



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับสี้อมโดยการใส่สาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตแบบตรึงเซลล์
Biosorption of Dye by Immobilized Living Cell of Microalgae

รศ. ดร. สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์

RCH
TD
758.8
.C65
78211

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
รับ เดือน ปี.....

130294

2 1259 2557

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12598367

ชื่อโครงการ การดูดซับสีย้อมโดยการใส่สาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตแบบตรึงเซลล์
 แหล่งเงิน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
 ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 100,000 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556 /
 หัวหน้าโครงการและผู้ร่วมโครงการวิจัย รศ. ดร. สุณีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การทดลองการดูดซับสีย้อม Malachite green (basic dye), และ Benewol red (acid dye) โดยใช้สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กชนิด *Scenedesmus dimorphus* แบบตรึงเซลล์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่าปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิด พบว่าระดับพีเอชของสารละลาย Malachite green และ Benewol Red Rs ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมคือระดับพีเอชเท่ากับ 2 และ 3 ระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลในการดูดซับ (equilibrium time) ของ Malachite green และ Benewol คือ 1,440 และ 180 นาที ตามลำดับ การดูดซับ Malachite green และ Benewol จะมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ของ *S. dimorphus* ลดลง โดยการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดมีรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir adsorption isotherm โดย *S. dimorphus* มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_{max}) Malachite green และ Benewol เท่ากับ 111.16 ± 69.43 และ 31.92 ± 0.34 mg/g ตามลำดับ

คำสำคัญ : สาหร่ายสีเขียว, สีย้อม, การบำบัดน้ำเสีย, การตรึงเซลล์, มาลาไคท์กรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

Research Title: Biosorption of dye by immobilized living cell of microalgae

Researcher: Assoc. Prof. Dr. Suneerat Ruangsomboon

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

ABSTRACT

The malachite green (basic dye) and benewol red (acid dye) removal by immobilized *Scenedesmus dimorphus* was studied in laboratory. The optimum pH for malachite green and benewol red removal by *S. dimorphus* was 2 and 3 respectively. The equilibrium time for malachite green and benewol red removal by *S. dimorphus* was 1,440 and 180 min. The dye adsorption capacity was increased when the biomass of *S. dimorphus* decreased. The adsorption of malachite green and benewol red by *S. dimorphus* was fitted to Langmuir adsorption isotherm with the maximum uptake capacity of 111.16 ± 69.43 and 31.92 ± 0.34 mg/g, respectively.

Key words: green algae, dye, wastewater treatment, immobilized cell, malachite green

III

กิตติกรรมประกาศ

“การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556”

รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	IX
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.....	4
2.1 ลักษณะของสีย้อม.....	4
2.2 อันตรายและปัญหาที่เกิดจากสีย้อม.....	4
2.3 ปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดจากสีย้อม.....	6
2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน.....	6
2.5 สาหร่ายและความเหมาะสมในการนำมาดูดซับสีย้อม.....	7
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยสาหร่าย.....	8
2.7 กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 การเตรียมสาหร่าย.....	12
3.2 การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม.....	12
3.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม.....	12
3.4 การหาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย.....	12
3.5 ศึกษาหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	13
3.6 ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การศึกษาจุลพลศาสตร์การดูดซับ.....	13
3.8 การวัดปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	13
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	14
4.1 ระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม.....	14
4.2. ระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับ.....	15
4.3 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม.....	18
4.4 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม (ไอโซเทอร์ม)	19
4.5 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i>	21
4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	26
เอกสารอ้างอิง.....	27
ประวัติผู้เขียน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ปริมาณสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS ที่ถูกดูดซับโดย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ระดับ pH แตกต่างกัน	15
4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS ที่เวลาแตกต่างกันโดย <i>Scenedesmus dimorphus</i> แบบตรึงเซลล์.....	17
4.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green Crystal และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i>	19
4.4 แสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i>	20
4.5 เปอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน.....	23
4.6 อันดับของปฏิกิริยาของสีย้อม Benewol Res RS โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus</i>	25

VII

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.1 เเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม Malachite Green โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน.....	16
4.2 ปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน.....	16
4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuirของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ และไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ โดย <i>Scenedesmus dimorphus</i> แบบตรึงเซลล์.....	20
4.4 เเปอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน.....	22
4.5 การดูดซับสีย้อม malachite green โดยสาหร่าย <i>Scenedesmus dimorphus</i> ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สีย้อม (Dyes) เป็นสีสังเคราะห์ มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อาหาร เครื่องสำอาง และมีปริมาณการใช้สีย้อมเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มผลผลิต การผลิตสีย้อมทั่วโลกมีมากถึงเจ็ดแสนตันต่อปี ซึ่งประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ของสีย้อมที่ผลิตขึ้นทั้งหมดนี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการกำจัดออกจากน้ำทิ้ง (Aksu and Tezer, 2005; Mishra and Tripathy, 1993) การระบายน้ำที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงแหล่งน้ำทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงตามมา โดยสีย้อมจะมีความคงตัวอยู่ในแหล่งน้ำ ไม่ย่อยสลายด้วยวิธีการทางธรรมชาติ ทำให้มีปริมาณ BOD, COD ในน้ำสูงขึ้น สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite Green) ซึ่งมีการแพร่เข้าไปสะสมและตกค้างในตัวสัตว์น้ำ เมื่อมนุษย์นำมาบริโภค จะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง มีอาการหายใจผิดปกติ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง (El-Sheekh et al., 2009) ซึ่งในประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา สหภาพยุโรป ได้ออกกฏระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ตกค้างในสัตว์น้ำที่จำหน่ายเพื่อการบริโภค ดังนั้นจึงควรมีการลดปริมาณสีย้อมด้วยวิธีที่เหมาะสมออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำเหล่านั้นลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนในอดีต เช่นการใช้โอโซน ทุ่นลอยน้ำไฟฟ้า การกรองด้วยเยื่อกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน และการตกตะกอน มีราคาแพงและมีการสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป (Mittal et al., 2005) ปัจจุบันวิธีการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ (biosorption) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เพราะมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งได้มีความพยายามในการหาตัวดูดซับที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง โดยสาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยม เพราะมีปริมาณมากในธรรมชาติ เพาะเลี้ยงได้ง่าย วัฏจักรชีวิตสั้น และมีรายงานว่า สาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดี (Pandey et al., 2007) โดยสาหร่ายขนาดเล็กจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าสาหร่ายขนาดใหญ่ เพราะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสที่มากกว่า และสาหร่ายที่มีชีวิตจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าสาหร่ายที่ตายเพราะมีกลไกการทำงานของเซลล์ช่วยในการดูดซับ แต่พบปัญหาคือสาหร่ายขนาดเล็กเมื่อดูดซับสีย้อมเสร็จแล้ว การแยกสาหร่ายออกจากน้ำเสียทำได้ยาก เพราะขนาดสาหร่ายที่เล็กเกินไป ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ โดยการทำให้สาหร่ายยึดเกาะกับวัสดุจุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถแยกสาหร่ายออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วได้ง่าย

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตที่ตรึงเซลล์เป็นก้อนขนาดเล็ก ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์ กรีน (basic dye) และเบเนวอล เรด (acid dye) โดยทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการที่จะทำให้สาหร่ายสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุด และศึกษากลไกในการกำจัดสีย้อมของสาหร่าย เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาารูปแบบการตรึงเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กมีชีวิตเป็นก้อนขนาดเล็กที่เหมาะสม

1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตแบบตรึงเซลล์ เพื่อให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงสุด ศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม (adsorption kinetics) ของสาหร่าย เพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน

1.2.3 ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน โดยการใช้วิธีตกจมในขั้นต้น และต่อด้วยวิธีดูดซับทางชีวภาพด้วยสาหร่าย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กมีชีวิตแบบตรึงเซลล์ ในการกำจัดสีย้อม Malachite Green (basic dye) และเบเนวอล เรด (acid dye) โดยหาสภาวะในการดูดซับสีย้อมที่เหมาะสมคือ ระดับพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณสาหร่าย ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้น และศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับโดยการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับ (adsorption isotherm) อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) ขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (rate limiting step)

1.4 สมมุติฐานงานวิจัย

สาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ สาหร่ายที่เจริญเติบโตแล้วแผ่เป็นแผ่นขนาดใหญ่สามารถเก็บเกี่ยวออกจากแหล่งน้ำ หรือบ่อบำบัดน้ำเสียได้ง่าย Nostoc เป็นสาหร่ายที่เจริญเติบโตรวมเป็นแผ่น มีเมือกหุ้มกลุ่มเซลล์ จึงน่าจะดูดซับสีย้อมได้มากกว่าสาหร่ายทั่วไป และสามารถกำจัดออกจากระบบบำบัดน้ำเสียหลังการดูดซับได้ง่าย

