 2.2.) และวัดปริมาณสีที่ย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี เมื่อสิ้นสุดการทดลอง นำสาหร่ายมากรองและนำไปอบแห้งเพื่อน้ำหนักแห้งของสาหร่าย และคำนวณหาค่า q ตามสมการข้างต้น

การศึกษากจลนศาสตร์การดูดซับ : ศึกษาจลนศาสตร์โดยใส่สาหร่ายในสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80, 160, 240, 320 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมเบนซอิลเรด อาร์เอส ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชม. และศึกษาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) และขึ้นกำหนดอัตราการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(rate limiting step) โดยสร้างกราฟระหว่างเวลาที่สองของเวลา (นาทิต) กับค่าการดูดซับ เพื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาค และสร้างกราฟระหว่างเวลา (นาทิต) กับสารละลายที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ ต่อสารละลายสียอมเริ่มต้น เพื่อหาอัตราเร็วของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งข้อมูลที่ได้จะทำให้สามารถนำมาพัฒนาออกแบบระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีสียอมปนเปื้อนให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น เพราะสามารถหาวิธีในการลดข้อจำกัดของการดูดซับของสาหร่ายแต่ละชนิดได้

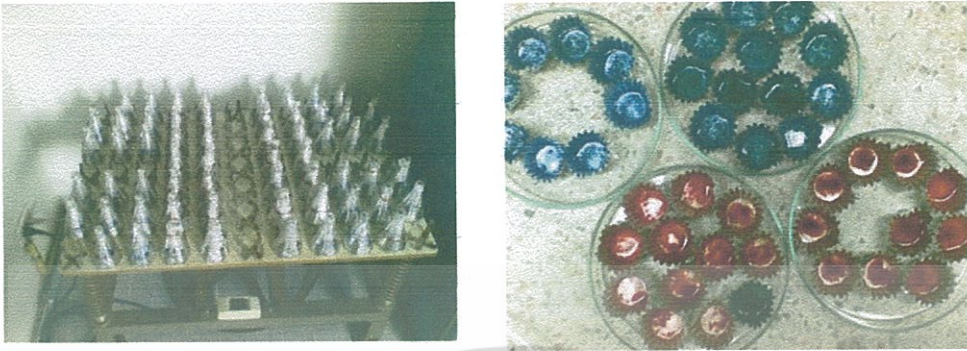
3.6. การวัดปริมาณสียอมและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปริมาณสียอม ด้วยเครื่อง spectrophotometer (Genesys 20 Thermo Spectronic, Thailand) ทำการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) โดยในทุกชุดการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของชุดทดลองแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธี Duncan new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์ (SPSS For Windows 16.0)



ภาพที่ 3.1 สาหร่ายและสียอมหลังการดูดซับโดยสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมาก ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของสารละลาย เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิส การรวมตัวของไอออน ปฏิกริยารีดอกซ์ และการตกตะกอน ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดมาจากค่าพีเอชทั้งนั้น อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อการปรับตัวของตัวดูดซับที่มีชีวิตและความสามารถในการดูดซับอีกด้วย พีเอชไม่เพียงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพแต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสี จากการทดลองใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* (เซลล์ที่มีชีวิต) ในการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) พบว่าสาหร่ายมีการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal ได้ดีที่สุด (ตารางที่ 4.1) ที่สารละลายสีย้อมที่มี pH 5 โดยแตกต่างจากค่า pH อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งมีการดูดซับอยู่ที่ 4.32 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 24.29 ± 0.26 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสีย้อม Benefix Blue มีการดูดซับมากที่สุดที่ค่า pH 2 มีค่าการดูดซับอยู่ที่ 124.84 ± 6.04 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 84.86 ± 0.83 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการดูดซับสีย้อม Benewol Red RS มีการดูดซับมากที่สุดอยู่ที่ pH 3 มีค่าการดูดซับอยู่ที่ 56.76 ± 3.04 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ pH 2 ซึ่งมีการดูดซับอยู่ที่ 63.70 ± 6.00 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 90.30 ± 0.23 เปอร์เซ็นต์ และ 82.14 ± 15.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพีเอชอื่นๆ Daneshver *et al.* (2007) ได้กล่าวไว้ว่าสีย้อม Malachite Green ซึ่งเป็น basic dye เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวก หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมที่แสดงประจุบวกซึ่งแตกต่างให้ประจุค่อนข้างกลางถึงด่างในสารละลาย โดยพบว่าที่ระดับ pH ที่สูงกว่า pH 3 จะส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของสาหร่ายมีประจุลบ สอดคล้องกับความเป็นประจุบวกของสีย้อม Malachite Green จึงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกันทั้งสองของสาหร่ายและสีย้อมสีย้อม Benefix Red เป็นประเภท reactive dye ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ประจุลบ ซึ่งเราพบว่าการแตกตัวในสารละลายแล้วได้ประจุลบจะสัมพันธ์กับประจุผิวหน้าของสาหร่าย ดังนั้นเมื่อ pH ลดต่ำลงจะทำให้ปริมาณกลุ่มประจุบวกเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของสาหร่ายทำให้จับกับประจุลบของสีย้อมได้ดี เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น ดังนั้นสีย้อมที่ให้ประจุลบในสถานะที่เป็นด่างจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของสาหร่ายลดลง เนื่องจากสถานะที่เป็นด่างจะทำให้ประจุบวกที่ผิวหน้าสาหร่ายลดลง การจับกันระหว่างประจุบวกของสาหร่ายกับประจุลบของสีย้อมลดลง (Mahmoud. 2008) เช่นเดียวกับ สีย้อม Benewol Red RS ย้อม พบว่าค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารละลายสีย้อมประจุลบและพบว่าเมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวก (H^+) และ hydronium ions (H_3O^+) ที่บริเวณผิวเซลล์ของสาหร่ายและเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีย้อมแอซิดได้มาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้สาหร่ายเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำ ดังนั้นค่า pH ในสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดซับโดยค่า pH เริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลมากกว่าพีเอชสุดท้าย (Ozer *et al.* 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่มีชีวิต

pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าการดูดซับ		
	Malachite Green	Benefix Blue	Benewol Red RS	Malachite Green	Benefix Blue	Benewol Red RS
2	5.15±0.11 ^D	84.86±0.83 ^A	82.14±15.43 ^A	0.69±0.04 ^D	124.84±6.04 ^A	63.70±6.00 ^{AB}
3	16.93±1.45 ^C	59.34±1.70 ^B	90.30±0.23 ^A	3.35±0.37 ^C	86.18±5.41 ^B	56.76±3.04 ^{AB}
4	1.46±1.55 ^E	19.04±1.75 ^C	63.57±2.36 ^B	0.18±0.18 ^D	5.40±0.42 ^C	33.43±1.70 ^C
5	24.29±0.26 ^A	0 ^D	55.29±3.20 ^{BC}	4.32±0.26 ^B	0 ^C	0.13±4.07 ^D
6	23.06±0.52 ^{AB}	0 ^D	57.42±0.93 ^B	4.43±0.34 ^B	0 ^C	71.75±10.26 ^A
7	21.72±0.00 ^B	0 ^D	52.00±1.45 ^{BC}	5.71±0.14 ^A	0 ^C	71.69±8.16 ^A
8	7.08±0.70 ^D	0 ^D	37.35±1.51 ^C	0.43±0.06 ^D	0 ^C	45.50±2.48 ^{BC}

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2. ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม

ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายที่ระดับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ (ผลจากข้อ 4.1.) พบว่า สาหร่ายโนแบคทีเรีย *Nostoc muscorum* สามารถดูดซับสีย้อมได้อย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรกที่ตัวดูดซับสัมผัสกับสารละลายสีย้อม โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4.1) โดยสีย้อม Malachite green crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 62.69±1.83, 57.60±1.00 และ 53.97±3.58 ตามลำดับ และเริ่มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไปจนเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ โดยพบว่าสีย้อมทั้ง 3 ชนิด เข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ ณ เวลาที่แตกต่างกัน ดังนี้ สีย้อม Malachite green crystal มีระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับที่ 6 ชั่วโมง, สีย้อม Benefix Blue มีระยะเวลาสู่จุดสมดุลการดูดซับที่ 24 ชั่วโมง และสีย้อม Benewol Red RS มีระยะเวลาสู่จุดสมดุลการดูดซับที่ 48 ชั่วโมง โดยพบว่า ที่ระยะเวลาสู่จุดสมดุลการดูดซับของแต่ละชนิดสีย้อมมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับดังต่อไปนี้ สีย้อม Malachite green crystal มีการดูดซับอยู่ที่ 98.19±0.39 เปอร์เซ็นต์ และ 89.49±9.16 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อม Benefix Blue มีการดูดซับอยู่ที่ 92.75±0.78 เปอร์เซ็นต์ และ 336.73±8.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสีย้อม Benewol Red RS มีการดูดซับอยู่ที่ 89.76±0.34 เปอร์เซ็นต์ และ 426.01±14.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) จากผลการทดลองของ Sevgil and Gonul (2006) ได้มีการทดสอบการดูดซับสีย้อม Reactive Black B โดยใช้

