

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบเนฟิกเรดโดยสาหร่าย

**REMOVAL OF BENEWOL RED, MALACHITE GREEN AND
BENEFIX RED BY USING ALGAE**



T117034



กวิณ พันธุ์สัมฤทธิ์

KAWIN PANSAMRIT

วพ.

๗ ๓๒๓๗

๒๕๕๖

เลขหมู่ 117034

เลขทะเบียน 117034

วันเดือนปี 21 ส.ค. 2554

b. 12331618
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การประมง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

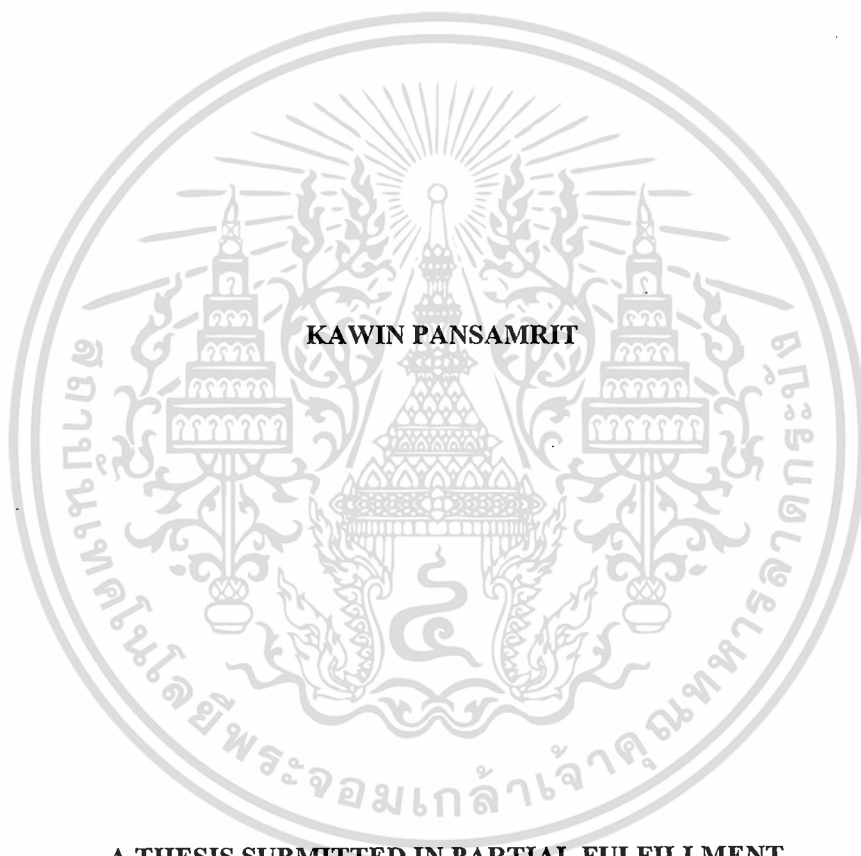
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2011-AG-M-081-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**REMOVAL OF BENEWOL RED, MALACHITE GREEN AND
BENEFIX RED BY USING ALGAE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN FISHERIES SCIENCE
FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2011-AG-M-081-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเฟคเรด โดยสาหร่าย
ชื่อนักศึกษา	นายกวิน พันธุ์สัมฤทธิ์
รหัสประจำตัว	51065907
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การประมง
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุนิรัตน์ เรืองสมบุรณ์

บทคัดย่อ

การศึกษาการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเฟคเรดโดยสาหร่ายแห้ง 13 สกุด ได้แก่ ไชยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, *Phormidium angustissimum*, สาหร่ายสีเขียว *Ulva intestinalis*, *Ulva rigida*, *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., *Dictyota* sp., สาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, *Acanthophora* sp. และ *Solieria* sp. พบว่าสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดได้สูงคือ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) เท่ากับ 440.12 ± 14.07 , 281.51 ± 12.72 และ 483.46 ± 9.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนได้สูงคือ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 288.80 ± 9.30 , 238.44 ± 6.36 และ 173.53 ± 5.27 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบนเฟคเรดได้สูงคือ *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 277.12 ± 3.92 , 259.30 ± 11.94 และ 293.19 ± 8.76 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

จากการนำสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงจากขั้นต้นมาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเฟคเรด พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีค่าปัจจัยที่เหมาะสมคือ พีเอช 3, 6 และ 2 ระยะเวลาในการสัมผัสสีย้อมไม่เกิน 12, 6 และ 6 ชั่วโมง สำหรับสีย้อมทั้ง 3 ประเภท ตามลำดับ ปริมาณ ขนาดเซลล์สาหร่ายที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดซับสีทุกประเภทต่อสาหร่าย 1 กรัม ลดลง สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดอยู่ระหว่าง 40-50 องศาเซลเซียส สีย้อมมาลาไคท์กรีนอยู่ระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส และสีย้อมเบนเฟคเรดที่ 50 องศาเซลเซียส ยกเว้น *C. lentillifera* อยู่ระหว่าง 35-40 องศาเซลเซียส โดยพบว่าค่าเอนทัลปี (ΔH) ของการดูดซับสีย้อมทุกประเภทโดยสาหร่ายมีค่าเป็นบวก ยกเว้นการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรดโดยสาหร่าย *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นลบ จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลไฟด์ได้สูง จึงสามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีซัลไฟด์ปนเปื้อนได้

ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรดโดยสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir จลนพลศาสตร์การดูดซับของซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* การดูดซับของซัลไฟด์มาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. การดูดซับของซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับซัลไฟด์เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และมีอัตราเร็วขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สองเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ยกเว้น *C. lentillifera* มีอัตราเร็วของการดูดซับซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรดขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรกเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าสาหร่าย *G. fisheri*, *Padina* sp. และ *A. platensis* มีความสามารถในการบำบัดซัลไฟด์เบนเนฟิเคเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรดได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 31.40 ± 0.54 , 3.27 ± 0.01 และ 50.89 ± 1.16 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

Thesis	Removal of benewol red, malachite green and benefix red by using algae
Student	Mr. Kawin Pansamrit
Student ID	51065907
Degree	Master of Science
Program	Fisheries Science
Year	2010
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Dr. Suneerat Ruangsomboon

ABSTRACT

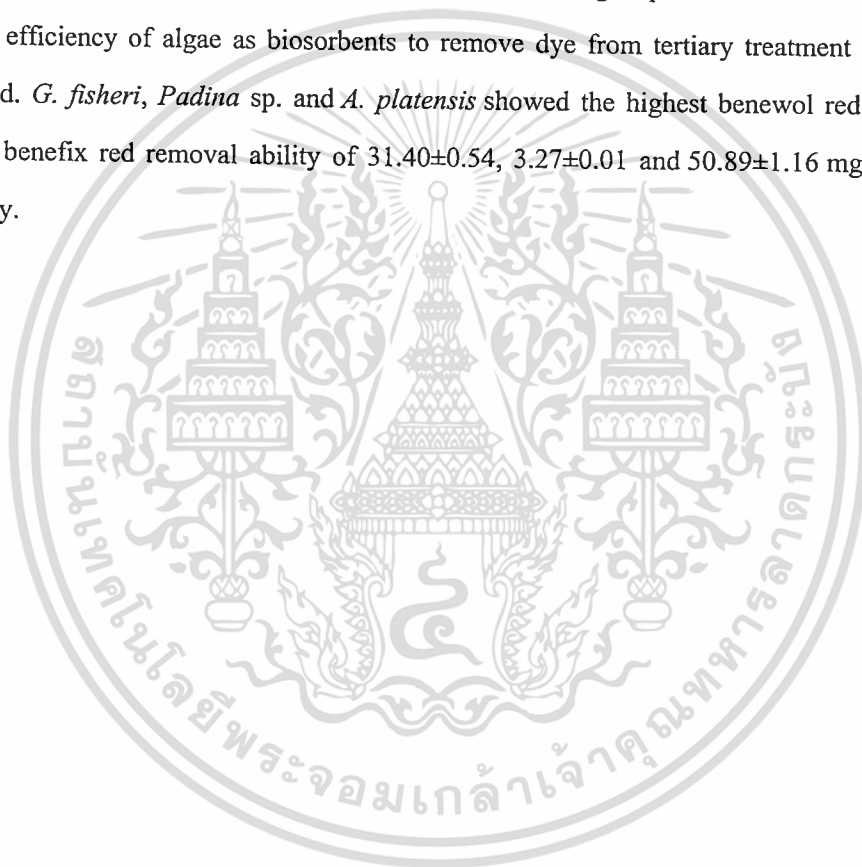
Removal of benewol red, malachite green and benefix red by 13 genera of dried algae: cyanobacteria; *Arthrospira platensis* and *Phormidium angustissimum*, green algae; *Ulva intestinalis*, *Ulva rigida*, *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides*, *Rhizoclonium* sp. and *Chaetomorpha* sp., brown algae; *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp. and *Dictyota* sp., and red algae; *Gracilaria fisheri*, *Acanthophora* sp. and *Solieria* sp. were studied. *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. and *G. fisheri* showed high benewol red removal ability (Q_{max}) of 440.12 ± 14.07 , 281.51 ± 12.72 and 483.46 ± 9.53 mg/g dry wt., respectively. *Padina* sp., *Turbinaria* sp. and *Sargassum* sp. showed high malachite green removal ability of 288.80 ± 9.30 , 238.44 ± 6.36 and 173.53 ± 5.27 mg/g dry wt., respectively. *A. platensis*, *C. lentillifera* and *G. fisheri* showed high benefix red removal ability of 277.12 ± 3.92 , 259.30 ± 11.94 and 293.19 ± 8.76 mg/g dry wt., respectively.