1.5 คำสำคัญของการวิจัย

นอสตอค, ไชยาโนแบคทีเรีย, สีย้อม, การบำบัดน้ำเสีย

Nostoc, cyanobacteria, dey, wastewater treatment

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถควบคุมและลดปริมาณของเสียอันตรายในน้ำทิ้ง และแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้ง โดยใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อม ซึ่งช่วยลดต้นทุนในขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัด

1.6.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับนักวิจัยท่านอื่น ๆ ต่อไปทางด้าน สาหร่ายวิทยา ด้านการบำบัดน้ำเสีย ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.3 ทำให้ประชาชนมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอันตรายและผลเสียของสีย้อมเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อหาวิธีในการป้องกัน

1.6.4 สามารถผลิตบัณฑิต ให้เป็นนักวิจัยที่มีความรู้ด้านการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของสีย้อม

สีย้อม (Dyes) เป็นวัตถุที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ฟอกหนัง 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)

สีย้อมเป็นสารเคมีจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิมิตัวสามารถเปลี่ยนให้เป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใยและกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป 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 พันธะโควาเลนต์ 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 มาก สามารถละลายตัวได้ง่ายและรวดเร็วในน้ำร้อน ดูดซึมติดเส้นใยได้ง่ายและรวดเร็ว มีคุณสมบัติคงทนต่อแสงแดด การซักถูก เหงื่อ น้ำและการซักฟอกอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดีมาก

สีเบสิก (basic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและโพลีเอคริลิก ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนแต่ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ประกอบด้วยหมู่ แอมโมเนียมไอออน (NR_4^+) และไนโตรเนียมไอออน (NO_2^+) (Marungrueng and Pavasant, 2007)

2.2 อันตรายและปัญหาที่เกิดจากสีย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากการตรวจสอบสารเคมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณใกล้เคียงซึ่งเชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน ตรวจพบโลหะหนักและสารเคมีอันตรายที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงในน้ำและตะกอนดินในคลองที่เชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยา สารเคมีบางชนิดที่พบนั้นมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานน้ำผิวดินในประเทศไทย นอกจากนี้ยังพบสารเคมีที่ยังไม่ถูกบรรจุอยู่ในมาตรฐานของประเทศไทยอีกด้วย ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมปนเปื้อนไปด้วยสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น สารโนนิลฟินอล (Nonyl phenols) เป็นสารที่คงทนในสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติรบกวนการทำงานของฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิตและระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ และสาร 2-เนฟทาลีนามีน หรือ 2-เนฟทิลเอมีน (2-Naphthalenamine หรือ 2 naphthylamine) เป็นสารที่ได้จากการสลายตัวของสีย้อมผ้าบางชนิด ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในกระเพาะปัสสาวะคน และพบสารไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (tri-iso-butyl phosphate; TiBP) ซึ่งเป็นสารพิษที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกและย้อมผ้า (กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย, 2553)

มลพิษจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นปัญหาที่ไม่น้อยกว่าอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งผลการศึกษาในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมนี้ เป็นตัวอย่างบ่งชี้ถึงปัญหาโดยรวมของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ล้วนปล่อยลงสู่แม่น้ำหรือคลองที่เชื่อมต่อ มีรายงานถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากคลองบางนางเกร็งพบปนเปื้อนสารโนนิลฟินอลและไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (TiBP) และยังพบทองแดงและนิกเกิลสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำผิวดินของไทยถึง 2 เท่า (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิษของมาลาไคท์ กรีน ต่อมมนุษย์ ส่งผลต่อระบบการหายใจของเซลล์ ซึ่งเป็นแหล่งสร้างพลังงานสังเคราะห์ทางเคมี ทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หากร่างกายสะสมสารเหล่านี้เข้าไปมาก ๆ อาจมีอาการเป็นอัมพาตที่แขน ขา จะส่งผลต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (กรมประมง. 2548) ดังนั้นจึงถือเป็นสารต้องห้าม ไม่ให้มีตกค้างในสัตว์น้ำ ซึ่งประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ ได้ออกกฎระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค (www.nfi.or.th)

2.3 ปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดจากสีย้อม

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

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

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

2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน

2.4.1 การกำจัดสีย้อมโดยทั่วไป

วิธีในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนที่ใช้อยู่มีหลายวิธี อาจมีการใช้วิธีทางชีวภาพร่วมกับวิธีทางเคมีและกายภาพ เพื่อให้สามารถลดปริมาณสีย้อมได้มากที่สุด เช่นการใช้สารเคมี การใช้โอโซน การใช้แสงให้เกิดการออกซิเดชัน การใช้ไฟฟ้า การใช้รังสี ไซโรเวอร์ส 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) แต่พบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมแบบดั้งเดิมไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้ หรือกำจัดได้มี

ประสิทธิภาพต่ำ มีราคาแพง มีข้อจำกัดในการใช้ และยังสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป (Kumar et al., 2006)

การกำจัดสีย้อมโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนต์ันร่วมกับการตกตะกอน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียน้อย (แต่ยังเป็นค่าที่เป็นอันตรายต่อแหล่งน้ำ) การใช้สารเคมีจะมีต้นทุนสูง ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณมาก ๆ ซึ่งการใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียต่อจากขั้นตอนการตกตะกอนด้วยสารเคมีจะมีความเหมาะสมมากกว่า (จันทิมา, 2552)

2.4.2 การกำจัดสีย้อมโดยวิธีชีวภาพ

วิธีที่นิยมในปัจจุบันในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม คือใช้วิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี และส่วนใหญ่ในอดีตตัวดูดซับที่นิยมคือคาร์บอนกัมมันต์ ที่มีค่าการดูดซับสีย้อมหลายประเภทได้ค่อนข้างสูง (Choy et al., 1999; Robinson et al., 2001) แต่ปัญหาคือราคาของคาร์บอนกัมมันต์ยังมีราคาสูง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาวิธีบำบัดที่มีค่าใช้จ่ายลดลง เช่นการหาประเภทตัวดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เช่นการใช้ เปลือกส้ม (Namasivayam et al., 1996) กากผลปาล์ม (Nassar and Magdy, 1997) ถ่าน (Ho and McKay, 1998) เปลือกไม้ เศษฝ้าย แกลบ (McKay et al., 1999) ชานอ้อย (Khattri 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

2.5.1 ความเหมาะสมในด้านคุณภาพของสาหร่ายในการกำจัดสีย้อม

การดูดซับทางชีวภาพในสาหร่ายส่วนใหญ่เกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ผนังเซลล์เป็นส่วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง เมื่อสัมผัสกับสารละลายสีย้อม ไอออนของสีย้อมจะจับกับผนังเซลล์หรือกับเยื่อหุ้มเซลล์ของสาหร่าย (Rothstein, 1959) โดยที่ผิวนอกสุดของเซลล์สาหร่าย ทั้งกลุ่มโปรคาริโอตและยูคาริโอตประกอบด้วยโปรตีน 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 โครงสร้างจอร์จุมิ

ของแอมโมเนียมไอออน (NR^+_4) และไนโตรเนียมไอออน (NO^+_2) ซึ่งทำให้สามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ (Marungrueng and Pavasant, 2007)

ในสาหร่ายหมักคาร์บอกซิลเป็นตัวหลักที่จับไอออน โดยหมักคาร์บอกซิลจะพบใน 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 แต่ความสามารถในการทำขึ้นกับชนิดของสาหร่ายขนาดเล็กเหล่านั้น (Lei et al., 2002)

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

2.5.2 ข้อดีของการใช้สาหร่ายในการดูดซับสีย้อม

สาหร่ายทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและสาหร่ายขนาดใหญ่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ (Hu, 1998; Volesky, 1990; Van-Hille et al., 1999) ซึ่งข้อดีของสาหร่ายขนาดเล็กคือ สามารถเพาะเลี้ยงเพื่อขยายให้มีปริมาณมากได้เร็ว ไม่ต้องรอเก็บเกี่ยวจากธรรมชาติเหมือนสาหร่ายขนาดใหญ่ซึ่งผลผลิตจะขึ้นกับฤดูกาล แต่มีต้นทุนในการเพาะเลี้ยง (Lee, 2001) สาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้อย่างเฉพาะเจาะจงคือสามารถเลือกดูดสีย้อมบางชนิดได้ และสาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมหลาย ๆ ชนิดได้พร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังสามารถล้าง (desorption) สีย้อมออกมาจากเซลล์สาหร่ายได้ ซึ่งการที่สามารถล้างสีย้อมออกมาได้ทำให้สามารถนำสีย้อมเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่ และตัวดูดซับหรือสาหร่ายก็สามารถนำกลับไปใช้ดูดซับสีย้อมใหม่ได้

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยสาหร่าย

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสีย้อมของสาหร่ายนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับเป็นต้น (Akhtar et al., 2003) โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายมีดังนี้