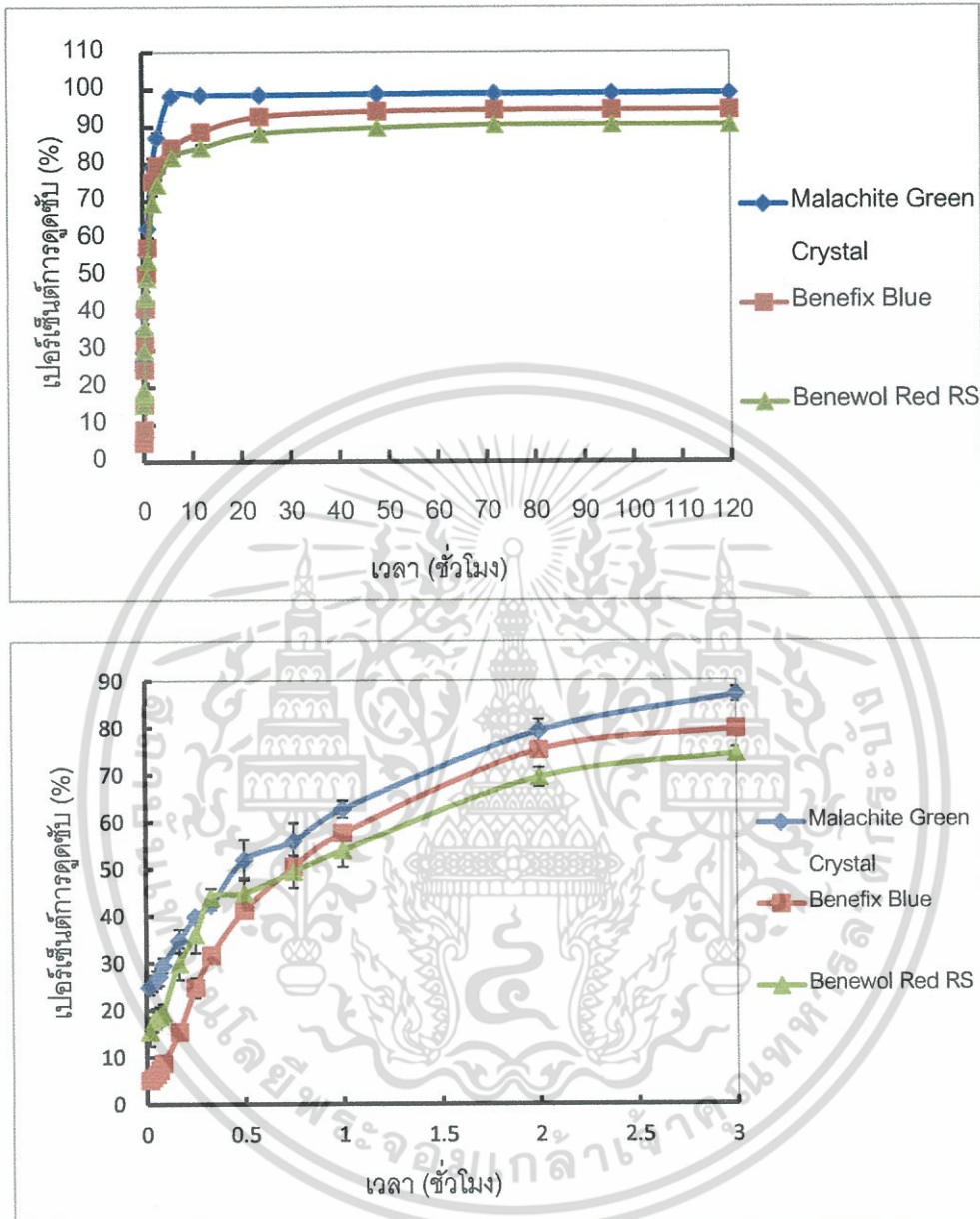
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่าย *Phormidium* sp. พบว่าการดูดซับของสาหร่ายเข้าสู่จุดสมดุลที่ 144 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 10.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้การทดลองของ Sevgi et al. (2008) ได้ใช้สาหร่าย *Phormidium* sp. ดูดซับสีย้อม Remazol Blue พบว่าการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลที่ 72 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับอยู่ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 9.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับจึงทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และการดูดซับจะดำเนินเช่นนี้ไปเรื่อยๆ แต่จะไม่พบค่าศักยภาพสูงสุด เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลาย ทำให้ตัวถูกละลายเกิดการดูดซับและการคายการดูดซับไปพร้อมๆ กัน จนถึงสภาวะสมดุลการดูดซับ (equilibrium adsorption) คืออัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่

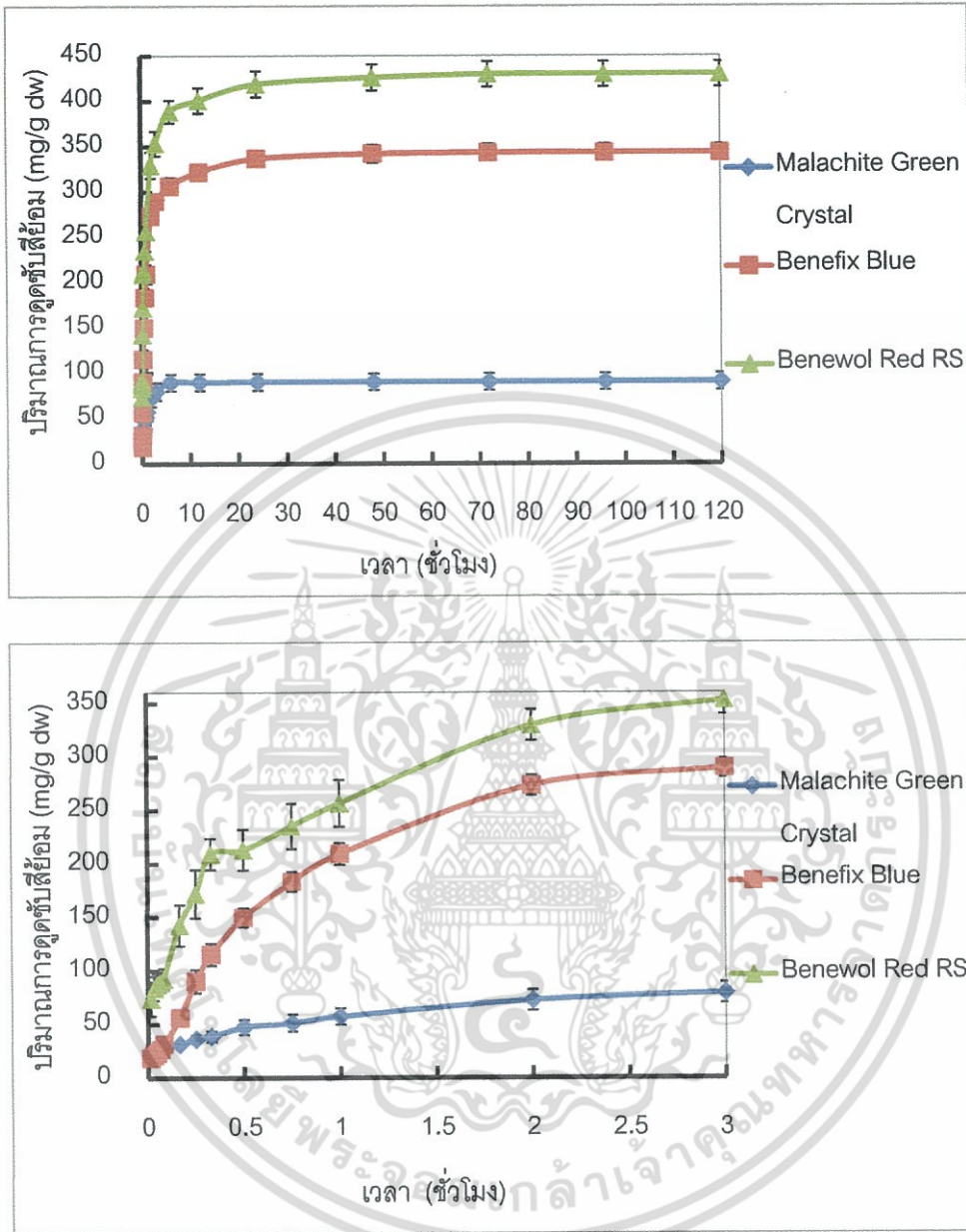
4.3. ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม (ไอโซเทอร์ม)