The optimum conditions for dye removal by algae with high removal capacity were studied. The results showed that the optimum pH for benewol red, malachite green and benefix red removal were 3, 6 and 2, respectively. The adsorption of benewol red, malachite green and benefix red were reached equilibrium within 12, 6 and 6 h., respectively. Elevated biomass, cell size and debased dye concentration were decreased all dye uptake (mg/g dry wt.) by algae. The optimum temperature for removal of benewol red were 40-50 °C, malachite green were 45-55 °C and benefix red were 50 °C except for *C. lentillifera* were 35-40 °C. The enthalpy (ΔH) of all dye removal by all algae were positive value except for benefix red removal by *C. lentillifera* was

negative. The dye removal ability of algae as demonstrated herein indicate that almost algae are promising biomaterial for dye removal in contaminated waters.

The removal of benewol red, malachite green and benefix red by almost algae followed Langmuir adsorption isotherm. Adsorption kinetic of benewol red removal by *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. and *G. fisheri*, malachite green removal by *Padina* sp., *Turbinaria* sp. and *Sargassum* sp. and benefix red removal by *A. platensis*, *C. lentillifera* and *G. fisheri*, followed the pseudo-second order rate reaction and intraparticle diffusion in the secondary step was likely the rate-limiting step except for benefix red removal by *C. lentillifera* which the followed intraparticle diffusion in the first step was likely the rate-limiting step.

The efficiency of algae as biosorbents to remove dye from tertiary treatment wastewater was studied. *G. fisheri*, *Padina* sp. and *A. platensis* showed the highest benewol red, malachite green and benefix red removal ability of 31.40 ± 0.54 , 3.27 ± 0.01 and 50.89 ± 1.16 mg/g dry wt., respectively.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุนิรัตน์ เรืองสมบุญณ์
หลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการทำวิจัยแก้ปัญหาหาตลอดจนความรู้และ
ประสบการณ์ที่ดี รวมทั้งตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง
ในความกรุณาและขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ศักดิ์ชัย ชูโชติ ผศ.ดร.ปวีณา ทวีกิจการ และ
ผศ.ดร.มณฑล แก่นมณี หลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ รศ.ดร.ดวงรัตน์ อินทร ภาควิชาวิทยาศาสตร
อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณา
สละเวลาตรวจสอบให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนส่วนหนึ่งจากทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ประจำปี 2554
จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ หลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง คณะ
เทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิ์
ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนคำแนะนำจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของหลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง คณะ
เทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและคำแนะนำต่างๆ ในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในหลักสูตรวิชาวิทยาศาสตรจารย์ประมง คณะ
เทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอย
ช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ และสนับสนุนส่งเสริม
ด้านการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ซึ่งประโยชน์และคุณค่าของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบ
แด่ผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนผู้ที่สามารถนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปได้

กวิน พันธุ์สัมฤทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญภาพ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ประเภทของสีย้อม.....	4
2.1.1 สีย้อมแอซิด (acid dye).....	4
2.1.2 สีย้อมเบสิก (basic dye).....	4
2.1.3 สีย้อมแอคทีฟ (reactive dyes).....	5
2.2 ปัญหาที่เกิดจากสีย้อม.....	6
2.3 การบำบัดสีย้อม.....	7
2.3.1 การบำบัดสีย้อมทางเคมี.....	7
2.3.2 การบำบัดสีย้อมทางกายภาพ.....	8
2.3.3 การบำบัดทางชีวภาพ (bioremediation/ bioremoval/biosorption).....	8
2.4 สาหร่าย.....	9
2.5 การใช้สาหร่ายกำจัดสีย้อม.....	9
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 ความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช).....	13
2.6.2 ผลของอุณหภูมิ.....	15
2.6.3 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น.....	17
2.6.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ.....	18
2.6.5 ผลของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน.....	19
2.7 กลไกของสารช่วยในการดูดซับสีย้อม.....	20
2.7.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism).....	20
2.7.2 สภาวะสมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	21
2.7.3 จลศาสตร์การดูดซับ.....	23
2.8 การใช้สารช่วยบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	25
2.9 การล้างสีย้อมออกจากตัวดูดซับ (Desorption).....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 ชนิดของสารช่วย.....	27
3.1.1 สารช่วยขนาดเล็กกลุ่มไฮยาโนแบคทีเรีย.....	27
3.1.3 สารช่วยสีเขียว.....	27
3.1.2 สารช่วยสีน้ำตาล.....	27
3.1.4 สารช่วยสีแดง.....	27
3.2 สารเคมี.....	28
3.2.1 อาหารเลี้ยงสารช่วยขนาดเล็กกลุ่มไฮยาโนแบคทีเรีย.....	28
3.2.2 สีย้อมสำหรับใช้ในการทดลอง.....	28
3.2.3 เคมีภัณฑ์สำหรับการปรับพีเอช.....	28
3.2.4 เคมีภัณฑ์สำหรับการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้น เช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม.....	28
3.3 อุปกรณ์.....	28
3.4 สถานที่ทำการวิจัย.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 วิธีการศึกษา.....	29
3.5.1 การเตรียมสาหร่ายและสีย้อม.....	29
3.5.2 การศึกษาการดูดซับสีย้อมเพื่อคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการ ดูดซับสูง.....	31
3.5.3 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	32
3.5.4 การศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับ.....	33
3.5.5 การทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับ โรงงาน อุตสาหกรรม.....	34
3.5.6 การวัดปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 การคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อม.....	35
4.1.1 ระดับพีเอชของสารละลาย.....	35
4.1.1.1 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนวอล เรด.....	35
4.1.1.2 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์ กรีน.....	39
4.1.1.3 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีด.....	42
4.1.2 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม.....	45
4.1.3 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม.....	58
4.1.3.1 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด....	58
4.1.3.2 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย..	61
4.1.3.3 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีด โดยสาหร่าย.....	65
4.2 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	72
4.2.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	72
4.2.1.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด.....	72
4.2.1.2 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.3 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีเขียวเบนเฟลเรด.....	76
4.2.2 ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับ.....	79
4.2.2.1 ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวเบนวอล เรด.....	79
4.2.2.2 ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์ กรีน.....	81
4.2.2.3 ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวเบน ฟิเคเรด.....	83
4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียว.....	86
4.2.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวเบนวอลเรด.....	86
4.2.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน.....	88
4.2.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวเบนเฟลเรด.....	90
4.2.4 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียว.....	95
4.2.4.1 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวเบนวอลเรด.....	95
4.2.4.2 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน.....	97
4.2.4.3 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวเบนเฟลเรด.....	99
4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	102
4.3.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวเบนวอลเรด โดยสาหร่าย <i>C. lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>G. fisheri</i>	102
4.3.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp.....	102
4.3.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวเบนเฟลเรด โดยสาหร่าย <i>A. platensis</i> , <i>C. lentillifera</i> และ <i>G. fisheri</i>	115
4.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีเขียวปนเปื้อนของโรงงานอุตสาหกรรม.....	123
4.4.1 การบำบัดสีเขียวเบนวอลในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่าน ขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม.....	123