2.6.1 พีเอช

ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยสาหร่าย เพราะค่าพีเอชมีความเกี่ยวข้องกับการละลายของสีย้อมในน้ำ และการทำงานของหมู่ฟังก์ชันหรือตำแหน่งยึดจับที่อยู่บนผิวเซลล์ของสาหร่าย หมู่ฟังก์ชันแต่ละประเภทมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid dissociation constant- pKa) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำงานหรือ

จะสามารถยึดจับกับไอออนของสีย้อมได้ดีต่อเมื่อมีค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมคือเท่ากับหรือสูงกว่าค่า pKa นั้นเอง โดยมีรายงานถึงค่า pKa ของหมู่ carboxyl, phosphate และ hydroxyl ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะทำหน้าที่ในการจับไอออนได้ดีที่พีเอชในช่วง 2-5, 5-9 และ 9-12 ตามลำดับ (Cho et al., 1994)

พีเอชยังมีผลต่อการละลายของสีย้อม โดยสีย้อมแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายได้แตกต่างกันไป ซึ่งสาหร่ายจะกำจัดสีย้อมได้ดีเมื่อสีย้อมอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่เป็นไอออน แต่อย่างไรก็ตาม แม้พีเอชต่ำจะทำให้สีย้อมละลายซึ่งทำให้สาหร่ายสามารถจับหรือกำจัดสีย้อมเหล่านี้ได้ดี แต่พีเอชต่ำมีข้อเสียคือมีปริมาณ H^+ สูง ซึ่งสามารถไปแข่งขันกับประจุบวกของสีย้อม ในการจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์สาหร่ายได้ ดังนั้นพีเอชที่ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของสาหร่ายลดลงได้เช่นกัน (Ahner et al., 1994; Matheickal et al., 1999) แต่ยกเว้นในกรณีที่สีย้อมบางชนิดมีค่าเป็นประจุลบที่พีเอชต่ำ พบว่าการดูดซับที่พีเอชต่ำเกิดได้ดี เป็นเพราะประจุลบของสีย้อม จับกับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่าย

โดยพบว่าเมื่อนำสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* มาดูดซับสี acid dyes ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีไอออนลบ ที่พีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 2-6 พบว่าสาหร่ายดูดซับสีย้อมได้ดีที่พีเอช 2-3 (Ozer et al., 2005) ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสีย้อม เมื่อ pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประจุลบที่อยู่บนผิวหน้าของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นและประจุบวกลดลง ผิวหน้าที่มีประจุลบจะไม่ส่งผลให้ดูดซับสีย้อมที่มีไอออนลบ โดยทั่วไปการดูดซับสีย้อมที่เป็นกรดจะดูดซับได้มากในสภาวะสารละลายที่เป็นกรดมากกว่าที่เป็นกลางและด่าง (Ozer et al., 2006a)

2.6.2 ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสีย้อม

ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับโดยสาหร่ายขึ้นกับระยะเวลาในการที่สาหร่ายนั้นสัมผัสกับสารละลาย หรือระยะเวลาที่ตำแหน่งยึดจับสัมผัสกับไอออนของสีย้อมในสารละลายนั่นเอง โดยเมื่อสาหร่ายเริ่มสัมผัสกับไอออนของสีย้อมจะเกิดการดูดซับที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งยึดจับพื้นที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายนั้นว่างอยู่และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งตำแหน่งยึดจับที่ผิวของสาหร่ายดูดซับสีย้อมไว้เต็มแล้วทำให้ปริมาณที่ถูกดูดซับไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ณ จุดนี้คือจุดสมดุลของการดูดซับ (equilibrium)

ซึ่งการเข้าสู่จุดสมดุลของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อมขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและชนิดของสีย้อมที่แตกต่างกันด้วย เพราะชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกันทำให้รูปร่างเซลล์หรือกลุ่มเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันมีผลต่อพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชัน ตำแหน่งของตัวยึดจับหรือจำนวนตัวยึดจับบนผิวสาหร่ายแต่ละชนิดนั้น 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), การ

ใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสีย้อม reactive dye (synazol) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 18 ชั่วโมง (Khalaf, 2008)

2.6.3 ความเข้มข้นของสีย้อม

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดสีย้อมโดยสาหร่าย ความเข้มข้นสีย้อมที่สูงในสารละลายจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับระหว่างผนังเซลล์ของสาหร่าย จึงทำให้มีแรงผลักของประจุสูง ทำให้การขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายเกิดได้แรงและเร็ว ทำให้กำจัดสีย้อมได้เร็วและได้มาก ความเข้มข้นเริ่มต้นมีความสำคัญในการเป็นแรงผลักดันให้ชนะแรงต้านของมวลการขนถ่ายของโมเลกุลระหว่างน้ำและของแข็ง Ozer et al. (2006b) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่อการดูดซับของ AR 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่ 25-3600 mg/L พบว่าที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่ำ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นปริมาณสีย้อมจะถูกดูดเพิ่มขึ้นแบบ linear

2.6.4 ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ

ปริมาณหรือความหนาแน่นของสาหร่าย (ตัวดูดซับ) ในสารละลายสีย้อม (biomass concentration/ density of biosorbent) แสดงถึงปริมาณของตำแหน่งยึดจับ เมื่อจำนวนสาหร่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (Carr et al., 1998) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับถึงแม้จะเพิ่มปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับหรือถูกกำจัด แต่เป็นผลทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักสาหร่ายลดลง (Franklin et al., 2001) ซึ่งเป็นเพราะว่าที่ตัวดูดซับจำนวนมากจะเกิดการเกาะกลุ่มกันของตัวดูดซับในระหว่างการดูดซับ หรือเป็นการลดระยะห่างระหว่างตัวดูดซับลง ทำให้จำนวนตำแหน่งยึดจับสำหรับจับกับสีย้อมลดลง หรือทำให้พื้นที่ผิวสำหรับจับสีย้อมลดลง เพราะตัวดูดซับเกาะติดกันเอง (Ahuja et al. 1999a; Donmez et al, 1999) ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณตัวดูดซับที่สูงสามารถชักนำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ

2.7 กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม

2.7.1 จลนศาสตร์การดูดซับ

เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพ Marungrueng and Pavasant (2007) รายงานว่าโดยทั่วไปกระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้โดย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มต้นด้วยการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ การแพร่เข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน และการดูดซับของสารละลายผ่านเข้าสู่ภายในผิวหน้าของรูพรุน และช่อง capillaries ของตัวดูดซับระหว่าง 3 ชั้นตอนนี้ ชั้นตอนสุดท้ายมีความสัมพันธ์กับความเร็ว และไม่สามารถพิจารณาอัตราของชั้นต้น การดูดซับสีย้อมถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และแพร่เข้าสู่อนุภาค

2.7.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การใช้สารย้อมดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนมีศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) จนอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับเรียกว่าเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลย์ (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต้องทำที่จุดสมดุลย์ของการดูดซับและภายใต้อุณหภูมิคงที่

การดูดซับสีย้อมโดยสารย้อมนั้น ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm โดยในแต่ละการทดลองจะมีการนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสีย้อมโดยที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir แสดงว่ามีผิวหน้าของตัวดูดซับแบบ homogenous มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอนและไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich แสดงว่าตัวดูดซับประกอบด้วยผิวหน้าที่เป็น heterogeneous ซึ่งมีความแตกต่างของชั้นซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่งยึดจับของการดูดซับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มสาหร่ายสีเขียว (*Scenedesmus dimorphus*) โดยเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารสูตร *Chlorella medium* ภายในห้องปฏิบัติการ จนสาหร่ายเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะปลายของการเจริญเติบโตเต็มที่ จึงทำการเก็บเซลล์สาหร่ายด้วยวิธีปั่นเหวี่ยง และล้างสารอาหารที่อาจตกค้างออกจากสาหร่าย จากนั้นนำเซลล์สาหร่ายมาขึ้นรูปเป็นก้อนวุ้นกลมขนาดเล็ก (alginate bead) โดยใช้ sodium alginate และ CaCl_2 โดยให้ทุกเม็ดมีขนาดใกล้เคียงกัน และสาหร่ายยังสามารถมีชีวิตอยู่ในก้อนวุ้นได้ เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับสีย้อมต่อไป

สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง สีเบสิก (basic dye) Malachite Green Crystal
สีแอซิด (acid dye) Benewol Red RS

3.2 การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

นำสาหร่ายที่ตรึงเซลล์เป็นเม็ดวุ้น ใส่ในสารละลายสีย้อมที่มีระดับพีเอชแตกต่างกัน คือ พีเอชเริ่มต้นที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 โดยใส่สาหร่าย 10 กรัมต่อลิตร น้ำหนักสด ต่อสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร ในสารละลายสีย้อม Malachite green ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, Benewol Red RS ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน ฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที โดยทดลองระดับพีเอชละ 3 ชั่วโมง และมีชุดทดลองที่มีแต่เม็ดวุ้นเปล่าและชุดสีย้อมไม่ใส่สาหร่ายเป็นชุดควบคุม เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองเม็ดวุ้นสาหร่ายออกจากสารละลาย และวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วยเครื่อง spectrophotometer