ไอโซเทอร์มการดูดซับจากสมการของ Langmuir และ Freundlich เป็นค่าที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับสีย้อมและประเมินประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมของสาหร่าย ดังนั้นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคือต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและต้องทำภายใต้อุณหภูมิคงที่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการดูดซับสีย้อมของ *Nostoc muscorum* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) สำหรับสีย้อม Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) ที่คำนวณได้เท่ากับ 267.68 ± 51.26 , 322.80 ± 6.01 และ 468.98 ± 7.22 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดย *Nostoc muscorum* มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Benewol Red RS สูงสุด ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุดของสีย้อมชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) อีกทั้งยังพบว่าการดูดซับสีย้อมของ *Nostoc muscorum* มีค่าความสัมพันธ์ (r^2) ของสมการการดูดซับของ Langmuir adsorption isotherm มากกว่า Freundlich adsorption isotherm ดังตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ระยะเวลาสูงสุดสมดุลของการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) โดยใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* ปริมาณ 10 ๑/L ที่อุณหภูมิ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับที่ระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Malachite Green Crystal (basic dye), Benefix Blue (reactive dye) และ Benewol Red RS (acid dye) โดยใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* ปริมาณ 10 g/L ที่อุณหภูมิ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ ที่จุดสมมูลโดย *Nostoc muscorum*

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ		
	Malachite Green Crystal	Benefix Blue	Benewol Red RS
1	24.81±1.48 ^I	5.07±0.61 ^N	15.46±3.08 ^G
2	25.77±1.69 ^I	5.75±0.44 ^{LM}	17.66±2.23 ^G
3	26.57±1.82 ^I	6.35±0.35 ^{LM}	18.41±2.00 ^G
4	27.11±1.86 ^I	7.30±0.42 ^{LM}	18.84±1.88 ^G
5	29.53±1.56 ^{HI}	8.72±0.40 ^L	19.48±1.80 ^G
10	34.73±2.45 ^{GH}	15.41±1.60 ^K	29.90±3.40 ^F
15	39.80±0.43 ^{FG}	24.74±2.13 ^J	36.06±3.89 ^F
20	42.34±1.06 ^F	31.64±1.71 ^I	43.99±1.83 ^E
30	51.88±4.25 ^E	41.24±1.18 ^H	44.83±3.33 ^E
45	55.88±3.88 ^E	50.43±1.00 ^G	49.39±3.42 ^{DE}
60	62.69±1.83 ^D	57.60±1.00 ^F	53.97±3.58 ^D
120	79.24±2.44 ^C	75.24±0.23 ^E	69.45±2.04 ^C
180	87.01±1.54 ^B	79.70±0.36 ^D	74.43±1.37 ^C
360	98.19±0.39 ^A	84.37±0.46 ^C	81.89±0.44 ^B
720	98.50±0.23 ^A	88.63±0.82 ^B	84.46±0.81 ^{AB}
1440	98.70±0.29 ^A	92.75±0.78 ^A	88.24±0.64 ^{AB}
2880	98.79±0.27 ^A	94.17±0.82 ^A	89.76±0.34 ^A
4320	98.84±0.26 ^A	94.51±0.94 ^A	90.56±0.44 ^A
5760	98.96±0.17 ^A	94.51±0.94 ^A	90.56±0.44 ^A
7200	99.01±0.12 ^A	94.51±0.94 ^A	90.56±0.44 ^A

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

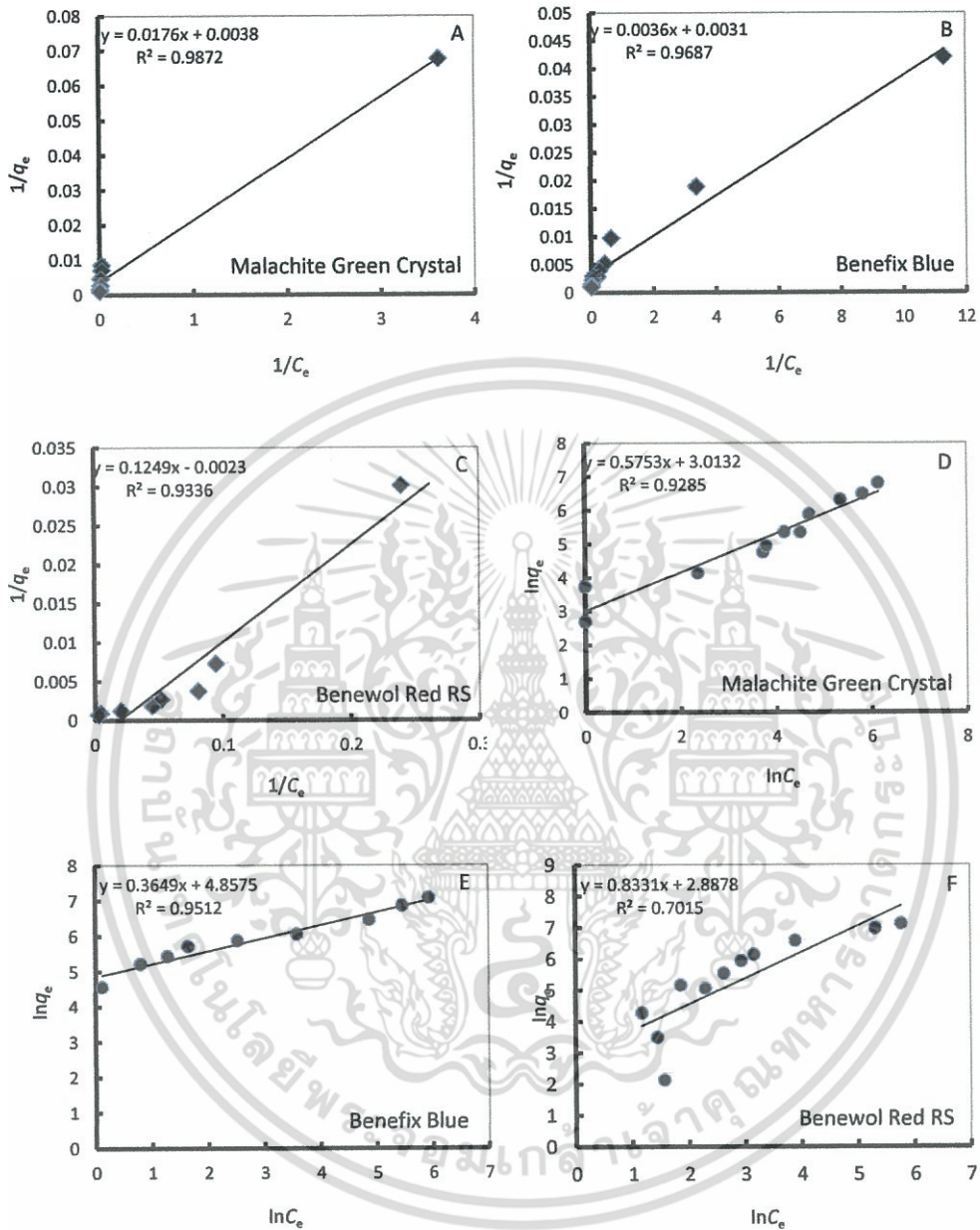
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับของสาหร่าย *Nostoc muscorum*