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การบำบัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้น เช่นเดียวกับ โรงงานอุตสาหกรรม.....	126
4.4.3 การบำบัดน้ำสีข้อมเบนเฟ็คเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้น เช่นเดียวกับ โรงงานอุตสาหกรรม.....	128
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	131
บรรณานุกรม.....	133
ภาคผนวก ก.....	139
ภาคผนวก ข.....	135
ภาคผนวก ค.....	136
ภาคผนวก ง.....	139
ภาคผนวก จ.....	142
ประวัติผู้เขียน.....	163

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่จับสีย้อมที่พบในสาหร่าย.....	10
2.2 สารชีวโมเลกุล (biomolecule) ที่พบในสาหร่ายกลุ่มต่างๆ ที่นิยมใช้ในการดูดซับ.....	11
2.3 หมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์โดย FT-IR ของสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i>	12
2.4 ค่าการดูดซับสูงสุดของการดูดซับสีแอสตราซอน (Astrazon GTLN Red) โดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> ที่ผันแปรขนาด	20
2.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมและชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกัน.....	23
4.1 การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	36
4.2 การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	41
4.3 การดูดซับสีย้อมเบนเฟลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	43
4.4 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ.....	53
4.5 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ.....	54
4.6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเฟลเรดที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ.....	55
4.7 ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลของตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีย้อม.....	57
4.8 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด.....	59
4.9 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน.....	62
4.10 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบนเฟลเรด.....	65
4.11 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของตัวดูดซับต่างๆ ในการดูดซับสีย้อม.....	70
4.12 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน.....	73
4.13 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน.....	75
4.14 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเฟลเรด โดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน.....	80
4.16 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน.....	82
4.17 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคเรดโดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน.....	84
4.18 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	87
4.19 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ ของการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด ...	88
4.20 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	89
4.21 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน.....	90
4.22 ค่าการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิค โดย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	91
4.23 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคเรด.....	92
4.24 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน.....	96
4.25 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน.....	98
4.26 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคเรดโดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกันที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน.....	100
4.27 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดย <i>Caulerpa lentillifera</i>	103
4.28 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดย <i>Rhizoclonium</i> sp.....	103
4.29 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดย <i>Gracilaria fisheri</i>	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.30 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i>	106
4.31 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Rhizoclonium</i> sp.....	106
4.32 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i>	107
4.33 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Padina</i> sp.....	109
4.34 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Turbinaria</i> sp.....	110
4.35 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Sargassum</i> sp.....	110
4.36 ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Padina</i> sp.....	112
4.37 ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Turbinaria</i> sp.....	112
4.38 ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Sargassum</i> sp.....	113
4.39 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบเนฟิครด โดย <i>Arthrospira platensis</i>	116
4.40 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบเนฟิครด โดย <i>Caulerpa lentillifera</i>	116
4.41 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบเนฟิครด โดย <i>Gracilaria fisheri</i>	117
4.42 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนฟิครดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Arthrospira platensis</i>	119
4.43 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนฟิครดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i>	119
4.44 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนฟิครดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i>	120
4.45 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม.....	125
4.46 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.47 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีดในน้ำเสียที่ผ่าน ขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับ โรงงานอุตสาหกรรม.....	129



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีย้อม Acid dye (Acid red), Basic dye (Malachite green) และ Reactive dye (Reactive Black 5).....	5
2.2 หมู่ฟังก์ชันของ <i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>cylindracea</i> (CRC) และภายหลังจากการดูดซับ สีมาลาไลท์กรีน (MG+ CRC).....	12
2.3 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีแอซิดเรด 274 โดยสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i> ...	14
2.4 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อมมาลาไลท์กรีน โดยสาหร่าย <i>Cosmarium</i> sp.....	14
2.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อมริมาซอลบลูและรีแอคทีฟแบล็คบีโดยสาหร่าย <i>Phormidium</i> sp.	17
2.6 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 274 โดยสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i> ..	
2.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกแอสตราซอลบลู FGRL โดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i>	18
2.8 ผลของปริมาณเซลล์ที่แตกต่างกันต่อการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูโดยสาหร่าย <i>Enteromorpha</i> spp.....	19
2.9 ชั้นตอนของกลไกการดูดซับ.....	21
2.10 ชั้นแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa scalpelliformis</i> ต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล	25
2.11 การล้างสาหร่าย <i>Laminaria</i> sp. ที่ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยใช้สารเคมีต่างกัน	26
4.1 การดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอช เหมาะสม (พีเอช 3) (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	37
4.2 การดูดซับสีย้อมมาลาไลท์กรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอช เหมาะสม (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	42
4.3 การดูดซับสีย้อมเบนเฟคเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอช เหมาะสม (พีเอช 2) (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร).....	44
4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ <i>Arthrospira platensis</i>	46
4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ <i>Phormidium angustissimum</i>	46
4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ <i>Ulva intestinalis</i>	47
4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ <i>Ulva rigida</i>	48
4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ <i>Caulerpa lentillifera</i>	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Caulerpa sertularioides</i>	48
4.10 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Rhizoclonium</i> sp.....	49
4.11 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Chaetomorpha</i> sp.....	49
4.12 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Padina</i> sp.....	50
4.13 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Turbinaria</i> sp.....	50
4.14 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Sargassum</i> sp.....	51
4.15 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Dictyota</i> sp.....	51
4.16 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Gracilaria fisheri</i>	52
4.17 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Acanthophora</i> sp.....	52
4.18 เพอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ <i>Soliera</i> sp.....	53
4.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด โดยสำหรับ ชนิดต่างๆ.....	59
4.20 ไอโซเทอร์มของ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด โดยสำหรับชนิดต่างๆ..	61
4.21 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีเขียวบนเบสิก โดยสำหรับชนิด ต่างๆ.....	63
4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดย สำหรับชนิดต่างๆ.....	64
4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีเขียวรีแอกทีฟโดยสำหรับ ชนิดต่างๆ.....	66
4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวรีแอกทีฟโดยสำหรับชนิด ต่างๆ.....	67
4.25 ปฏิริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด โดย <i>Caulerpa</i> <i>Lentillifera</i>	104
4.26 ปฏิริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด โดย <i>Rhizoclonium</i> sp....	105
4.27 ปฏิริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด โดย <i>Gracilaria fisheri</i> ...	105
4.28 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i> ของการดูดซับสีเขียวบนเวอลเรด ช่วงที่สอง.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.29 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Rhizoclonium</i> sp. ของการดูดซับสีเขียวอมเบเนวอลเรดช่วงที่สอง.....	108
4.30 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i> ของการดูดซับสีเขียวอมเบเนวอลเรดช่วงที่สอง.....	108
4.31 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Padina</i> sp.....	111
4.32 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Turbinaria</i> sp....	111
4.33 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีน โดย <i>Sargassum</i> sp....	112
4.34 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Padina</i> sp. ของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง.	114
4.35 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Turbinaria</i> sp. ของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง.....	114
4.36 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Sargassum</i> sp. ของการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง.....	115
4.37 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรด โดย <i>Arthrospira platensis</i>	117
4.38 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรด โดย <i>Caulerpa lentillifera</i>	117
4.39 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรด โดย <i>Gracilaria fisheri</i> ...	118
4.40 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Arthrospira platensis</i> ของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรดช่วงที่สอง.....	120
4.41 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i> ของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรดช่วงแรก.....	121
4.42 การแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i> ของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิคเรดช่วงที่สอง.....	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สีย้อม (Dyes) เป็นสีสังเคราะห์ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ย้อมผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ ฟอกหนัง ย้อมสีกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อาหารและเครื่องสำอาง ปัจจุบันการใช้สีย้อมเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มผลผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตสีย้อมทั่วโลกมีมากถึงเจ็ดแสนตันต่อปี โดยมีสีย้อมที่แตกต่างกันถึงหนึ่งหมื่นชนิด ซึ่งประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ของสีย้อมที่ผลิตขึ้นทั้งหมดถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการกำจัดออกจากน้ำทิ้ง (Aksu and Tezer. 2005; Mishra and Tripathy. 1993) สีย้อมที่ปนเปื้อนและตกค้างในแหล่งน้ำเป็นปัญหาทำให้เกิดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษทางชีวภาพกำจัดได้ยาก ผลเสียที่เกิดขึ้นทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงาม แสงส่องลงน้ำได้น้อยลงทำให้พืชน้ำสังเคราะห์แสงได้น้อย ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงและสารเคมีในสีย้อมเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์ส่วนหนึ่งไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ ทำให้ระบบนิเวศเสียสมดุล ดังนั้นการบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่สีย้อมในน้ำเสียนั้นมีความคงตัวมาก ยากต่อการกำจัดเพราะเป็นสารประกอบพวกอะโรมาติก สีสังเคราะห์เหล่านี้มีความจำเพาะในการทนต่อแสง น้ำ และสารออกซิไดซ์ที่แตกต่างกัน (Ozer *et al.* 2006a) สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง (El-Sheekh *et al.* 2009) เช่น สีย้อมมาลาไคท์ กรีน (Malachite Green) เมื่อสัตว์น้ำได้รับจะถูกดูดซึมและมีการเปลี่ยนรูปเป็นลูโคมาลาไคท์ กรีน (Leucomalachite Green : LMG) ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำและตกค้างเป็นระยะเวลานานก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์และตับ ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือด สีย้อมชนิดนี้ยังเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่าย พืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำ เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์น้ำที่มีสีย้อมสะสมอยู่จะทำให้เกิดผื่นที่ผิวหนัง หนาว บวม อาเจียน ท้องเดิน อาการชา เพลีย และอ่อนแรงคล้ายเป็นอัมพาต การทำงานของระบบทางเดินอาหาร ไตและตับเสีย สีบางอย่างอาจทำให้เกิดมะเร็งที่ต่อมน้ำเหลือง และอวัยวะอื่นๆ (กรมประมง. 2548) ประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา และสหภาพยุโรป ได้ออกกฏระเบียบกำหนดไม่ให้สารเหล่านี้ตกค้างในสัตว์น้ำที่จำหน่ายเพื่อการบริโภค (Bhattacharyya and Sharma. 2005) ดังนั้นจึงควรมีการลดปริมาณสีย้อมด้วยวิธีที่เหมาะสมออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำเหล่านั้นลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน เช่น การใช้โอโซน ทุ่นลอยน้ำไฟฟ้า การกรองด้วยเยื่อกรอง การฉายรังสี การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวอร์สออสโมซิส และการตกตะกอน (Mittal *et al.* 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปเซกซ์เซชันใด ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าวิธีดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพต่ำ ราคาแพง นอกจากนี้มีการสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ยากในการนำไปกำจัดต่อไป ปัจจุบันวิธีการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับ (adsorption) เป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยมเพราะมีประสิทธิภาพสูง โดยตัวดูดซับที่ใช้คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งสามารถดูดซับสีย้อมหลายประเภทได้ดี (Robinson *et al.* 2001) แต่มีปัญหาคือต้นทุนสูง ดังนั้นจึงมีการหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง ราคาถูก เช่น ถ่านหิน เถ้า ไม้ ซิลิกาเจล (silica gel) เปลือกข้าว กากฝ้าย ชานอ้อย ปาล์ม เป็นต้น รวมทั้งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย เชื้อราและสาหร่าย (Ozer *et al.* 2005a)

สาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่มีปริมาณมากในธรรมชาติ มีรายงานว่าสาหร่ายบางชนิดมีความสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ และสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้สูง (Pandey *et al.* 2007) สาหร่ายมีคุณสมบัติในการดูดซับสีย้อมได้รวดเร็ว ดูดซับได้ทั้งที่ผิวเซลล์และนำเข้าไปภายในเซลล์ (Bajguz. 2000) นอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งเซลล์มีชีวิตและไม่มีชีวิต (Marungrueng and Pavasant. 2007) สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่ผันแปรในช่วงกว้าง เช่น มีการผันแปรของอุณหภูมิ พีเอช หรือการมีไอออนอื่นๆ ปนอยู่ (Ahuja *et al.* 1997) ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของสาหร่าย โดยผิวเซลล์ของสาหร่ายมีกลุ่มประจุแตกต่างกันกับประจุของสีย้อม เช่น ประจุลบของสาหร่ายสามารถจับกับสีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นประจุบวกได้ดี เป็นต้น (Marungrueng and Pavasant. 2007) จากการทดลองกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี แต่เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นต่ำจะทำให้มีค่าใช้จ่ายของสารเคมีสูง ซึ่งสมควรหาตัวดูดซับราคาถูกมาใช้กำจัดสีย้อมเป็นขั้นตอนต่อไป (จันทิมา. 2552)

ดังนั้นการศึกษาลักษณะของสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูง ราคาถูก ตลอดจนสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการดูดซับ และกลไกในการกำจัดสีย้อมของสาหร่ายชนิดนั้นๆ เพื่อนำข้อมูลไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้สูง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
- 1.2.3 เพื่อศึกษากลไกการดูดซับสีย้อมเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบำบัดสีย้อม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการใช้สาหร่ายบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้น เช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาดังนี้ ได้ทำการเก็บสาหร่ายขนาดใหญ่ตามฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและตามธรรมชาติ สำหรับสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ปริมาณมากในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อม โดยการนำสาหร่ายชนิดต่างๆ ทำการทดลองการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้ห้องปฏิบัติการและควบคุมปัจจัยต่างๆในการทดลอง สำหรับการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมโดยนำน้ำประปาที่มีสีข้อมปนเปื้อนและนำมาทดลองภายในห้องปฏิบัติการ โดยใส่ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมลงไป และบันทึกผลทั้งหมดเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งสิ้น 1 ปี 6 เดือน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบชนิดของสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมแต่ละชนิดที่สูงที่สุด
- 1.5.2 ทราบปัจจัยที่เหมาะสมคือ พีเอช ระยะเวลา ความเข้มข้นของสีข้อม ปริมาณเซลล์สาหร่าย และอุณหภูมิ ที่ทำให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมสูงสุด
- 1.5.3 ทราบกลไกการดูดซับสีข้อมเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ในการบำบัดสีข้อมแต่ละชนิดได้ เพื่อลดปัญหามลพิษและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย ให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน สามารถเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป สีย้อมจะยึดติดกับเส้นใยด้วยอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond), แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals' force), แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรงดังกล่าว 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีจะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อมที่เกาะติดกับเส้นใยปรากฏออกมาจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมทำให้มนุษย์มองเห็นการติดสีของเส้นใย

การจำแนกประเภทสีย้อม นิยมแยกตามการนำไปใช้เพราะต้องมีความคงทนต่อการซัก ความคงทนต่อแสงและความคงทนต่อความร้อน แต่การศึกษานี้คำนึงถึงประจุเมื่อแตกตัวในการละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับประจุผิวหน้าของตัวดูดซับ ดังนั้นจึงแบ่งสีย้อมที่มีประจุเป็นบวก (Basic dye) หรือลบ (Acid หรือ Reactive dye)

2.1.1 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 การซักถูก เหงื่อ น้ำและการซักฟอกอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดีมาก

2.1.2 สีเบสิก (basic dye)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิก ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีที่มีประจุบวกจะยึดจับกับ