3.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชที่เหมาะสม (ข้อ 2) โดยใส่สาหร่ายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดวุ้น ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร ต่อสารละลายสีย้อม Malachite green ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร Benewol Red RS ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าบน ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองกรองสาหร่ายออกจากสารละลายและวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วย และหาจุดสมดุลในการดูดซับโดยการสร้างค่าระหว่างระยะเวลากับค่าการดูดซับ

3.4 การหาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย

เตรียมสารละลายสีย้อมที่ระดับพีเอชที่เหมาะสม ใส่สาหร่ายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดวุ้น ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร โดยจะมีความเข้มข้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน คือ 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker (120 rpm, 25 องศาเซลเซียส) จนเข้าสู่จุดสมดุล (ข้อ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ศึกษาหาปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชที่เหมาะสม ใส่สารละลายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดวุ้น โดยผันแปรปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, และ 60 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสีย้อม Malachite green ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร Benewol Red RS ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker (120 rpm, 25 องศาเซลเซียส) จนเข้าสู่จุดสมดุล และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลาย

3.6 ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชที่เหมาะสม ใส่สารละลายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดวุ้น 5 กรัมต่อลิตร (เซลล์เปียก) ปริมาณสีย้อม 10 มิลลิลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร โดยผันแปรความเข้มข้นของสีย้อม 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าบน shaker (120 rpm, 25 องศาเซลเซียส) จนเข้าสู่จุดสมดุลและวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย

3.7 การศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลนศาสตร์โดยใส่สารละลายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดวุ้น 5 กรัมต่อลิตร ในสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 10, 20, 40, 60, 80, 160, 240, 320 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมง และศึกษาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) และขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ (rate limiting step) โดยสร้างกราฟระหว่างรากที่สองของเวลา (นาที) กับค่าการดูดซับ เพื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาค ปลูกสร้างกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับสารละลายที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ ต่อสารละลายสีย้อมเริ่มต้น เพื่อหาอัตราเร็วของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งข้อมูลที่ได้จะทำให้สามารถมาพัฒนาออกแบบระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น เพราะสามารถหาวิธีในการลดข้อจำกัดของการดูดซับของสารละลายแต่ละชนิดได้

3.8 การวัดปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปริมาณสีย้อม ด้วยเครื่อง spectrophotometer (Genesys 20 Thermo Spectronic) วางแผนการทดลองแบบ CRD เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในแต่ละปัจจัยโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป สำหรับคอมพิวเตอร์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

และหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ โดยการหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการ
ของ Langmuir และ Freundlich



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากมีผลกระทบ ไม่ใช่แค่ผิวหน้าที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น แต่รวมไปถึงคุณสมบัติทางเคมีในสารละลายของสีย้อมด้วย เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิส การรวมตัวของไอออนทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ปฏิกิริยารีดอกซ์ และการตกตะกอน ซึ่งล้วนแต่เป็นผลกระทบที่เกิดมาจากค่าความเป็นกรด-ด่าง ในทำนองเดียวกัน ผลกระทบจากค่าความเป็นกรดและค่าความเป็นด่างนั้นยังส่งผลต่อการปรับตัวของตัวดูดซับที่มีชีวิตและความสามารถในการดูดซับสีย้อมอีกด้วย (Ozer *et al.* 2005) จากการทดลองใช้สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ในการดูดซับสีย้อม 2 ชนิดคือ malachite green (basic dye), Benewol Red Rs (acid dye) พบว่าสาหร่ายมีการดูดซับสีย้อม malachite green และ Benewol Red Rs ได้ที่สารละลายสีย้อมที่มี pH 2 และ pH 3 ตามลำดับ โดยแตกต่างจากค่า pH อื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าการดูดซับ 10.69 ± 0.20 (99.47 \pm 0.11%) และ 11.11 ± 1.12 (31.17 \pm 2.35%) มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.1) จากการทดลองของ (Zumriye *et al.* 2004) ได้ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของการดูดซับสี (Remazol Black B (RB), Remazol Red RR (RR) และ Remazol Golden Yellow RNL(RGY) โดยสาหร่ายสด *Chlorella vulgaris* โดยศึกษาในช่วงพีเอช 1.0 ถึง 3.0 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสีย้อมทั้งสามชนิด มีค่าการดูดซับดีที่สุดที่พีเอช 2.0 การดูดซับได้ลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น RB มีปริมาณการดูดซับ 55.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และ สีย้อม RR มีปริมาณการดูดซับสูงสุดอยู่ใน 55.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบว่าค่าพีเอช ที่ดีที่สุดต่อการดูดซับมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดมีค่าการดูดซับที่สูงในสภาวะที่สารละลายมีค่าเป็นกรด (zumriye *et al.* 2004) ได้กล่าวเกี่ยวกับการดูดซับของสี acid dye ว่าเนื่องจากที่พีเอชต่ำ (2-3) มีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตระหว่างผิวหน้าที่เป็นประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสีย้อมแอนไอออนิก (anionic dyes) เมื่อสารละลายมีค่าเป็นกรด-ด่างต่ำลง (กรด) มีผลทำให้พื้นที่ผิวของสาหร่ายนั้นมีค่าประจุเป็นบวกมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้า มีผลทำให้การดูดซับมีมากกว่าสภาวะที่เป็นด่าง เนื่องจากสภาวะที่เป็นด่างนั้นพื้นที่ผิวของสาหร่ายมีประจุเป็นลบมากขึ้น การที่ผิวหน้าของสาหร่ายมีประจุเป็นลบมากขึ้นนั้นไม่ได้ส่งเสริมกระบวนการดูดซับแต่อย่างใด เนื่องด้วยเกิดการผลักกันของประจุไฟฟ้าที่เหมือนกัน จากการทดลองการเพิ่มขึ้นของการดูดซับของสี reactive dye ในสภาวะที่เป็นกรดสามารถอธิบายได้ในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของสาหร่ายและอนุภาคของสีย้อม แต่เมื่อค่าพีเอชมีค่าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้เกิดการรวมตัวของโมเลกุลสีย้อมจนทำให้โมเลกุลสีมีขนาดใหญ่มากขึ้น จนทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของผนังตัวดูดซับได้อีก (Vasanth Kumar *et al.* 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS ที่ถูกดูดซับโดย *Scenedesmus dimorphus* ที่ระดับ pH แตกต่างกัน

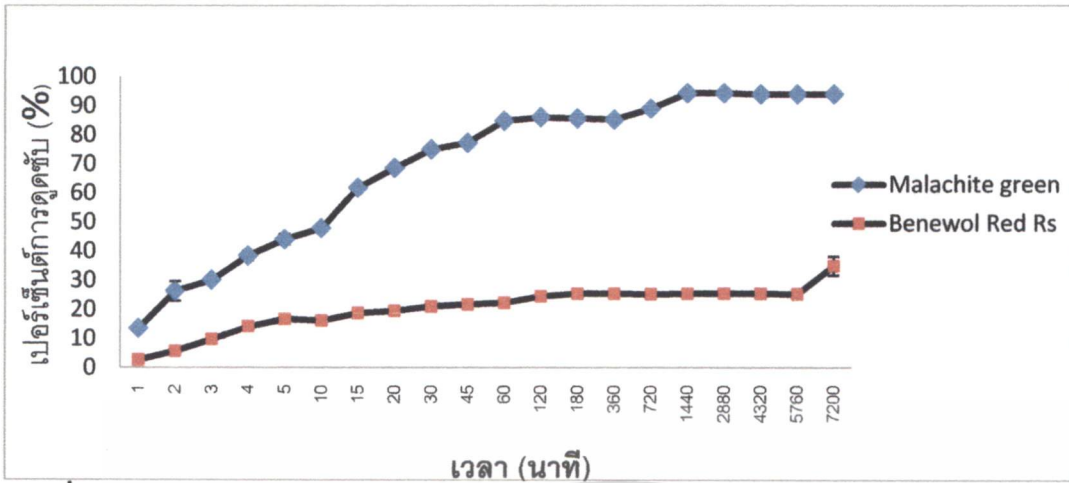
pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ		ค่าการดูดซับ	
	Malachite Green	Benewol Red RS	Malachite Green	Benewol Red RS
2	99.47±0.11 ^A	27.52±0.88 ^A	10.69±0.20 ^A	10.92±0.53 ^A
3	60.18±2.58 ^B	31.16±2.35 ^A	3.89±0.18 ^B	11.11±1.12 ^A
4	17.76±1.83 ^C	4.88±2.86 ^C	0.67±0.07 ^C	2.09±1.20 ^C
5	17.38±1.07 ^C	14.39±0.76 ^B	0.66±0.04 ^C	6.71±0.38 ^B
6	16.25±1.45 ^C	3.01±1.10 ^C	0.87±0.10 ^C	1.26±0.46 ^C
7	14.54±2.05 ^C	0.81±0.12 ^C	0.35±0.06 ^C	0.37±0.05 ^C
8	14.20±1.86 ^C	1.05±0.37 ^C	2.4±0.36 ^C	0.49±0.18 ^C