สีย้อม	Langmuir			Freundlich	
	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	K_a (ลิตรต่อมิลลิกรัม)	r^2	n	r^2
Malachite Green	267.68 ± 51.26^B	0.22 ± 0.02^A	0.989	2.18 ± 0.07^A	0.915
Benefix Blue	322.80 ± 6.01^B	0.71 ± 0.34^A	0.958	2.39 ± 0.08^A	0.947
Benewol Red RS	468.98 ± 7.22^A	0.02 ± 0.00^A	0.923	1.16 ± 0.03^B	0.729

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Sevgil and Gonul (2007) พบว่า ได้มีการใช้ *Phormidium* sp. ในการดูดซับสีย้อม Reactive Black B และ Remazol Blue โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) เพียง 14.17 และ 14.7 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่า การดูดซับสีย้อม Rhodamine B โดย activated carbon มีค่าการดูดซับสูงสุดเพียง 40.161 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (Arivoli *et al.* 2009)



ภาพที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ (A-C) และ ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ (D-F) โดย *Nostoc muscorum*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4. ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดสอบปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับเป็นการศึกษาผลปริมาณตัวดูดซับที่มีน้ำหนักแตกต่างกันโดยจะส่งผลต่อปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับของสีย้อมโดยใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* ปริมาณตั้งแต่ 0.5 - 6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่สามารถวัดได้ ทำการทดลองที่เวลาสูงสุดสมมูลของการดูดซับ ณ อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณสาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อม Benefix Blue และ Benewol Red RS ออกจากสารละลายได้สูงสุดถึง 95.32 ± 2.04 และ 86.00 ± 1.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนสีย้อม Malachite Green Crystal มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดที่ 97.88 ± 0.31 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณสาหร่าย 1 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร และที่ปริมาณสาหร่าย 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS ได้สูงสุดถึง 45.42 ± 4.26 , 235.10 ± 18.36 และ 261.44 ± 11.19 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นเป็น 6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS ได้เพียง 4.46 ± 0.12 , 29.24 ± 1.03 และ 33.72 ± 1.69 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้งสามชนิดลดลงประมาณ 10 เท่า (ตารางที่ 4.4) จากการทดลองของ Ozer *et al.* (2005) ได้มีการใช้สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีย้อมแอซิด AB324 และ AR337 ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ในช่วง 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่ปริมาณการดูดซับสีย้อมต่อน้ำหนักสาหร่ายแห้งลดลง

ปริมาณสาหร่ายที่ใช้ในการทดสอบที่ต่างกันมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมแตกต่างกันได้ โดยเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักสาหร่ายแห้ง (ค่า q) มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณสาหร่ายที่มีน้อยทำให้เกิดพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งในการยึดจับของสาหร่ายกับโมเลกุลของสีย้อมต่อหน่วยของน้ำหนักสาหร่ายได้มากกว่าปริมาณสาหร่ายที่มีมาก อีกทั้งปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันหรือขัดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งในการยึดจับของสาหร่ายไม่สามารถจับกับโมเลกุลของสีย้อมได้ (Ozer *et al.* 2005)

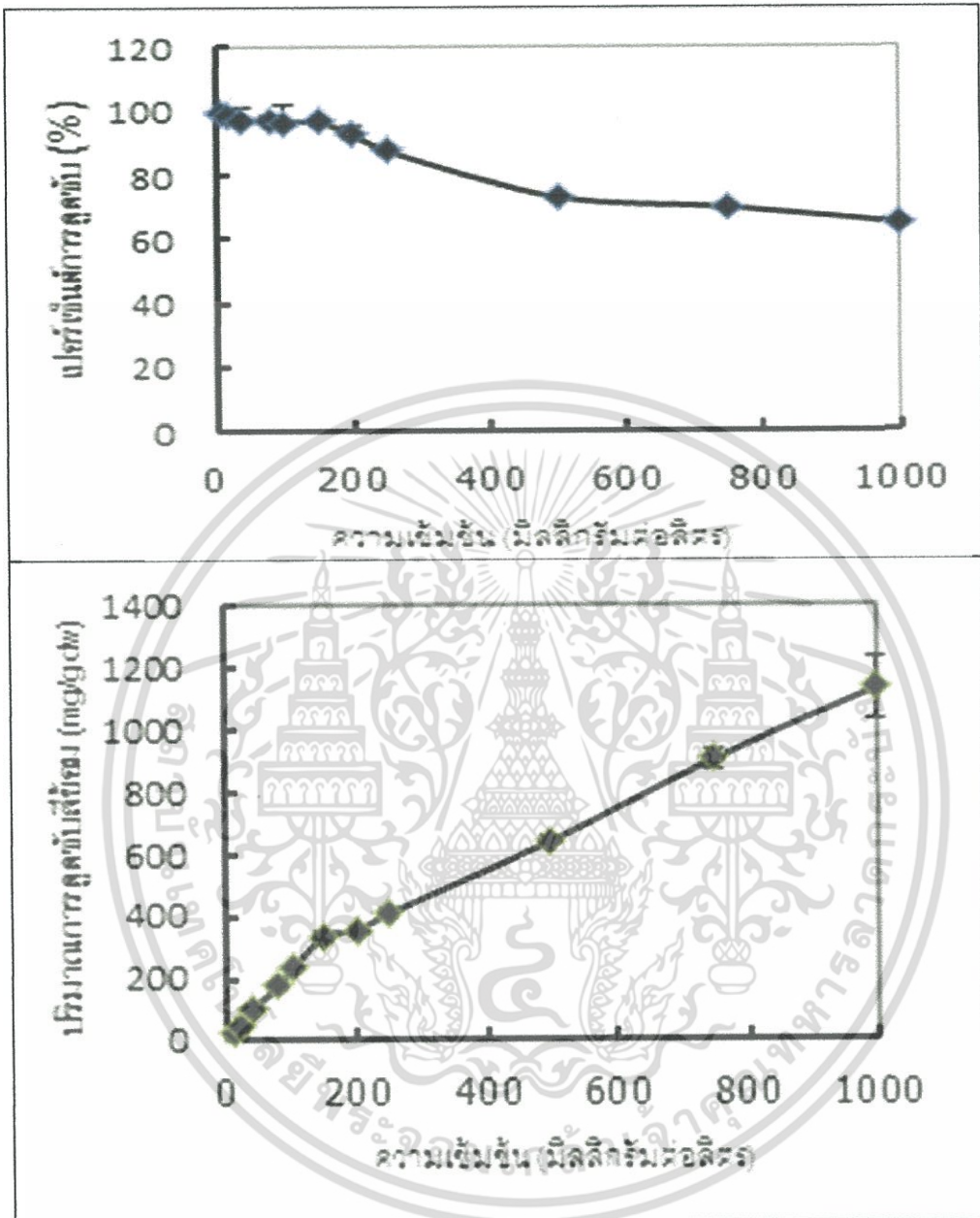
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum*

ปริมาณ เซลล์	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)			ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)		
	Malachite Green Crystal	Benefix Blue	Benewol Red RS	Malachite Green Crystal	Benefix Blue	Benewol Red RS
0.5	94.80±1.64 ^B	95.32±2.04 ^{AB}	86.00±1.76 ^A	45.42±4.26 ^A	235.10±18.36 ^A	261.44±11.19 ^A
1	97.88±0.31 ^A	98.09±0.62 ^A	88.77±0.59 ^A	25.83±1.58 ^B	140.82±2.97 ^B	156.83±10.85 ^B
1.5	97.04±0.59 ^A	96.88±0.73 ^{AB}	88.66±1.06 ^A	17.71±0.95 ^C	98.77±2.55 ^C	121.72±5.55 ^C
2	97.68±0.12 ^A	93.43±2.59 ^B	84.52±0.54 ^A	14.24±0.51 ^{CD}	73.21±2.81 ^D	108.55±1.44 ^C
2.5	97.63±0.27 ^A	96.94±0.24 ^{AB}	76.55±0.43 ^B	9.27±0.14 ^{DE}	65.56±0.57 ^D	87.22±1.20 ^D
3	96.32±0.10 ^{AB}	94.44±0.23 ^{AB}	67.36±1.52 ^C	8.42±0.12 ^E	58.89±2.91 ^D	71.83±3.07 ^D
6	97.22±0.37 ^A	85.32±0.51 ^C	46.61±5.36 ^D	4.46±0.12 ^E	29.24±1.03 ^E	33.72±1.69 ^E