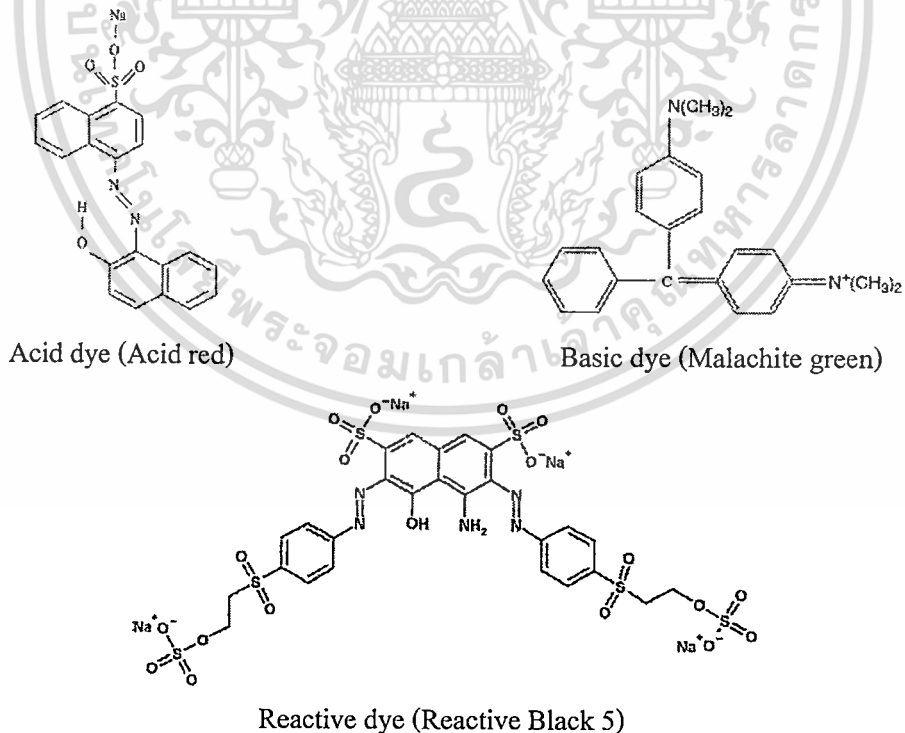
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของเส้นใยที่มีประจุลบ นอกจากนี้ยังเป็นสีที่ติดทนแต่ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนต่อการซักและแสง ประกอบด้วยหมู่ แอมโมเนียมไอออน (NR^+) และไนโตรเนียมไอออน (NO^+) (Marungrueng and Pavasant, 2007) คุณสมบัติของสีเบสิกมีความชอบกับฝ้ายที่ Tanning Mordant และเส้นใยอะคริลิก บางทีถูกเรียกว่าสีแคทไอออนิก (Cationic) เพราะสีเบสิกเมื่อแตกตัวในน้ำจะให้สีที่มีประจุบวก (+) ซึ่งจะมี Substantivity โดยตรงกับขนสัตว์และไหม แต่ในอุตสาหกรรมนิยมใช้สีเบสิกย้อมบนเส้นใยอะคริลิก เพราะเส้นใยจะมีตำแหน่งที่สามารถรับสีได้จากอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุด Glass Transition ของเส้นใย (70 องศาเซลเซียส) เส้นใยจะไม่สามารถรับสีได้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้สีแพร่ในเส้นใยอย่างช้าๆ และน้อย

2.1.3 สีรีแอคทีฟ (reactive dyes)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เพราะสีรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ ทำให้สีรีแอคทีฟติดอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทนทานต่อการซักล้าง ด้วยจุดเด่นข้อนี้ทำให้ความนิยมในการใช้สีรีแอคทีฟจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (ภาวิ ศรีภูถักิจ. 2542) แต่สีรีแอคทีฟเองก็มีข้อด้อยในตัวเองเหมือนกัน คือ ให้เปอร์เซ็นต์ในการติดสีต่ำ เนื่องจากในสภาวะปกติเซลลูโลสไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสีย้อม จะต้องเปลี่ยนเซลลูโลสให้อยู่ในรูป ionised



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อม Acid dye (Acid red), Basic dye (Malachite green) และ Reactive dye (Reactive Black 5)

ที่มา : Daneshvar *et al.* (2007); Padmesh *et al.* (2005); Forgacs *et al.* (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cellulose (โดยใช้ค่าคงที่ไปตั้งเอาไฮโดรเจนอะตอมออกจากหมู่ไฮดรอกซิลบนเซลลูโลสออก (cellulose-OH+OH ----- cellulose-O+H₂O)) ในขณะที่เดียวกันค่าคงที่ก็สามารถทำปฏิกิริยากับสีย้อมได้ด้วย เป็นผลให้สีย้อมที่ฟลูออโรไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใย ทำให้มีการสูญเสียคิดเป็น 40% โดยประมาณทุกครั้งที่ย้อมด้วยสีย้อมที่ฟลูออโร ผลที่ตามมาจะสิ้นเปลืองสีย้อมและสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 ปัญหาที่เกิดจากสีย้อม

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

มลพิษจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นปัญหาที่ไม่น้อยกว่าอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งผลการศึกษาน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมนี้ เป็นตัวอย่างบ่งชี้ถึงปัญหาโดยรวมของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ล้วนปล่อยลงสู่แม่น้ำหรือคลองที่เชื่อมต่อ มีรายงานถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากคลองบางนางเกร็งพบปนเปื้อนสารโนนิลฟีนอลและไตร-ไอโซ-บิวทิลฟอสเฟต (TiBP) และยังพบทองแดงและนิกเกิลสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำผิวดินของไทยถึง 2 เท่า ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินของทองแดงและนิกเกิลมีค่าไม่เกินกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) นอกจากนี้ค่าสังกะสีและนิกเกิลมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นพื้นฐานปกติถึง 30 และ 80 เท่า ตามลำดับ ซึ่งค่ามาตรฐานของความเข้มข้นพื้นฐานของน้ำปกติ คือ สังกะสีและนิกเกิลมีค่าไม่เกินไม่เกิน 5.0 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเขียวบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น มาลาไคท์ กรีน เป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่างๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ฝ้ายและกระดาษเป็นผงสีเขียว ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วได้สารสีออกน้ำเงิน มาลาไคท์ กรีน ที่ละลายในน้ำจะถูกดูดซึมเข้าสู่ปลาได้อย่างรวดเร็ว และสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของปลาและเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาไคท์ กรีน (Leucomalachite Green : LMG) ที่ไม่มีสี อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ตรวจพบมากที่บริเวณไขมันในช่องท้องและจะตรวจพบน้อยในน้ำเลือด เนื่องจากสามารถแพร่กระจายไปได้อย่างกว้างขวางทั่วทุกเนื้อเยื่อของปลาทำให้เกิดการสะสมและติดแน่นในเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดี และถูกกำจัดออกจากเนื้อเยื่อได้ช้าทำให้เกิดผลข้างเคียงต่างๆ มากมาย

พิษของมาลาไคท์ กรีน ต่อสัตว์น้ำ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำในการเกิดเนื้องอกและสามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ ตับ ในสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความผิดปกติทางพันธุกรรมในสัตว์น้ำ โดยการเพิ่มความยาวของสาย DNA การพัฒนาของตัวอ่อนหลังฟักออกจากไข่มีความผิดปกติไปจากเดิมถึง 3-5 เท่า เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือด ระดับของแคลเซียมและ โปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่ายพืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและทะเล

พิษของมาลาไคท์ กรีน ต่อมนุษย์ ส่งผลต่อต่อระบบการหายใจของเซลล์ ซึ่งเป็นแหล่งสร้างพลังงานสังเคราะห์ทางเคมี ทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หากร่างกายสะสมสารเหล่านี้เข้าไปมากๆ อาจมีอาการเป็นอัมพาตที่แขน ขา จะส่งผลต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (กรมประมง. 2548)

2.3 การบำบัดสีเขียว

2.3.1 การบำบัดสีเขียวทางเคมี

(1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) ในขบวนการตกตะกอนอาจมีการตกตะกอนของสีเขียว หรือสารอินทรีย์ประเภทอื่นๆ ด้วย ซึ่งการที่จะตกตะกอนสีเขียวได้มากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีที่เติมลงในน้ำเสียและขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำเสีย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือมีปริมาณของเสียที่มีพิษของสีเขียวปนอยู่ในระบบ

(2) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ไอออนของสีเขียวที่ละลายอยู่ในน้ำจะถูกจับไว้บนแผ่นเรซิน ด้วยการแลกเปลี่ยนกับไอออนบนแผ่นเรซิน ด้วยแรง electrostatic forces ซึ่งวิธีนี้จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของสีเขียวที่ละลายอยู่ในน้ำกับไอออนบนแผ่นเรซินอย่างรวดเร็ว โดยจะมีการแลกเปลี่ยนด้วย cation เช่น Na^+ , Ca^{2+} , H^+ แผ่นเรซินนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกำจัดสีเขียวที่เกาะบนแผ่นเรซินโดยการล้างด้วยสารละลายกรดหรือด่าง สีเขียวที่ล้างออกมาจะถูกทำให้เข้มข้นอยู่ในปริมาตรน้อยๆ ข้อเสียของวิธีนี้คือมีราคาสูง และแลกเปลี่ยนไอออนได้เพียงบางประเภทเท่านั้น ไม่สามารถระบุชนิดที่เฉพาะเจาะจงของไอออนที่ต้องการกำจัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การระเหยน้ำ (evaporation) การลดปริมาตรน้ำเสียโดยการทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอจนได้สีข้อมที่เข้มข้นอยู่ในน้ำเสียปริมาตรน้อย ข้อเสียของวิธีนี้คือถ้าของเสียมีปริมาณมาก จะใช้เวลานาน และมีปริมาณของเสียที่มีพิษของสีข้อมเหลืออยู่ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539; สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มปป; Sharman, R. 1998)