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

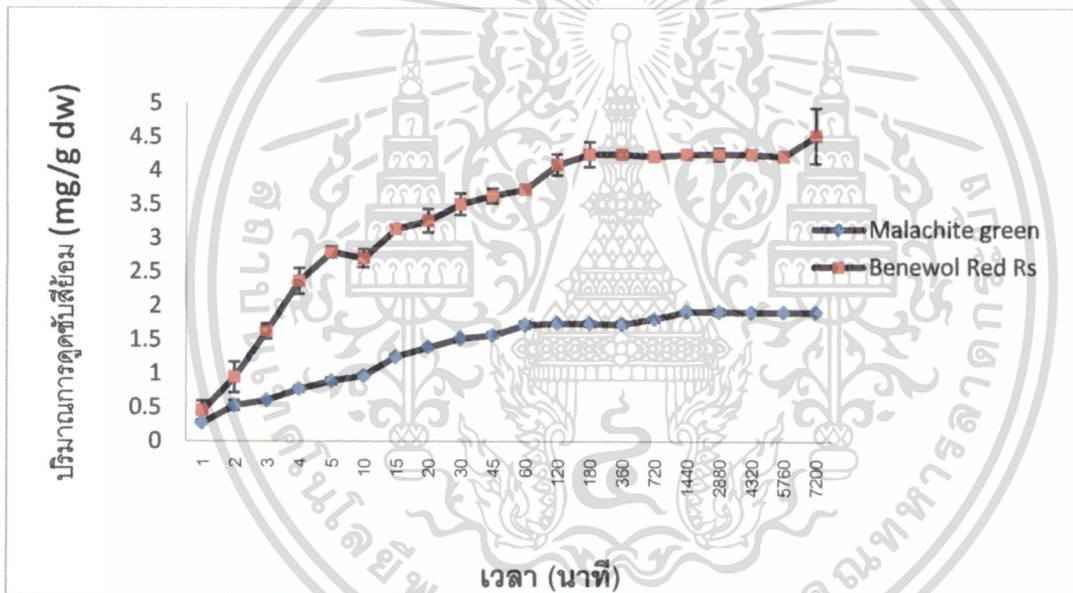
4.2. ระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาต่อการดูดซับสี Malachite green (basic dye), และ Benewol Red (acid dye) โดยใช้สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* แบบดริงเซลล์ ที่เวลา 120 ชม. ผลการทดลองพบว่าสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* แบบดริงเซลล์ สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่หน้าที่แรกที่ตัวดูดซับสัมผัสกับสารละลายสีย้อม โดยพบว่าที่หน้าที่แรกของการทดลองสีย้อม Malachite green มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่สูงกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ โดยที่สีย้อม Benewol Red มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีซึ่งพบว่าสีย้อมทั้ง 2 ชนิดเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับที่เร็วมากโดยมีเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับดังนี้ สีย้อม Malachite green มีเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับที่เวลา 1440 นาที สีย้อม Benewol Red มีเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับที่ 180 นาที ณ ที่มีเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับสีย้อมดังต่อไปนี้ สีย้อม Malachite green เท่ากับ 93.95 ± 0.28 และ 1.91 ± 0.03 mg/g สีย้อม Benewol Red เท่ากับ 34.89 ± 3.25 และ 4.52 ± 0.41 mg/g ตามลำดับ (ภาพที่ 4.1, 4.2 ตารางที่ 4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของ Malachite Green โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับสีของ Malachite Green โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากผลการทดลองของ Vijayaraghavan และ Yeoung-Sang Yun (2008) ทดลองการดูดซับสีของรีแอคทีฟ C.I. Reactive Black 5 โดยใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Laminaria sp.* (เซลล์แห้ง) พบว่าการดูดซับของสาหร่ายเข้าสู่จุดสมดุลที่ 360 นาที นอกจากนี้การทดลองของ Ozer et al. (2006) ได้ใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* (เซลล์แห้ง) ดูดซับสีของ Acid Red 274 พบว่าการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลที่ 3-5 นาที การเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับของสาหร่ายในการดูดซับสีของพบว่ามีผลขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายที่ใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากสาหร่ายที่ต่างชนิดกันจะมีรูปร่างและขนาดที่ต่างกัน มีผลทำให้พื้นที่ผิวที่ในการเกิดพันธะกับโมเลกุลของสีต่างกัน จึงมีผลทำให้การดูดซับสีได้ช้า เร็วแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่ต่างกันก็มีผลต่อการเข้าสู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุลในการดูดซับของสารร้ายซ้ำหรือเร็วต่างกัน โดยที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงจะมีผลทำให้สารร้ายที่ใช้เป็นตัวดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วกว่าเนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงจะมีแรงผลักดันระหว่างโมเลกุลที่สามารถเอาชนะแรงต้านที่ผิวของสารร้ายได้มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมเข้าจับกับตำแหน่งที่เกิดพันธะของสารร้ายได้ (Vijayaraghavan และ Yeoung-Sang Yun, 2008)

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS ที่เวลาแตกต่างกันโดย *Scenedesmus dimorphus* แบบตรึงเซลล์

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม		ค่าการดูดซับ q (mg/g)	
	malachite	benewol	malachite	benewol
1	13.56±0.98 ^I	2.76±0.83 ^H	0.28±0.02 ^J	0.46±0.14 ^H
2	26.33±3.34 ^H	5.72±0.96 ^H	0.54±0.07 ^I	0.95±0.23 ^H
3	30.16±1.00 ^H	9.79±1.02 ^G	0.61±0.03 ^I	1.63±0.11 ^G
4	38.43±1.67 ^G	14.22±0.48 ^F	0.78±0.05 ^H	2.37±0.19 ^F
5	44.10±1.76 ^F	16.80±0.75 ^{DEF}	0.90±0.05 ^{GH}	2.80±0.08 ^{DEF}
10	47.90±0.71 ^F	16.25±0.43 ^{EF}	0.97±0.03 ^G	2.71±0.13 ^{EF}
15	61.86±0.93 ^E	18.83±0.90 ^{CDE}	1.26±0.03 ^F	3.14±0.04 ^{CDE}
20	68.66±0.93 ^E	19.58±0.65 ^{CDE}	1.40±0.03 ^{EF}	3.26±0.17 ^{CDE}
30	75.07±0.53 ^C	21.06±0.26 ^{BCD}	1.53±0.03 ^{DE}	3.51±0.16 ^{BCD}
45	77.32±0.89 ^C	21.80±1.14 ^{BC}	1.57±0.04 ^{CD}	3.630.11 ^{BC}
60	84.85±1.24 ^B	22.35±0.24 ^{BC}	1.73±0.05 ^{BC}	3.72±0.00 ^{BC}
120	86.06±1.41 ^B	24.56±0.40 ^B	1.75±0.00 ^{ABC}	4.09±0.16 ^B
180	85.62±0.59 ^B	25.49±0.46 ^B	1.74±0.04 ^{ABC}	4.25±0.19 ^B
360	85.25±1.18 ^B	25.49±0.24 ^B	1.73±0.04 ^{ABC}	4.25±0.03 ^B
720	89.02±0.54 ^{AB}	25.30±0.42 ^B	1.81±0.04 ^{AB}	4.22±0.08 ^B
1440	94.33±0.56 ^A	25.49±0.24 ^B	1.92±0.02 ^A	4.25±0.06 ^B
2880	94.33±0.56 ^A	25.49±0.24 ^B	1.92±0.05 ^{AB}	4.25±0.09 ^B
4320	93.92±1.08 ^A	25.29±0.24 ^B	1.91±0.03 ^{AB}	4.25±0.05 ^B
5760	93.95±0.28 ^A	25.30±0.42 ^B	1.91±0.03 ^{AB}	4.22±0.04 ^B
7200	93.95±0.28 ^A	34.89±3.25 ^B	1.91±0.03 ^{AB}	4.52±0.41 ^B