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

6. ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum*

การดูดซับสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีเขียวทั้งสามออกจากสารละลายได้ 51.35 ± 3.30 , 64.87 ± 2.28 (ภาพที่ 4.4) และ 66.95 ± 0.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสามารถดูดซับสีเขียวได้สูงสุด 918.50 ± 14.63 , 1133.62 ± 102.91 และ 1392.50 ± 94.29 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS ต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่าย *Nostoc muscorum* สามารถดูดซับสีเขียวได้ 17.77 ± 1.52 , 24.75 ± 1.27 และ 9.63 ± 2.01 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงประมาณ 52, 45 และ 145 เท่า ตามลำดับ แต่สามารถกำจัดสีเขียวได้ถึง 97.26 ± 0.23 , 99.34 ± 0.23 และ 50.32 ± 2.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า โดยการทดลองของ Sevgil and Gonul (2006) ได้มีการใช้ *Synechococcus* sp. ในการดูดซับสีเขียว Remazol Blue และ Reactive Red RB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียว 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีเขียวออกจากสารละลายได้ 66.9 และ 39.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 53 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีเขียวได้เพียง 9.6 และ 13.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์และปริมาณการตรึงไนโตรเจน Benefix Blue โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีเขียว Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc*

ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (เปอร์เซ็นต์)			ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)		
	Malachite Green	Benefix Blue	Benewol Red RS	Malachite Green Crystal	Benefix Blue	Benewol Red RS
10	97.26±0.23 ^A	99.34±0.23 ^A	50.32±2.10 ^F	17.77±1.52 ^G	24.75±1.27 ^G	9.63±2.01 ^H
20	98.34±0.43 ^A	98.25±0.19 ^A	78.36±0.37 ^C	40.53±1.87 ^G	50.32±2.42 ^G	34.35±1.24 ^H
40	76.30±4.34 ^B	96.87±0.28 ^A	91.34±0.56 ^{AB}	74.69±8.16 ^{FG}	106.85±7.49 ^{FG}	70.58±5.86 ^{GH}
80	53.20±1.44 ^{CD}	97.26±0.05 ^A	91.76±0.75 ^A	135.77±9.58 ^{EF}	177.28±10.36 ^{EF}	174.51±9.89 ^F
100	60.84±5.46 ^C	96.18±0.18 ^A	89.17±0.32 ^B	151.22±22.35 ^{EF}	236.86±4.99 ^E	156.96±11.09 ^{FG}
150	52.49±1.47 ^{CD}	96.55±0.07 ^A	90.57±0.33 ^{AB}	222.14±8.30 ^E	336.83±16.06 ^D	256.78±4.66 ^F
200	53.25±2.67 ^{CD}	92.47±0.56 ^B	90.08±0.12 ^{AB}	208.58±9.60 ^E	356.77±10.44 ^D	364.72±11.71 ^E
250	56.41±3.27 ^{CD}	87.58±1.48 ^C	91.15±0.26 ^{AB}	348.62±46.90 ^D	410.77±17.07 ^D	498.67±19.95 ^D
500	51.90±1.96 ^{CD}	72.96±0.41 ^D	89.31±0.10 ^{AB}	503.72±27.19 ^C	624.19±13.15 ^C	753.53±21.69 ^C
750	56.47±0.78 ^{CD}	69.68±1.73 ^E	71.70±0.20 ^D	769.26±74.01 ^B	905.00±30.81 ^B	1056.46±46.60 ^B
1000	51.35±3.30 ^D	64.87±2.28 ^F	66.95±0.82 ^E	918.50±14.63 ^A	1133.62±102.91 ^A	1392.50±94.29 ^A

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

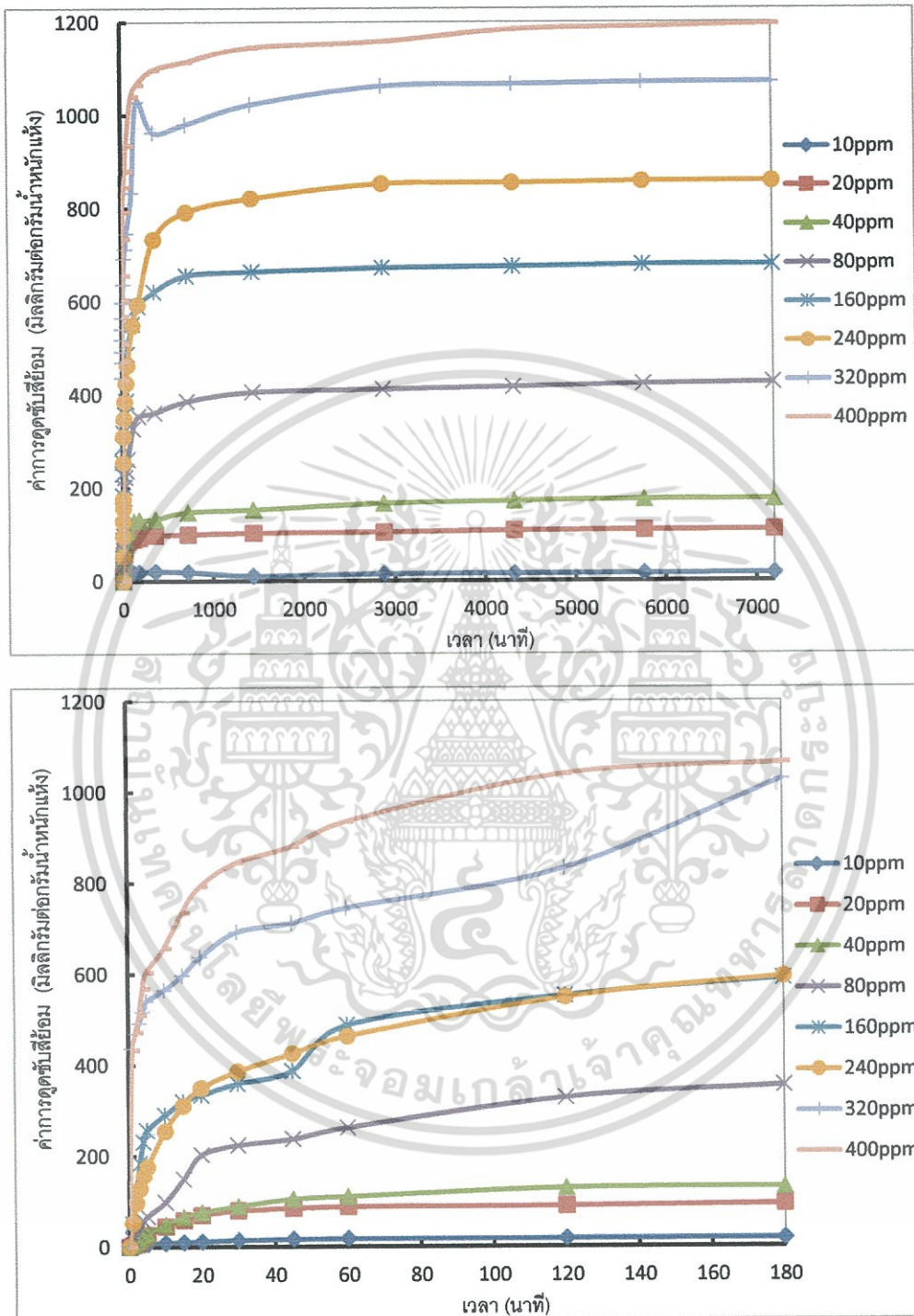
4. จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetics of adsorption) เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่าอัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่างๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพเหมาะกับการใช้งานระบบต่างๆ เช่น batch reactors และ fixed beds เป็นต้น (สุนีรัตน์, 2549)

การที่จะพิจารณาว่าสำหรับมีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นอันดับใดโดยเราจะพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r) ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา โดยผลการทดลองครั้งนี้พบว่า สำหรับ *Nostoc muscorum* มีรูปแบบการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมากกว่า (Pseudo-second order) โดยพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่าโดยเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์ที่สูงกว่า ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือน (Pseudo first-order reaction) (ตารางที่ 4.6)

ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ คือขั้นควบคุมอัตราเร็วของขบวนการทั้งหมด จากกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ มีการเกิดเป็นขั้นตอน 4 ขั้นตอนย่อย แต่ละขั้นตอนจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วหรือช้าแตกต่างกัน โดยขั้นตอนที่เกิดช้ามากที่สุด จะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining step) (สุนีรัตน์, 2549)