2.3.2 การบำบัดสีข้อมทางกายภาพ

(1) การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (activate carbon adsorption) สีข้อมหลายชนิดสามารถถูกดูดซับด้วยแผ่นถ่านกัมมันต์ ส่วนใหญ่จะถูกจับในรูปของ organic complex หรือจับตัวกับสารอินทรีย์ซึ่ง ประสิทธิภาพในการจับหรือการดูดซับของแผ่นคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นด้วยถ้าความเข้มข้นของสีข้อมเพิ่มขึ้น

(2) ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เป็นการแยกสีข้อมโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) ใช้ในขบวนการ reverse osmosis โดยทำให้สีข้อมที่ละลายในน้ำเสียมีค่ามากกว่าแรงดันออสโมติก โดยใช้แรงดันที่มากกว่า 40 atmosphere ซึ่งจะทำให้ด้านหนึ่งของเยื่อเลือกผ่านมีสีข้อมหนาแน่น แต่อีกด้านไม่มีสีข้อม จะทำให้สีข้อมแพร่ผ่านเข้ามาอีกด้านหนึ่งได้ คือสามารถกำจัดสีข้อมให้ไปอยู่ด้านที่ต้องการได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือมีค่าใช้จ่ายสูง

(3) อิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis) การแยกสีข้อมโดยใช้เยื่อเลือกผ่านที่สามารถเลือกประเภทของไอออนในการผ่านผนังเยื่อเลือกผ่านได้ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดสองอันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ ข้อเสียคือการตกตะกอนของสีข้อมซึ่งทำให้แผ่นเยื่อเลือกผ่านอุดตัน

(4) การกรองแบบ ultrafiltration โดยใช้ค่าแรงดันผ่านแผ่นกรอง โดยให้สีข้อมติดอยู่ที่ช่องบนแผ่นกรองนั้น แต่มีข้อเสียคือจะทำให้เกิดของเสียที่เป็นพิษ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539; สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มปป; Sharman, R. 1998)

2.3.3 การบำบัดทางชีวภาพ (bioremediation/ bioremoval/biosorption)

เป็นวิธีการกำจัดสีข้อมซึ่งใช้สิ่งมีชีวิตหรือวัสดุจากสิ่งมีชีวิต (biological material) ในการรวบรวมหรือกำจัดสีข้อมออกจากน้ำเสียโดยอาจใช้วิธีทางชีวภาพหรือทางเคมี คืออาจใช้การทำงานของเซลล์สิ่งมีชีวิต ใช้สารที่สร้างจากเซลล์สิ่งมีชีวิตหรือใช้ลักษณะทางกายภาพของเซลล์สิ่งมีชีวิตในการกำจัดสีข้อม bioremoval เหมาะกับน้ำเสียที่มีสีข้อมปนเปื้อนในปริมาณต่ำ มีรายงานการใช้พืชน้ำจืดขนาดใหญ่ *Azolla rongpong* ดูดซับสีข้อม acid dye ได้แก่ acid red 88, acid green 3, acid orange 7, และ acid blue 15 พบว่าการดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 81.30, 83.33, 76.92 และ 76.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Padmesh *et al.* 2006) และ Guezguez *et al.* (2009) ใช้หญ้าทะเล *Pasidonia oceanic* ในการดูดซับสีข้อม acid Yellow 59 พบว่า *P. Oceanic* มีความสามารถในการดูดซับสีข้อมแอสซิดได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สาหร่าย

สาหร่าย (algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll *a*) เป็นรงควัตถุหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงได้คาร์โบไฮเดรตกับออกซิเจน มีกลไกทางชีวเคมีและขบวนการเมตาบอลิซึมคล้ายกับพืชชั้นสูง สาหร่ายมีลักษณะโครงสร้างแบบง่าย ๆ ไม่มีเนื้อเยื่อลำเลียง สาหร่ายมีขนาดตั้งแต่เล็กมากประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียวจนถึงขนาดใหญ่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก อาจเป็นเส้นสายหรือมีลักษณะคล้ายต้นของพืชชั้นสูง แม้สาหร่ายมีรูปร่างแบบง่าย ๆ แต่พบว่าสาหร่ายหลายชนิดมีการจัดระเบียบภายในเซลล์ที่ซับซ้อนกว่าพืชชั้นสูง เพราะภายในเซลล์แต่ละเซลล์ของสาหร่ายมีออร์แกเนลล์ (organelle) ต่างๆ มากกว่าในแต่ละเซลล์ของพืชชั้นสูง

สาหร่ายที่มีขนาดเล็ก (microalgae) มักมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จะสังเกตเห็นได้ต่อเมื่อมีการเพิ่มปริมาณมากในแหล่งน้ำ (บลูม) ยกเว้นบางชนิดโดยเฉพาะพวกที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย เมื่อมีการเจริญเติบโตและเส้นสายรวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือสานกันเป็นแผ่นใหญ่ จะทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มย่อยคือ กลุ่มที่ลอยลอยในน้ำตามคลื่นลมพัดพาไป จัดเป็นสมาชิกของแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton/free floating microalgae) และกลุ่มที่ยึดเกาะกับพื้นหรือวัสดุยึดเกาะอื่นๆ (benthic microalgae)

สาหร่ายขนาดใหญ่ (macroalgae) เป็นสาหร่ายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีส่วนคล้ายราก ลำต้น ใบ รวมเรียกว่าทาลัส (thallus) โดยส่วนที่คล้ายราก ลำต้น ใบ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ชัดเจน สำหรับสาหร่ายขนาดใหญ่ที่มีส่วนคล้ายลำต้นและใบของพืชชั้นสูงจะพิจารณาแยกจากพืชชั้นสูงได้โดยพิจารณาจากเซลล์สร้างแกมิตหรือที่เรียกว่า gametangium ซึ่งเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่สร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) ซึ่งปกติมีเพียง 1 เซลล์ ถ้ามีเซลล์สืบพันธุ์หลายเซลล์ เช่น สาหร่ายไฟ (*Chara* หรือ stone-worts) พบว่าทุกเซลล์สามารถสืบพันธุ์ได้เอง (fertile) ซึ่งต่างจากพืชชั้นสูงที่เซลล์สืบพันธุ์มีหลายเซลล์เช่นกัน แต่เซลล์ชั้นนอกที่ห่อหุ้มนั้นเป็นหมัน (sterile) ส่วนสาหร่ายที่เป็นกลุ่มหรือโคโลนี (colony) มีหลายเซลล์อยู่รวมกัน จะสร้าง gamete ขึ้นใน 1 เซลล์เท่านั้น ไม่มีการทำงานร่วมกันระหว่างเซลล์ นอกจากนี้แม้มีลักษณะภายนอกคล้ายพืชชั้นสูง แต่พบว่าในสาหร่ายจะไม่มี vascular tissue ยกเว้น kelp (สาหร่ายสีน้ำตาลขนาดใหญ่) มี sieve cell ทำหน้าที่นำอาหาร เช่นเดียวกับที่พบในพืชพวกพัฒนาการต่ำกว่าไม้ดอก (Larkum *et al.* 2003; ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542)

2.5 การใช้สาหร่ายกำจัดสีเขียว

ตัวดูดซับทางชีวภาพที่ใช้ดูดซับสีเขียวปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมนำมาศึกษามากที่สุดอย่างหนึ่งคือ สาหร่ายเพราะมีวัตถุดิบอยู่มาก มีหลักฐานว่าการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนโลกเกิดจากสาหร่ายถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเก็บสาหร่ายจากธรรมชาติมาเป็นอาหารหรือนำมาสกัด