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม

การทดลองเป็นการศึกษาผลปริมาณตัวดูดซับที่มีน้ำหนักแตกต่างกันที่ส่งผลต่อปริมาณสีที่ถูกดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม โดยใช้สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* (เซลล์เบียด) ปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 6 g/L ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่ 5 mg/L ทำการทดลองที่เวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับ ณ อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดซับมีความแตกต่างกันหมดในทุกปริมาณตัวดูดซับที่ทำการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าการดูดซับสูงที่สุดที่ระดับปริมาณตัวดูดซับมีค่าต่ำที่สุดคือที่ 1 g/L ค่าการดูดซับ malachite green และ benewol ที่ได้คือ 3.52 ± 0.06 mg/g และ 9.32 ± 0.18 mg/g เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับพบว่าค่าการดูดซับมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าการดูดซับต่ำสุดที่ระดับปริมาณการดูดซับสูงสุดซึ่ง malachite green และ benewol มีค่าการดูดซับเท่ากับ 0.30 ± 0.00 mg/g และ 0.42 ± 0.05 ตามลำดับเมื่อพิจารณาที่ %การดูดซับพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าการดูดซับที่ได้จากการทดลอง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับพบว่า %การดูดซับมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดย malachite green และ benewol มีค่าการดูดซับสูงที่สุดที่ระดับปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 97.49 ± 0.27 และ 87.53 ± 1.67 (ตารางที่ 4.3) การทดลองของ Ozer et al. (2006) ใช้สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* เซลล์แห้ง ปริมาณที่ 0.5-3 g/L ดูดซับสีย้อมแอซิด AR 337 (อุณหภูมิ 30 °C, ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 mg/l, ค่า pH 2.0) และ AB 324 (อุณหภูมิ 30 °C, ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 mg/l, pH 3.0) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับค่าการดูดซับมีค่าลดลงปริมาณหรือความหนาแน่นของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นของสาหร่าย มีผลทำให้พื้นที่ผิวด้านหน้าของสาหร่าย(ตัวดูดซับ)มีมากขึ้น ผิวหน้าของสาหร่ายจะเป็นตัวควบคุมความสามารถในการดูดซับ ถ้าผิวหน้ามีพื้นที่มากย่อมทำให้สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับมากขึ้นตามไปด้วย โดยมีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมถูกดูดซับที่บริเวณผิวด้านหน้าได้มากกว่าพื้นที่ผิวด้านหน้าที่มีน้อย (Khataee et al. 2010) แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมีผลทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักมีค่าลดลง ซึ่งเป็นเพราะว่าตัวดูดซับจำนวนมากจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเองทำให้ตำแหน่งในการเกิดพันธะหรือพื้นที่ในการเกิดการดูดซับมีค่าลดลง มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าและค่าการดูดซับลดลงซึ่งเป็นสิ่งที่พบในการทดลองในครั้งนี้ (Ozer et al. 2006) ในรายงานของ Ronbanchob and Prasert (2008) นำสาหร่าย *Caulerpa* มาทดสอบการดูดซับทองแดงแคดเมียมและตะกั่วความเข้มข้นของสารละลายที่ 0.1 ml m^{-3} pH 5 ใช้เวลาในการทดลอง 30 นาที จะได้ผลว่าเมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณของสาหร่ายยิ่งจะทำให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย และได้แสดงถึงค่าความจุการดูดซับที่จุดสมดุล ยิ่งปริมาณของสาหร่ายเพิ่มขึ้นค่าความจุการดูดซับที่จุดสมดุลยิ่งลดลง โดยปริมาณของสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับทองแดงได้ดีที่สุดคือ 17.5 g L^{-1}

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับและปริมาณการดูดซับสีเขียวอม Malachite Green Crystal และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

ปริมาณ เซลล์ (กรัม ต่อ ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)		ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	
	Malachite Green Crystal	Benewol Red RS	Malachite Green	Benewol Red RS
0.5	94.36±1.63 ^A	85.33±1.67 ^A	3.52±0.06 ^A	9.32±0.18 ^A
1	97.49±0.27 ^A	87.53±0.70 ^A	1.82±0.01 ^B	4.77±0.04 ^B
1.5	97.32±0.23 ^A	87.39±1.03 ^A	1.21±0.00 ^C	3.18±0.04 ^C
2	97.06±0.09 ^A	82.46±1.16 ^{AB}	0.90±0.00 ^D	2.25±0.03 ^D
2.5	97.22±0.19 ^A	75.36±0.45 ^{BC}	0.72±0.00 ^E	1.64±0.01 ^E
3	95.99±0.16 ^A	66.48±1.47 ^C	0.60±0.00 ^F	1.21±0.03 ^F
6	96.85±0.46 ^A	45.74±5.30 ^D	0.30±0.00 ^G	0.42±0.05 ^G

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

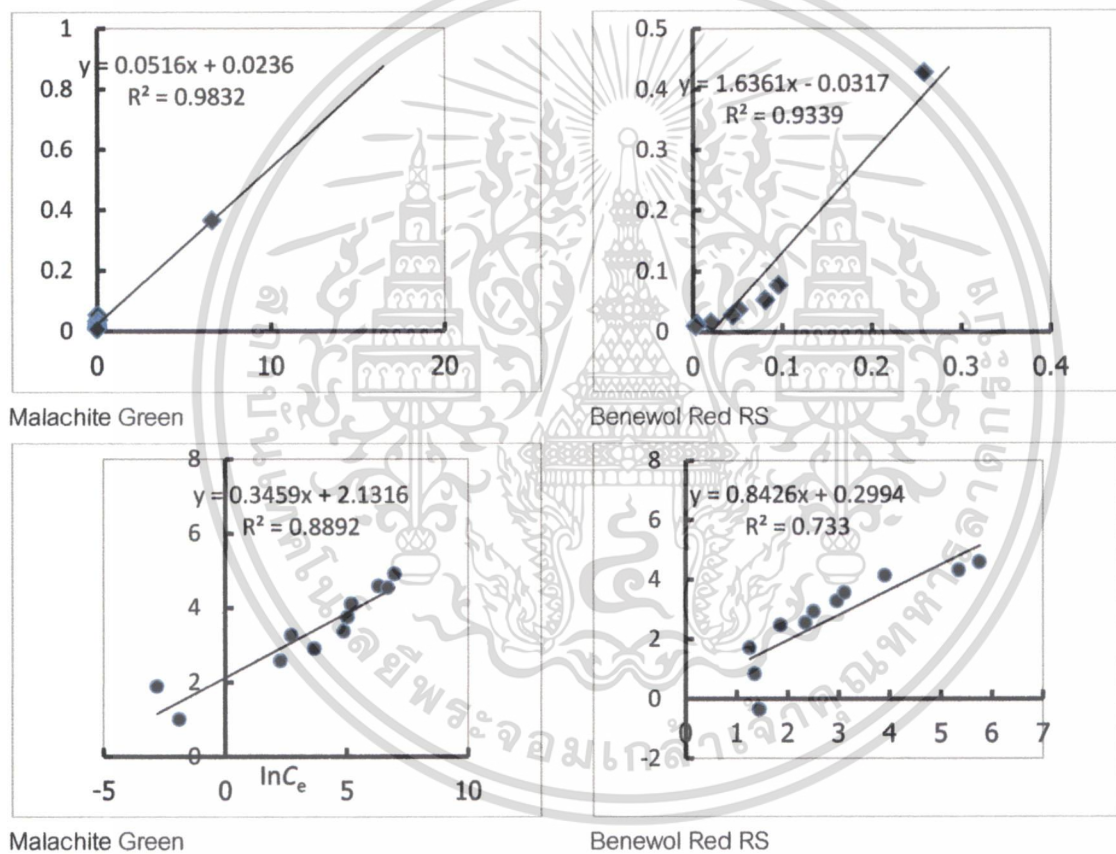
4.4 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีเขียวอม (ไอโซเทอร์ม)

ไอโซเทอร์มการดูดซับจากสมการของ Langmuir และ Freundlich เป็นค่าที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับสีเขียวอมและประเมินประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีเขียวอมของสาหร่าย ดังนั้นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคือต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและต้องทำภายใต้อุณหภูมิคงที่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการดูดซับสีเขียวอมของ *Scenedesmus dimorphus* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) สำหรับสีเขียวอม Malachite Green Crystal (basic dye) และ Benewol Red RS (acid dye) ที่คำนวณได้เท่ากับ 111.16 ± 69.43 และ 31.92 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดย *Scenedesmus dimorphus* มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเขียวอม Benewol Red RS สูงสุด ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุดของสีเขียวอมชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) อีกทั้งยังพบว่าการดูดซับสีเขียวอมของ *Scenedesmus dimorphus* มีความสัมพันธ์ (r^2) ของสมการการดูดซับของ Langmuir adsorption isotherm มากกว่า Freundlich adsorption isotherm (ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.3)

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ย้อมของสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

ชนิดสีย้อม	Langmuir			Freundlich	
	Q_{max}	K_a	R^2	n	r^2
Malachite Green	111.16 ± 69.43^A	0.34 ± 0.16^A	0.98 ± 0.01	2.62 ± 0.14^A	0.87 ± 0.04
Benewol Red RS	31.92 ± 0.34^B	0.02 ± 0.00^B	0.93 ± 0.01	1.21 ± 0.01^B	0.73 ± 0.01