การทดลองพบว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับพบว่าทั้งการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ (film diffusion) และชั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) เป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ โดยชั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) จะเป็นการดูดซับช่วงที่สอง (Secondary rate) (ตารางที่ 4.7)



ภาพที่ 4.5 การดูดซับสีของ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum* ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 อันดับของปฏิกริยาของสีย้อม Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum*

ความเข้มข้นของ สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตรต่อนาที)	r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิลิตรต่อนาที)	r
10	2.3030	0.1953	14.8795	0.9908
20	6.4484	0.7768	2.8701	0.9997
40	7.3696	0.9131	1.0295	0.9993
80	7.8302	0.8741	0.5789	0.9999
160	9.2120	0.8481	0.7053	1
240	20.0361	0.9497	0.3103	0.9999
320	9.6726	0.6599	0.3821	0.9999
400	8.2908	0.8851	0.4025	0.9999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของสีย้อม Benewol Red RS เริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Nostoc muscorum*

ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.05})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.05})
10	0.0098	2.0131	0.3441
20	0.0435	18.2903	1.0723
40	0.0326	18.1237	0.9118
80	0.0328	47.1865	0.9856
160	0.0812	170.2015	0.4604
240	0.0363	84.8830	1.6542
320	0.0207	76.4439	2.9521
400	0.0284	104.6018	1.7946

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum* พบว่า สามารถดูดสีย้อมได้ดีที่สุดที่พีเอช เท่ากับ 5, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับอยู่ที่เวลา 6, 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่ระดับปริมาณสาหร่ายเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร และจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมทั้งสามชนิด พบว่า มีค่าปริมาณการดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าลดลง

ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal, Benefix Blue และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Nostoc muscorum* พบว่ามีความสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm โดยพบว่าความสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยาของสีย้อม Benewol Red RS เป็นอันดับที่สอง เสมือน อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อม Benewol Red RS พบว่าการแพร่ภายในอนุภาคในการดูดซับช่วงที่สองเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับ



บรรณานุกรม

- กรมประมง. 2548. มาลาไคท์ กรีน (Malachite Green; MG). ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพสัตว์น้ำ และผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำสมุทรสาคร. กรมประมง. สมุทรสาคร.
- กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย. 2553. “เจ้าพระยาปนเปื้อนสารเคมีอันตราย”. [online]. Available; <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=7&ID=522>
- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2542. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดสีรีอคทีฟ (reactive dyes). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) .พิมพ์ ครั้งที่ 1 . กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- จันทิมา ชั่งสิริพร ณรงค์พล ทองสังข์ วุฒิไกร วงษ์มະยูรา และจรรยา อินทมณี. 2552. “การกำจัด CODและสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน”. ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. 2539. “เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม”. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13. 13 กุมภาพันธ์ 2539
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8. 2537. “เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน”. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง. 24 กุมภาพันธ์ 2537
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มปป. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม . กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549. การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ
- Adamson, A.W. 1990. Physical Chemistry of Surfaces. John Wiley & Sons, Inc., New York. 777 p.
- Agrawal, G.L. 1990. Basic Chemical Kinetics. McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi. 214 p.
- Ahuja, P., R. Gupta and R.K. Saxena. 1997. “Oscillatoria angustissima: a promising Cu²⁺ biosorbent”. Current Microbiol. 35 : 151-154.
- Aksu, Z. and Tezer, S. 2005. “Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*” Process Biochemistry. 40 : 1347-1361.
- Aksu, Z., Sag, Y. and Kutsal, T. 1992. “The bosorption pf copper(II) by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*.” Environment Technology. 13:579-586.
- Anonymous., 2001. Adsorption Mechanism Loughborough University [Online]. Available : <http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/Projects/2001/ooi/fig1.1.gif&imgfurl>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Aravindhan, R., Jonnalagadda, R.R. and Balachandran, U.N. 2007. "Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpeliformis*." *Journal of Hazardous Materials*. 142 : 68-76.
- Bajguz, A. 2000. "Blockade of heavy metals accumulation in *Chlorella vulgaris* cells by 24-epibrassinolide". *Plant Physiology Biochemistry*. 38 : 797-801.
- Bekçi, Z., Seki, Y. and Cavas, L. 2009. "Removal of malachite green by using an invasive marine alga *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*." *Journal of Hazardous Materials*. 161 : 1454-1460.
- Bhattacharyya, K.G. and Sharma, A. 2005. "Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder." *Dyes and Pigments*. 65 : 51-59.
- Celekli, A., Yavuzatmaca, M. and Bozkurt, H. 2009. "Kinetic and equilibrium studies on the adsorption of reactive red 120 from aqueous solution on *Spirogyra majuscula*." *Chemical Engineering Journal*. 152 : 139-145.
- Cengiz, S. and Cavas, L. 2008. "Removal of methylene blue by invasive marine seaweed: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*." *Bioresource Technology*. 99 : 2357-2363.
- Chu, W.L. See, Y.C. and Phang, S.M. 2009. "Use of immobilised *Chlorella vulgaris* for the removal of colour from textile dyes." *Journal of Applied Phycology*. 121: 641-648.
- Daneshvar, N., Ayazloo, M., Khataee, A.R. and Pourhassan M. 2007. "Biological decolorization of dye solution containing Malachite Green by microalgae *Cosmarium* sp." *Bioresource Technology*. 98 : 1176-1182.
- El-Sheekh, M.M., Gharieb, M.M. and Abou-El-Souod, G.W. 2009 "Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria" *International Biodeterioration & Biodegradation*. 63 : 699-704.
- Ergene, A., Ada, K., Tan, S. and Katircioglu, H. 2009. "Removal of Remazol Brilliant Blue R dye from aqueous solutions by adsorption onto immobilized *Scenedesmus quadricauda*: Equilibrium and kinetic modeling studies. *Desalination*. 249 : 1308-1314.
- Ertugrul, S., Bakir, M. and Donmez, G. 2008. "Treatment of dye-rich wastewater by an immobilized thermophilic cyanobacterial strain: *Phormidium* sp." *Ecological Engineering*. 32 : 244-248.
- Forgacs, E., Cserhádi, T. and Oros, G. 2004. "Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review." *Environment International*. 30 : 953- 971.
- Fourest, E. and Roux, J. 1992. "Heavy metal biosorption by fungal mycelial by product: mechanisms and influence of pH." *Applied Microbiology Biotechnology*. 37: 399-403.

- Friberb, I., Elinder, C.G. and Kjelstrom, C. 1992. Environmental Health Criteria Cadmium. Van Nostrand Reinhold Company, Finland. p.36-50.
- Gadd, G.M. 1998. Heavy metal and radionuclide by fungi and yeasts *In* Biohydrometallurgy. A. Rowe, Chippenham, Wilts., U.K.
- Guezguez, I., Dridi-Dhauadi, S., Mhenni, F., 2009. "Sorption of yellow 59 on *Posidonia oceanica*, a non-Conventional biosorbent : comparison with activated carbons".
- Hij, S.L., Yong, S.Y. and Wong, C.L. 2009. "Removal of rhodamine B from aqueous solution by sorption on *Turbinaria conoides* (Phaeophyta). Journal of Applied Phycology. 21 : 625-631.
- Ho, Y.S., Chiang T.H. and Hsueh, Y.M. 2005. "Removal of basic dye from aqueous solution using tree fern as a biosorbent." Process Biochemistry. 40 : 119-124.
- Kannan, R.R., Rajasimman, M., Rajamohan, N. and Siaprakash, B. 2010. "Brown marine algae *Turbinaria conoides* as biosorbent for Malachite green removal: Equilibrium and kinetic modeling." Frontiers of Environmental Science and Engineering in China. 4 : 116-122.
- Karacakaya, P., Kılıç, N.K., Duygu, E. and Dönmez, G. 2009. "Stimulation of reactive dye removal by cyanobacteria in media containing triacontanol hormone." Journal of Hazardous Materials. 172 : 1635-1639.
- Khalaf, M.A. 2008. "Biosorption of reactive dye from textile wastewater by non-viable biomass
- Khataee, A.R., Dehghan, G., Ebadi, E., Zarei, M. and Pourhassa, M. 2010. "Biological treatment of a dye solution by Macroalgae *Chara* sp.: Effect of operational parameters, intermediates identification and artificial neural network modeling." Bioresource Technology. 101 : 2252-2258.
- Kumar, K.V., Ramamurthi, V., and Sivanesan, S. 2006. "Biosorption of malachite green, a cationic dye onto *Pithophora* sp., a fresh water algae." Dyes and Pigments. 69 : 102-107.
- Kumar, K.V., Sivanesan, S. and Ramamurthi, V. 2005. "Adsorption of malachite green onto *Pithophora* sp., a fresh water algae: Equilibrium and kinetic modeling." Process Biochemistry. 40 : 2865-2872.
- Larkum, A. W.D., Douglas, S.E. and Raven, J.A. 2003 . Photosynthesis in Algae. Kluwer Academic Publishers, London. 479 p.
- Ledin, M. 2000. "Accumulation of metals by microorganisms-processes and importance for soil systems." Earth-Science Reviews. 51: 1-31.
- Lim, S.L., Chu, W.L., Phang, S.M. 2010. "Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater" Bioresource Technology. 101 : 7314-7322.