ผลผลิตต่างๆ มีมากกว่า 3 ล้านตันต่อปี โดยพบว่าผลผลิตที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีปริมาณให้เก็บเกี่ยวได้ สำหรับสาหร่ายสีแสดมีประมาณ 2.6 ล้านตัน และสาหร่ายสีน้ำตาลมีสูงถึงประมาณ 16 ล้านตัน (Schiewer and Volesky, 2000) ดังนั้นจึงสามารถหาสาหร่ายจากธรรมชาติมาใช้ได้ง่าย และนอกจากนี้ขนาดของสาหร่ายหลายชนิดที่มีขนาดใหญ่ สามารถกำจัดหลังจากการดูดซับสีเขียวได้ง่าย การดูดซับสีเขียวในสาหร่ายส่วนใหญ่เกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ซึ่งสาหร่ายมีผนังเซลล์และองค์ประกอบที่ผนังเซลล์แตกต่างกันไปในแต่ละดิวิชัน การที่ผนังเซลล์มีลักษณะ โครงสร้างหรือองค์ประกอบของเซลล์ที่แตกต่างกัน ทำให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการจับ โครงสร้างของสีเขียวได้แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1 และ 2.2) ดังนั้นจึงสามารถเลือกสาหร่ายมาบำบัดสีเขียวเฉพาะชนิดที่ต้องการกำจัดได้ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนผิวของตัวดูดซับนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ เช่น หมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH), คาร์บอนิล (CO) และหมู่เอมีน (NH₂) ซึ่งแตกตัวเป็นประจุลบในสารละลายสามารถดูดซับ ไอออนของสีเขียวที่เป็นประจุบวกได้ (Marungrueng and Pavasant, 2007) องค์ประกอบของผนังเซลล์ของสาหร่ายหลัก ๆ คือคาร์โบไฮเดรต โดยพบไขมันและโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยแต่พบในปริมาณน้อย และที่ภายนอกของผนังเซลล์อาจมีส่วนของหิโนปุน เหล็ก หรือไคติน (chitin) หุ้มอยู่ ผนังเซลล์ชั้นนอกจะเป็นเมือก (mucilage/gelatinous sheath) หรืออาจเป็นสารพวกเพกทิน (pectin) ส่วนผนังเซลล์ชั้นในของสาหร่ายนั้นส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกเซลลูโลส

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่จับสีเขียวที่พบในสาหร่าย

หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง	pKa	Ligand atom	ตำแหน่งที่พบ
hydroxyl	-OH	9.5-13	O	PS, UA, SPS, AA,
carbonyl (ketone)	>C=O		O	Peptide bond
carboxyl	-C=O OH	1.7-4.7	O	UA, AA
amine	-NH ₂	8-11	N	Cto, AA

PS = polysaccharide, UA=uronic acids, SPS=sulfated, Cto=chitosan, AA=amino acids (e.g. in proteins), pKa=พีเอชที่ทำให้หมู่ฟังก์ชันแตกตัว

ที่มา: ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000)

ตารางที่ 2.2 สารชีวโมเลกุล (biomolecule) ที่พบในสาหร่ายกลุ่มต่างๆ ที่นิยมใช้ในการดูดซับ

กลุ่มสาหร่าย	polysaccharide		With carboxyl		Sulfonate		Second amine		phosphonate		comment	
	cell	Man	Xyl	Muc	Alg	Sgal	Fuc	Cti	PG	LPS		PLi
Rhodophyta	f	(x)	(f)		(x)	x						(PC), (Ca)
Chlorophyta	f	(f)	(f)	x								(no), (PC), (Ca)
Phaeophyta	f				x		x					
cyanobacteria									x	OM	OM	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Schiewer and Volesky (2000)

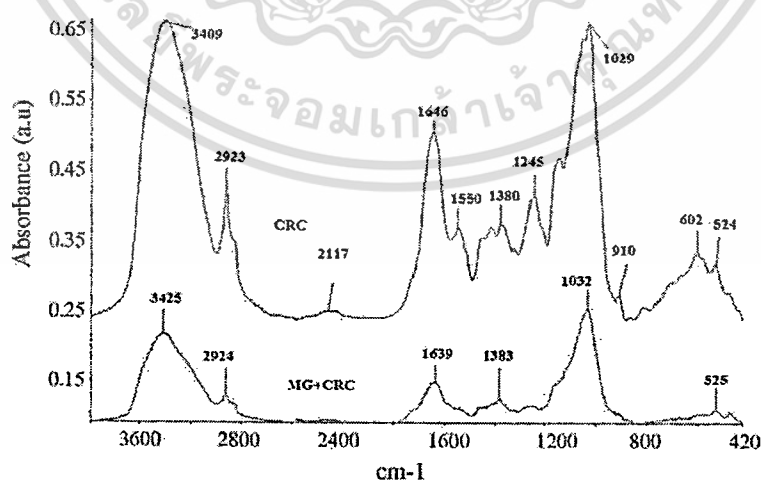
หมายเหตุ: cell=cellulose, man-mannan, xyl=xylan, muc=mucilage also containing uronic acids and sulfonate groups, Cti=chitin, PG=peptidoglycan, TA=teichoic acid, LPS= lipopolysaccharide, PLi= phospholipid, x=present, f= in inner fibrillar skeleton, OM= in outer membrane, no= no cell wall, PC=proteinaceous cuticle, lor= lorica, theca, thecal plates, sca=scales, Ca=calcified, Si= silicified, วงเล็บหมายถึงโมเลกุลนั้นพบในบางสกุลเท่านั้นหรือพบในปริมาณน้อย

เทคนิคทางด้าน Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายด้วยกัน Marungrueng and Pavasant (2007) ได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ในสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* พบหมู่ฟังก์ชันแสดงในตารางที่ 2.3 Bekci *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบปริมาณหมู่ฟังก์ชันของสาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน พบว่าหลังจากการดูดซับปริมาณหมู่ฟังก์ชันลดลง เนื่องจากเกิดการจับกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายกับประจุของสีย้อมแสดงว่าหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายถูกนำไปใช้ ภาพที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์ โดย FT-IR ของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*

Functional group	Standard Wavenumber (Skoog and Leary, 1992) (cm^{-1})	Wavenumber from the results (cm^{-1})	Relative quantity ^a
Hydroxyl; O-H	3250-3700	3200-3600	1
Carboxyl; COOH	2400-3300	3200-3600	1
Amine; NH ₂	3300-3500	3200-3600	1
C-O	1050-1300	1000-1200	2
Sulfonyl; S=O	1040-1200	1000-1200	2
Carbonyl; C=O	1670-1780	1600-1750	3
S-O	550-650	500	4
Alkyl; C-H	Carboxylic acid: 2500-3100 Alcohol: 3400-3640	2900-3000	5

ที่มา : Marungrueng and Pavasant (2007)



ภาพที่ 2.2 หมู่ฟังก์ชันของ *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (CRC) และภายหลังจากการดูดซับสีมาลาไคท์กรีน (MG+ CRC) แสดงเป็นแถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ โดย FT-IR

ที่มา : Bekci *et al.* (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่าย

2.6.1 ความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

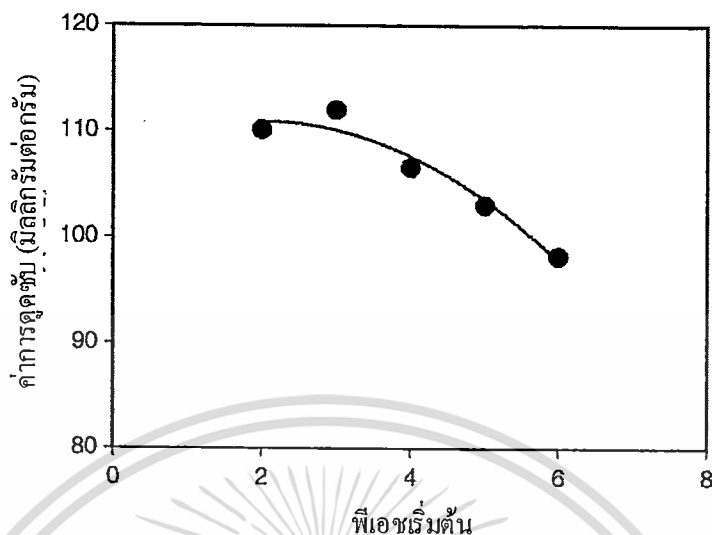
พีเอชไม่เพียงส่งผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์สาหร่ายแต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสีย้อมบางชนิด ดังนั้นค่าพีเอชในสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดซับ โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลมากกว่าพีเอชสุดท้าย (Ozer *et al.* 2005b) พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของ โมเลกุลสีย้อมในสารละลายน้ำบริเวณที่มีการดูดซับกับตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสีย้อมกับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ในสารละลายทำให้มีการตกตะกอนส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับ (Ozer *et al.* 2006a)