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

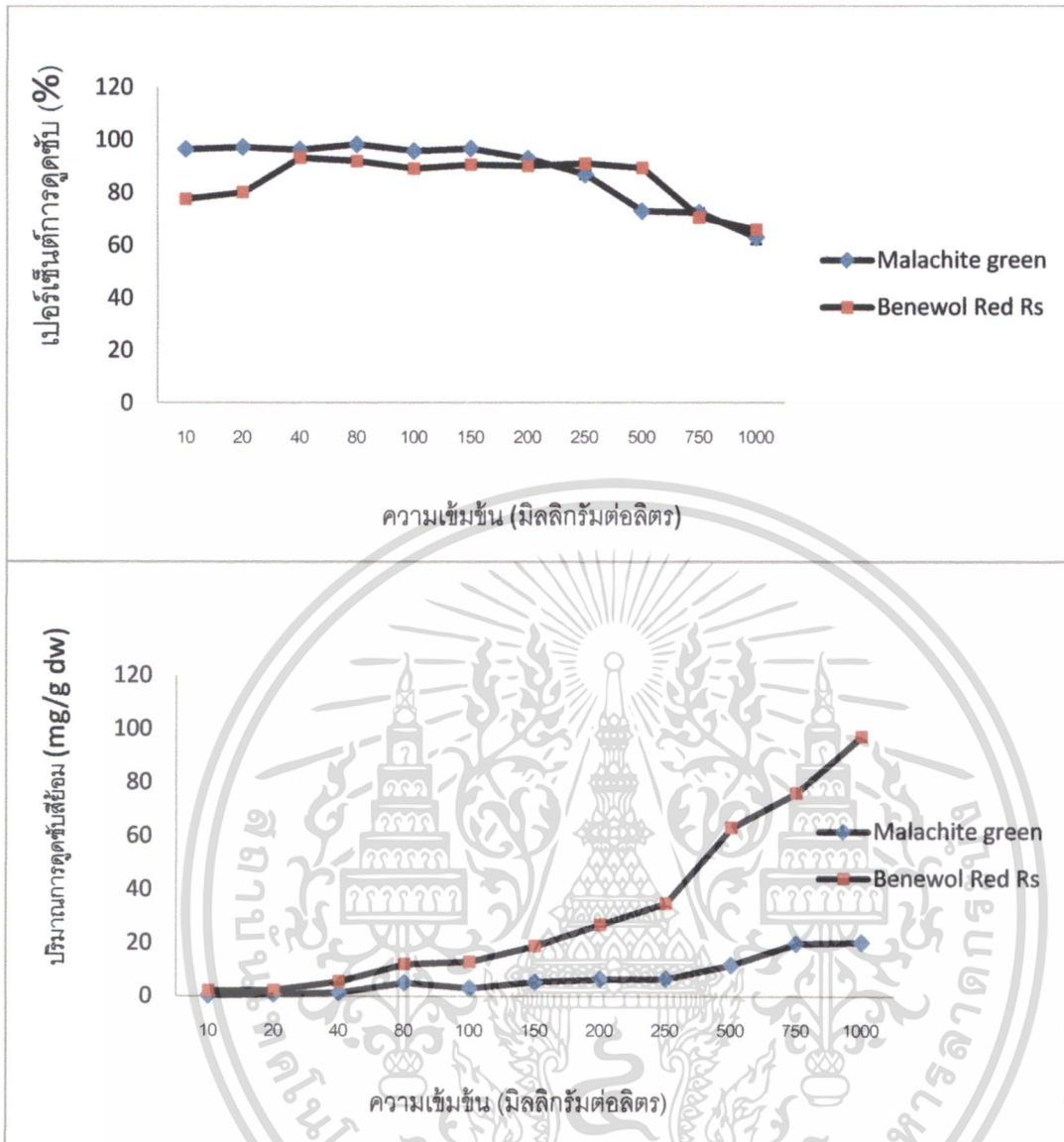


ภาพที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ และไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ โดย *Scenedesmus dimorphus* แบบตรีงเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

การดูดซับสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Malachite Green และ Benewol Red RS 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมทั้งสองออกจากสารละลาย ได้ 63.03 ± 2.45 และ 65.91 ± 0.85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ภาพที่ 4.4, ตารางที่ 4.5) และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 20.30 ± 0.77 และ 97.21 ± 1.26 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Malachite Green Crystal และ Benewol Red RS ต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* สามารถดูดซับสีย้อมได้ 0.30 ± 0.00 และ 2.21 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 96.55 ± 0.25 และ 77.65 ± 1.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า โดยการทดลองของ Sevgil and Gonul (2006) ได้มีการใช้ *Synechococcus* sp. ในการดูดซับสีย้อม Remazol Blue และ Reactive Red RB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมออกจากสารละลายได้ 66.9 และ 39.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 53 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมได้เพียง 9.6 และ 13.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 เปอร์เซนต์และปริมาณการดูดซับสีเขียว Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์และปริมาณการดูดซับสีเขียว Malachite Green และ Benewol Red RS โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้น (ppm)	% remove		q (mg/g dw)	
	Malachite G C	Benewol	Malachite G C	Benefix T B
10	96.55±0.25 ^A	77.65±1.04 ^D	0.30±0.00 ^F	2.21±0.03 ^G
20	97.32±0.17 ^A	80.20±0.38 ^C	0.75±0.00 ^F	2.36±0.01 ^G
40	96.35±0.27 ^{AB}	93.32±0.47 ^A	1.40±0.00 ^{EF}	5.65±0.03 ^G
80	98.35±0.03 ^A	91.96±0.77 ^A	5.09±0.00 ^{CD}	12.12±0.10 ^{FG}
100	95.75±0.18 ^{AB}	89.13±0.33 ^B	3.13±0.01 ^{DE}	12.98±0.05 ^{FG}
150	96.73±0.06 ^{AB}	90.63±0.34 ^{AB}	5.41±0.00 ^C	18.97±0.07 ^{EF}
200	92.93±0.52 ^B	90.11±0.12 ^{AB}	6.54±0.04 ^C	26.93±0.04 ^{DE}
250	86.86±1.56 ^C	91.00±0.27 ^{AB}	6.66±0.12 ^C	34.84±0.10 ^D
500	72.91±0.40 ^D	89.30±0.10 ^B	11.81±0.07 ^B	63.21±0.07 ^C
750	72.36±1.56 ^D	70.56±0.22 ^E	19.81±0.43 ^A	76.08±0.23 ^B
1000	63.03±2.45 ^E	65.91±0.85 ^F	20.30±0.77 ^A	97.21±1.26 ^A

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

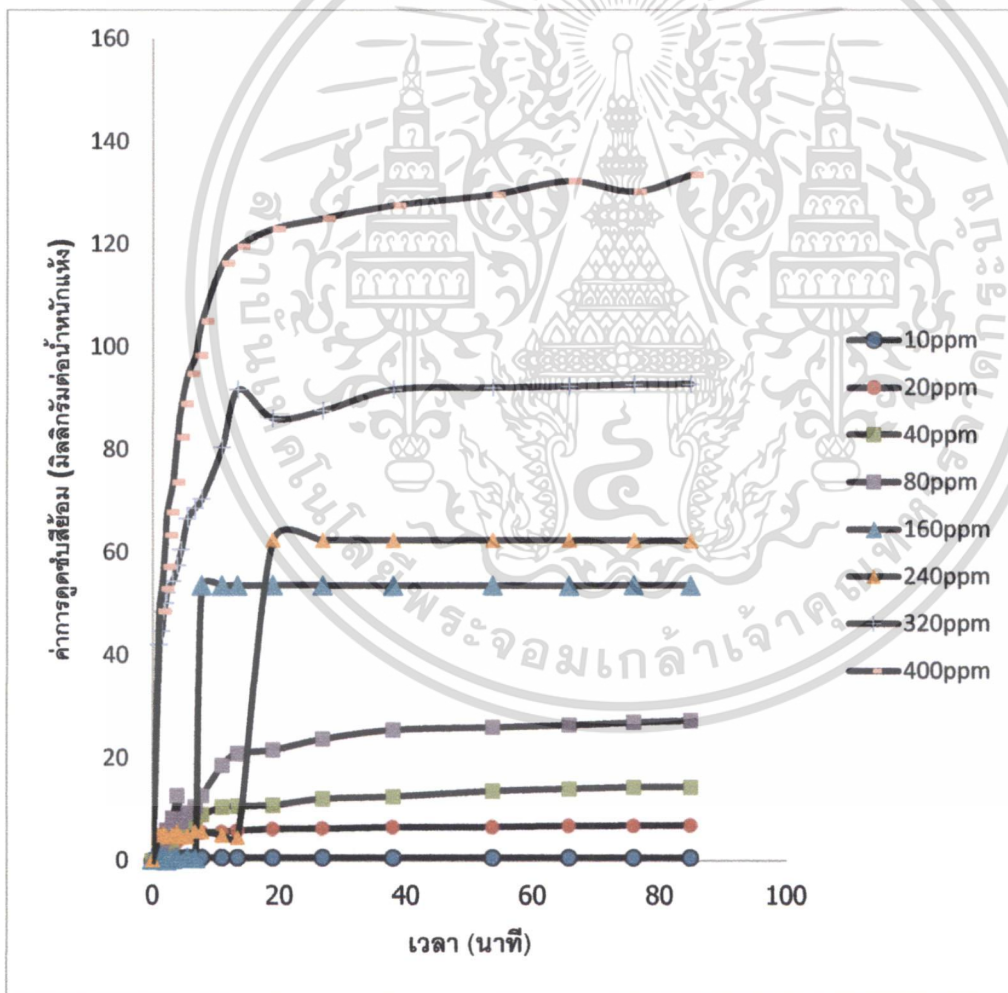
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetics of adsorption) เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่าอัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่างๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพเหมาะกับการใช้งานระบบต่างๆ เช่น batch reactors และ fixed beds เป็นต้น (สุนิรัตน์, 2549) การที่จะพิจารณาว่าสาหร่ายมีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีเขียวเป็นอันดับใดโดยเราจะพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r) ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา โดยผลการทดลองครั้งนี้พบว่า สาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* มีรูปแบบการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนมากกว่า (Pseudo-second order) โดยพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่าโดยเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์ที่สูงกว่าปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) (ภาพที่ 4.5, ตารางที่ 4.6)