- Marungrueng, K. and Pavasant, P. 2006. "Removal of basic dye (Astrazon Blue FGRL) using macroalga *Caulerpa lentillifera*." *Environmental Management* .78 : 268-274.
- Marungrueng, K. and Pavasant, P., 2007. High performance biosorbent (*Caulerpa lentillifera*) for basic dye removal. *Bioresource Technology*. 98, 1567-1572.
- Masel, R.I. 1996. Principles of adsorption and reaction on solid surfaces. John Wiley & Sons, Inc. New York. 804 p.
- McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, J. 1983. "The adsorption of dyes in chitin Intraparticle diffusion process." *Journal of Applied Polymer Science*. 28 : 1767-1778.
- Mishra, G. and Tripathy, M. 1993. "A critical review of the treatment for decolourization of textile effluent." *Colourage*. 40 : 35-38.
- Mittal, A., Krishnan, L. and Gupta, V.K. 2005. "Removal and recovery of malachite green from wastewater using an agricultural waste material, de-oiled soya. Separation and Purification Technology. 2005. 43 : 125-133.
- Mohan, S.V., Rao, N. C. and Karthikeyat, J. 2002. "Adsorption of direct azo dye from aqueous phase onto coal based sorbents; a kinetic and mechanistic study" *Journal of Hazardous Materials*. 90 : 189-204.
- Mona, S., Kaushik, A., Kaushik, C.P., 2011. Biosorption of reactive dye by waste biomass of *Nostoc linckia*. *Ecological Engineering*. xx, xxx-xxx. (Article in press)
- Ncibi, M.C., Hamissa, A.M.B., Fathallah, A., Kortas, M.H., Baklouti, T., Mahjoub, B. and Seffen, M. 2009. "Biosorptive uptake of methylene blue using Mediterranean green alga *Enteromorpha* spp." *Journal of Hazardous Materials*. 170 : 1050-1055.
- of *Aspergillus niger* and *Spirogyra* sp." *Bioresource Technology*. 99 : 6631-6634.
- Ozer, A., Akkaya, G. and Turabik, M. 2005b. "The biosorption of Acid Red 337 and Acid Blue 324 on *Enteromorpha prolifera*: The application of nonlinear regression analysis to dye biosorption." *Chemical Engineering Journal*. 112 : 181-190.
- Ozer, A., Akkaya, G. and Turabik, M. 2005a. "Biosorption of Acid Red (AR 274) on *Enteromorpha prolifera* in a batch system." *Journal of Hazardous Materials*. B126 : 119-127.
- Ozer, A., Akkaya, G. and Turabik, M. 2006b. "Biosorption of Acid Blue 290 (AB 290) and Acid Blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*." *Journal of Hazardous Materials*. 135 : 355-364.
- Ozer, A.G. and Turabik, M., 2006. The removal of Acid Red 274 from wastewater: Combined biosorption and biocoagulation with *Spirogyra rhizopus*. *Dyes and Pigments*. 71, 83-89.
- Padmesh T.V.N., Vijayaraghavan, K., Sekaran G. and Velan M, 2006. "Application of *Azolla rongpong* on biosorption of acid red 88, acid green 3, acid orange 7 and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- acid blue 15 from synthetic solutions”. *Chemical Engineering Journal*. 122 : 55–63
- Padmesh, T.V.N., Vijayaraghavan, K., Sekaran, G. and Velan, M. 2005 “Batch and column studies on biosorption of acid dyes on fresh water macro alga *Azolla filiculoides*” *Journal of Hazardous Materials*. 125 : 121–129.
- Pandey A, Singh P, Iyengar L (2007). “Bacterial decolourisation and degradation of azo dyes.” *International Biodeterioration Biodegradation*. 59: 73-84.
- Pimol, P., Khanidtha, M., Pavasant, P., 2008. Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste: dried Seagrape (*Caulerpa lentillifera*). *Journal of Environmental Sciences*. 20, 760–768.
- Punjongharn, P., Meevasana, K. and Pavasant, P. 2008. “Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste : dried Seagrape (*Caulerpa lentillifera*).” *Journal of Environmental sciences*. 20 : 760-768.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. 2001. “Remediation of dyes in textile effluent on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource. Technology*. 77 : 247-255.
- Sadettin, S. and Dönmez, G. 2007. “Simultaneous bioaccumulation of reactive dye and chromium (VI) by using thermophil *Phormidium* sp.” *Enzyme and Microbial Technology*. 41 : 175-180.
- Sadettin, S., Donmez, G., 2006. Bioaccumulation of reactive dyes by thermophilic cyanobacteria. *Process Biochem*. 41, 836–841.
- Environmental Microbe-Metal Interactions*. ASM Press. Washington.
- Sharman, R . 1998 . *Water and Wastewater Technology, LBCC : Trickling Filter*, [Online]. Available URL: [http:// www.lbcc.cc.or.us/process2](http://www.lbcc.cc.or.us/process2).
- Shawabkeha, R.A. and Tutunjib, M.F. 2003. “Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay.” *Applied Clay Science*. 24 : 111-120.
- Tsai W.T., and Chen, H.R. 2010. “Removal of malachite green from aqueous solution using low-cost chlorella-based biomass.” *Journal of Hazardous Materials*. 175 : 844-849.
- Vijayaraghavan, K. and Yun, Y.S. 2008. “ Biosorption of C.I. Reactive Black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of brown seaweed *Laminaria* sp.” *Dyes and Pigments*. 76 : 726-732.
- Wilde, E.W. and Benemann, J.R. 1993. “Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae.” *Biotechnology Advance*. 11 : 781-812.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุนีรัตน์ เรืองสมบุญ
Miss Suneerat Ruangsomboon

เพศ หญิง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ8

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2538	ตรี	วท.บ. (ประมง) วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยม)	ม.เกษตรศาสตร์	ไทย
2541	โท	วท.ม. (วิทยาศาสตร์การประมง) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	ม.เกษตรศาสตร์	ไทย
2549	เอก	Ph.D. (Environmental Technology)	King Mongkut's University of Technology Thonburi (International program)	ไทย

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

อนุกรมวิธานของแพลงก์ตอน การใช้ประโยชน์สารสกัดจากสาหร่าย การบำบัดน้ำเสีย
ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