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

จากการทดลองพบว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับพบว่าทั้งการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ (film diffusion) และขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) เป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ โดยขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) จะเป็นการดูดซับช่วงที่สอง (Secondary rate) (ตารางที่ 4.6)



ภาพที่ 4.5 การดูดซับสีเขียวอม malachite green โดยสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 อันดับของปฏิกิริยาของสีย้อม Benewol Res RS โดยสารถ่าย *Scenedesmus*

ความเข้มข้น สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	$-k$ ($\times 10^{-4}$ ลิตรต่อนาที)	R	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)	R
10	0.0000	0.8780	3429.4667	0.990
20	0.0000	0.9810	48.1337	0.9990
40	0.0000	0.979	12.4049	0.9990
80	0.0000	0.7850	6.2609	0.9990
160	0.0000	0.7480	1.1437	0.9920
240	69.0900	0.616	0.3147	0.8680
320	0.0000	0.5610	6.8493	0.9990
400	13.8180	0.7270	3.8583	0.9990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สำหรับ *S. dimorphus* ที่ตรึงในอัลจิเนต มีความสามารถในการดูดซับ Malachite green และ Benewol ได้ดีที่ระดับพีเอชเท่ากับ 2 และ 3 โดยมีเวลาสมดุลในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดที่ 1,440 และ 180 นาที ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ของ *S. dimorphus* ลดลง *S. dimorphus* มีความสามารถในการดูดซับ Malachite green และ Benewol สูงสุดเท่ากับ 111.16 ± 69.43 และ 31.92 ± 0.34 mg/g ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- สุธีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549. แพลงก์ต่อนวิทยา. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ
- Aksu, Z. and Tezer, S. 2005 Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris* Process Biochemistry. 40 : 1347–1361.
- A.Khalaf Mahmoud, 2008, Biosorption of reactive dye from textile wastewater by non-viable biomass of *Aspergillus niger* and *Spirogyra* sp., Bioresource Technology .99 : 6631–6634 .
- Gupta, V.K. and A.Rastogi.2008. Biosorption of lead(II) from aqueous solutions by non-living algal biomass *Oedogonium* sp. *Ang Nostoc* sp.-A comparative study. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.64:170-178
- Hong , C. and P. Shan – shan. 2005. Bioremediation potential of Spirulina: toxicity and biosorption studies of lead . Journal of Zhejiang University Science 3 : 171-174.
<http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/Projects/2001/ooi/fig1.1.gif&imgfurl>.
<http://en.wikipedia.org/wiki/algae>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Endothermic/Exothermic>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gracilaria>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Rhodophyta>
<http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR2.pdf>
- Khaled azza, Amany el sikaily, Ola abdelwahab and Ahmed el nemr, 2005, Biosorption of basic blue nine from water solution by marine algae *Ulva Lactuca*, Egyptian journal of aquatic research, 31, 130-141.
- Khataee A.R. , G.Dehghan , A. Ebadi , M. Zarei , M. Pourhassan,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,Y.P.king and V.S.R.K.Prasad.2006. Comparison for adsorption modeling of copper and zinc from aqueous solution by *Ulve fasciata* sp.. Journal of HarZardous Material. B137:1246-1251.
- Kumar,Y.P.king and V.S.R.K.Prasad.2006. Removal of copper from aqueous solution using *Ulve fasciata* sp.- A marine green algae. Journal of HarZardous Material. B137:367-373
- Marungrueng, K. and Pavasant, P. 2007. “High performance biosorbent (*Caulerpa lentillifera*) for basic dye removal, Bioresource Technology .98 : 1567-1572.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Olaka Ferdag, Necip Atarb, Asim Olgunb, 2009. Biosorption of acidic dyes from aqueous solution by *Paenibacillus macerans*: Kinetic, thermodynamic and equilibrium study, *Chemical Engineering Journal*, 150:122-130 41
- Ozer, Akkaya, G. and Turabik, M, 2005, 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, Akkaya, G. and Turabik, 2006, The removal of Acid Red 274 from wastewater : Combined biosorption and biocoagulation with *Spirogyra rhizopus*., *Dyes and Pigments*, 71 : 83-89.
- Prasert ,P. R. Apiratikul , V. Sungkhum , P . Suthiparinyanont , S. Wattanachira and T. F. Marhaba. 2006 . Biosorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technology* 97:2321-2329
- Punjongharn Pimol , Khanidtha Meevasana, Prasert Pavasant, 2008, Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste: dried Seagrass (*Caulerpa lentillifera*), *Journal of Environmental Sciences*, 20, 760–768.
- Sadettin Sevgil and Gonul Donmez, 2006, Bioaccumulation of reactive dyes by thermophilic cyanobacteria, *Process Biochemistry* ,41, 836–841.
- Sari, A. and M. Tuzen. 2008. Biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution using green alga (*Ulva lactuca*) biomass. *Journal of Hazardous Materials*. 152:302-308.
- Vijayaraghavan K. and Yeoung-Sang Yun, 2008, Biosorption of C.I. Reactive Black 5 from solution using acid-treated biomass of brown seaweed *Laminaria* sp., *Dyes and Pigments* ,76 : 726-732.
- Vijayaraghavan, K., J. Jegan, K. Palanivelu and M. Velan. 2008. Biosorption of cobalt(II) and nickel(II) by seaweed: batch and column studies. *Separation and Purification Technology* 44:53-59.
- Won Sung Wook, Min Hee Han, Yeoung-Sang Yun , 2008 , Different binding mechanisms in biosorption of reactive dyes according to their reactivity, *Water Research*, 42 ,4847 – 4855
- Zumriye, A. and T. Sevilay .2004 Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. 40 :1347–1361

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นางสาวสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

Miss Suneerat Ruangsomboon

เพศ

หญิง

วันเดือนปีเกิด 9 พฤศจิกายน 2515 อายุ 41 ปี

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 8

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)	ม.เทคโนโลยีพระ จอมเกล้า ธนบุรี	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. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดลาบ *Nostoc commune* เพื่อการค้า (รายได้ภาคฯ 2547)
6. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดลาบ (*Nostoc commune*) และสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ในน้ำนมดิบที่ทิ้งจากโรงงานผลิตนมเพื่อใช้เป็นอาหารปลาสวยงามและปลาเศรษฐกิจ(งบประมาณแผ่นดิน 2548-2549)
7. ผลกระทบของแสง และอุณหภูมิ ที่มีต่อเสถียรภาพการออกฤทธิ์ของสารสกัดจากสาหร่ายในการยับยั้งการงอกและการเติบโตของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2549)
8. ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาสารสกัดจากสาหร่ายต่อการงอกของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2550)
9. การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากสัตว์น้ำ (เปลือกกุ้ง เปลือกปู) (รายได้คณะฯ 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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. มี.ย. 2550- มี.ย. 2552)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549. การสร้างไขพักของไรแดงที่ระดับอุณหภูมิต่ำและอัตราพักของไขพักที่ฆ่าเชื้อด้วยฟอร์มาลิน และไขพักที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24(2):54-62.
12. สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไขน้ำ *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 ชาตีสุพล เตรียมธนานันท์. 2551. คุณค่าทางโภชนาการและปริมาณรงควัตถุของ *Spirulina platensis* ที่เลี้ยงในบุ่ปุผสมมูลสุกร. 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, อำรม อินทร์สังข์ และ จรุงศักดิ์ 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22. นางอม ตั้งคำ และสุวีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาตู้ที่มีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 305-312.
งานวิจัยที่ตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ
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.
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.