1. ความเป็นไปได้ในการผลิตไขฟักโรแดงเป็นการค้า (งบประมาณแผ่นดิน 2544)
2. การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสีย้อมปนเปื้อนโดยใช้ *Lemna*, *Chlorella* และ *Phormidium* (ทุนอุดหนุนการวิจัย ม.ศรีปทุม 2544)
3. การกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้ *Oscillatoria* และ *Microcystis* (งบประมาณแผ่นดิน 2546)
4. การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ (สกว. มิ.ย. 2546- มิ.ย. 2547)
5. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดถلاب *Nostoc commune* เพื่อการค้า (รายได้ภาคฯ 2547)
6. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดถلاب (*Nostoc commune*) และสาหร่ายสไปรูไลน่า (*Spirulina platensis*) ในน้ำนมดิบที่ทิ้งจากโรงงานผลิตนมเพื่อใช้เป็นอาหารปลาสายงามและปลาเศรษฐกิจ(งบประมาณแผ่นดิน 2548-2549)
7. ผลกระทบของแสง และอุณหภูมิ ที่มีต่อเสถียรภาพการออกฤทธิ์ของสารสกัดจากสาหร่ายในการยับยั้งการงอกและการเติบโตของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2549)
8. ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาสารสกัดจากสาหร่ายต่อการงอกของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2550)
9. การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากสัตว์น้ำ (เปลือกกุ้ง เปลือกปู) (รายได้คณะฯ 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. แนวทางในการเพิ่มผลผลิต และปริมาณโปรตีนในปลาช่อนโดยการเลี้ยงด้วยอาหารผสม *Spirulina platensis* (เครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนบนประจำปีงบประมาณ 2550)
11. การเจริญเติบโต และคุณค่าทางโภชนาการของปลาช่อนที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* (รายได้ภาคฯ 2551)
12. ศักยภาพและแนวทางการใช้ประโยชน์จากสาหร่าย *Nostoc commune* (งบประมาณแผ่นดิน 2551-2552)
13. ศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เซลล์สาหร่ายไซยาโนแบคทีเรียที่มีชีวิตในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสีย (สกว. มิ.ย. 2550- มิ.ย. 2552)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2544. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควบคุมปริมาณแพลงก์ตอนพืช *Oscillatoria*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 9(3):19-23.
2. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2545. การควบคุมการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช *Oscillatoria* โดยใช้ฟอร์มาลินและคลอรีน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 18(3):30-37.
3. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2545. การบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วและแคดเมียมปนเปื้อนโดยใช้แหนเบ็ดเล็ก (*Lemna perpusilla* Torr.). วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 20 (3):1-11.
4. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ, ศักดิ์ชัย ชูโชติ, ปวีณา ทวีกิจการ และ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์. 2546. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายไซยาโนแบคทีเรีย : *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 21:48-60.
5. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ, ศักดิ์ชัย ชูโชติ, ปวีณา ทวีกิจการ และ จตุพร บัณฑิต. 2546. ผลของความเข้มข้นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำและการสร้างไขฟักของไรแดง. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 21:61-68
6. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2547. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris*. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3(1): 287-296.
7. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2547. การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ *Scenedesmus dimorphus* เป็นตัวดูดซับ. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 12(1):42-47.
8. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ และศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2547. การผลิตไขฟักของไรแดงภายใต้สภาวะการควบคุมระดับพีเอชและแอมโมเนีย. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 22(2):65-75.
9. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ และ จำรูญ เล้าสินวัฒนา. 2548. ผลของสารสกัดจากสาหร่ายต่อการงอกของพืชทดสอบ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 36:978-981.
10. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ บุปผา จงพัฒน์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ และ ปวีณา ทวีกิจการ. 2548. คุณค่าทางโภชนาการของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่แตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 23(2):38-47.
11. สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549. การสร้างไขฟักของไรแดงที่ระดับอุณหภูมิต่ำและอัตราฟักของไขฟักที่ฆ่าเชื้อด้วยฟอร์มาลิน และไขฟักที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24(2):54-62.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไข่น้ำ *Wolffia arrhiza* (L.) Wimmer. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24(3):1-14.
13. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ และ จำรูญ เล้าสินวัฒนา. 2549. ผลของแสงและอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของ *Phormidium angustissimum* ในการยับยั้งการงอกของเมล็ดพืชทดสอบ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 37(6):925-928.
14. ผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโต ปริมาณโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher. 2549. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14(2):40-49.
15. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2550. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Calothrix marchica* Lemm. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 25:13-26.
16. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ และ ศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2550. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria jatorvensis* และ *Microcystis aeruginosa*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14:46-54.
17. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ ศักดิ์ชัย ชูโชติ ปวีณา ทวีกิจการ นิธิ พันธุ์คงชื่น. 2551. การเจริญเติบโตของปลาไนแดง (*Oreochromis niloticus* X *O. mossambicus*) ที่เลี้ยงด้วยอาหารผสม *Spirulina platensis* แห่ง. การประชุมวิชาการประมงครั้งที่ 3 “เพื่อความมั่นคงด้านการประมงและทรัพยากรทางน้ำ” 8-9 ธันวาคม 2551. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ น. 95-104.
18. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ ศักดิ์ชัย ชูโชติ ปวีณา ทวีกิจการ ชาตีสกุล เตรียมธนานันท์. 2551. คุณค่าทางโภชนาการและปริมาณรงควัตถุของ *Spirulina platensis* ที่เลี้ยงในปุ๋ยผสมมูลสุกร. การประชุมวิชาการประมงครั้งที่ 3 “เพื่อความมั่นคงด้านการประมงและทรัพยากรทางน้ำ” 8-9 ธันวาคม 2551. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ น. 105-115
19. อธิยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. การดูดซับตะกั่วโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Stigonema* sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 28:20-30.
20. อภิญญา สโมสร, สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ, อัมร อินทร์สังข์ และ จรงค์ศักดิ์ พุ่มนวน. 2553. ประสิทธิภาพของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดใหญ่ ต่อไรฝุ่น *Dematophagoides pteronyssinus* (Trouessart) โดยวิธีสัมผัส. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 184-191.
21. อธิยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2553. การเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สารอาหารที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 193-202.
22. นำถม ตั้งคำ และ สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2553. คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาตกที่มีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 305-312.

งานวิจัยที่ตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004. Bioremoval of Lead by cyanobacteria : *Gloeocapsa* sp. and *Calothrix marchica*. Proceeding of the 1st KMITL International Conference on Integration of Science and technology. 2:188-191.
2. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004 . Lead (Pb^{2+}) Adsorption potentials of *Gloeocapsa* sp. and role of its capsular polysaccharides. Proceeding of The International Conference on Sustainable Energy and Environment. 3(011):210-213 .
3. Ruangsomboon, S., A. Chidthaisong, B. Bunnag, D. Inthorn and N.W. Harvey. 2004b. Lead (Pb^{2+}) Adsorption potentials of *Gloeocapsa* sp. and role of its capsular polysaccharides. Proceeding of The International Conference on Sustainable Energy and Environment. 3(011):210-213 .
4. Ruangsomboon, S. and Wongrat, L. 2006. Bioaccumulation of cadmium in an experimental aquatic food chain involving phytoplankton (*C. regularis*), zooplankton (*M. macrocopa*), and the predatory catfish. Aquatic Toxicology. 78:15-20.
5. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006. Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa*. Water Research. 40:3759-3766.
6. Ruangsomboon, S. and Wongrat, L. 2007. Bioaccumulation of Cadmium in an Experimental Aquatic Ecosystem Involving Phytoplankton, Zooplankton, Catfish and Sediment. Kasetsart Journal (Natural Science) 41:180-185.
7. Ruangsomboon, S. 2007. Removal of lead (Pb^{2+}) by the cyanobacterium *Phormidium angustissimum*. Proceedings of The International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST) "Biological Diversity, Food and Agricultural Technology", Bangkok, Thailand. 26-27 April 2007, 340-344.
8. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2007. Lead (Pb^{2+}) adsorption characteristics and sugar composition of capsular polysaccharides of cyanobacterium *Calothrix marchica*. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 29:529-541.
9. Ruangsomboon, S. 2007. Removal of lead (Pb^{2+}) by the cyanobacterium *Phormidium angustissimum*. Proceedings of The International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST) "Biological Diversity, Food and Agricultural Technology". 26-27 April 2007. p. 340-344.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Ruangsomboon, S. 2007. Nitrate, ammonia and orthophosphate removal from wastewater by duckweed *Lemna perpusilla* Torr. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 922-925.
11. Ruangsomboon, S. 2007. Study of the parameters affecting the binding of cadmium (Cd^{2+}) in solution by *Phormidium angustissimum* West & G.S. West. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 918-921.
12. Ruangsomboon, S. and Choochote, S. 2007. Effect of feeding diets containing *Nostoc commune* on growth, survival, protein and carotenoid content of red tilapia *Oreochromis niloticus*. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 772-775.
13. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2008. Removal of lead (Pb^{2+}) by cyanobacteria *Gloeocapsa* sp. Bioresource Technology. 99:5650-5658.
14. Ruangsomboon, S. Choochote, S. and Taveekijakarn P. 2010. Growth performance and nutritional composition of red tilapia (*Oreochromis niloticus* X *O. mossambicus*) fed Diets containing raw *Spirulina platensis*. The international conference on Sustainable community development 2010. 21-23 January, 2010. Khon Kaen University, Nong Khai campus, Thailand and Vientiane, Lao PDR. P. 27-31.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้