จากการทดลองของ Ozer *et al.* (2005a) ได้ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของการดูดซับสีแอซิดเรด 274 โดยสาหร่ายแห่ง *Enteromorpha prolifera* ที่มีระดับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่า 150 รอบต่อนาที พบว่าที่พีเอช 2-3 มีปริมาณการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 110-112 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าระดับพีเอชเริ่มต้นอื่นๆ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 2.3) เนื่องจากที่พีเอชต่ำ (2-3) มีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตระหว่างผิวหน้าที่เป็นประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสีย้อมแอซิด AR 274 เป็นสีย้อมที่มีไอออนลบ (anionic dyes) เพราะเป็นโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยกลุ่มที่มีประจุ (ionizable group) เช่น ซัลโฟเนต (SO_3^-), คาร์บอกซิเลต (CO_3^-) หรือ ซัลเฟต (SO_4^-) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี การที่พีเอชในสารละลายสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณที่มีปริมาณประจุบนผิวหน้าของสาหร่ายเพิ่มขึ้นและปริมาณประจุบวกลดลง ดังนั้นผิวหน้าที่มีประจุบวกของสาหร่ายจะไม่ดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบของสีย้อมแต่ทำให้มีแรงผลักไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีรายงานว่าแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตเป็นกลไกเบื้องต้นในการดูดซับทางชีวภาพ โดยทั่วไปการดูดซับสีย้อมแอซิดในสถานะสารละลายที่เป็นกรดจะดูดซับได้มากกว่าในสถานะที่เป็นกลางและด่าง

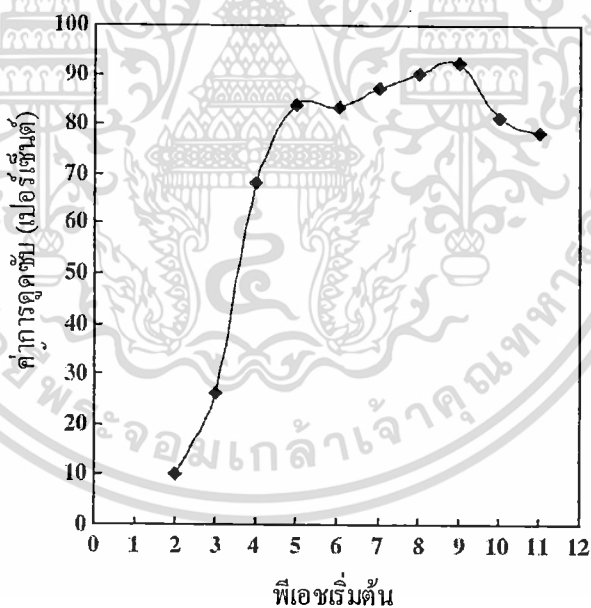
ในการดูดซับสีเบสิกมาลาโคทีกรีน โดยสาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* ที่พีเอชของสารละลายสีย้อมแตกต่างกันคือ 2-11 และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 2.4) พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 9 ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 92.4 เปอร์เซ็นต์ (Daneshvar *et al.* 2007)

นอกจากนี้ในการทดลองของ Ertugrul *et al.* (2008) ทำการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟริมาซอลบลูและรีแอคทีฟแบลคบี โดยใช้สาหร่าย *Phormidium sp.* ที่ถูกตรึงกับอัลจิเนต (alginate) แล้วเติมอาหาร BG-11ร่วมกับสีย้อมทดลองแบบกะ ที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 6.5, 7.5, 8.5 และ 9 ตามลำดับ และความเข้มข้นของสีย้อม 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 2.5) ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น

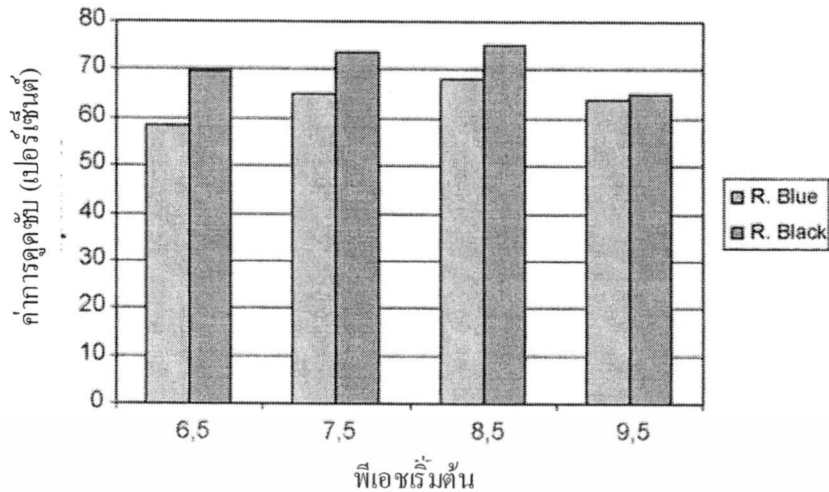
ค่าที่สูงที่สุดที่ดูดซับสีเขียว Remazol blue และ Reactive black B ได้คือพีเอช 8.5 ซึ่งดูดซับได้ 68 และ 75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีเขียวชนิดเรด 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ที่มา : Ozer *et al.* (2005a)



ภาพที่ 2.4 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย *Cosmarium sp.* ที่มา : Daneshvar *et al.* (2007)



ภาพที่ 2.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสีข้อมริมาซอลบลูและรีแอดทีฟแบลคบีโดย
สาหร่าย *Phormidium sp.*

ที่มา : Ertugrul *et al.* (2008)

2.6.2 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ

อุณหภูมิมีผลเกี่ยวข้องต่อการดูดซับสีข้อมของสิ่งมีชีวิต โดยความเร็วของปฏิกิริยาหรือ rate of chemical reaction จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Ledín, 2000) ส่วนใหญ่แล้วความสามารถในการบำบัดหรือดูดซับสีข้อมด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ การดูดซับจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Wild, 1993) แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

ค่าการดูดซับของตัวดูดซับชีวภาพแต่ละชนิดจะต่างกันตามสภาวะที่ต่างกัน หากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมที่สูงกว่ากัน จำเป็นต้องเทียบความสามารถในการดูดซับที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน คืออาจเทียบด้วยการใช้สมการการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งคือการศึกษากการดูดซับที่มีระดับอุณหภูมิเท่าๆ กัน โดยพบว่าส่วนใหญ่อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ในช่วง 20-35 องศาเซลเซียส จะไม่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่างกันมากนัก (Aksu *et al.* 1992) การเกิดปฏิกิริยาของสารแต่ละปฏิกิริยานั้น ต้องมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 1 เป็นขั้นที่ดูดพลังงานเข้าไปเพื่อสลายพันธะในสารตั้งต้น

ขั้นที่ 2 เป็นขั้นที่คายพลังงานออกมาเมื่อมีการสร้างพันธะในผลิตภัณฑ์

เอนทัลปี (enthalpy) คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการที่ความดันคงที่ เอนโทรปี (entropy) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบหรือความสับสนของระบบ ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะยังมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะยังมีค่าต่ำ และพลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy) ใช้ทำนายทิศทางของปฏิกิริยาเคมี ถ้าพลังงานอิสระกิบส์เป็นลบปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้ ถ้าพลังงานกิบส์เป็นศูนย์แสดงว่าระบบอยู่ในสมดุล ถ้าพลังงานกิบส์เป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ (อุณหภูมิกงที่ในระบบปิด)

หากเป็นการทดลองที่ผันแปรอุณหภูมิจากการดูดซับ จะสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปี (ΔH) และเอนโทรปี (ΔS) ในการดูดซับได้โดยใช้สมการในการดูดซับ

$$K_d = \frac{C_a}{C_e}$$

สมการที่ 1

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

สมการที่ 2

$$\ln k_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}$$

สมการที่ 3

โดย K_d คือ ค่าคงที่ที่จุดสมดุลในการดูดซับ

C_a คือ ปริมาณสีย้อม (มิลลิกรัม) ที่ถูกดูดซับต่อสารละลาย 1 ลิตร ที่จุดสมดุล

C_e คือ ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ 8.315 kJ/mol K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K เคลวิน)

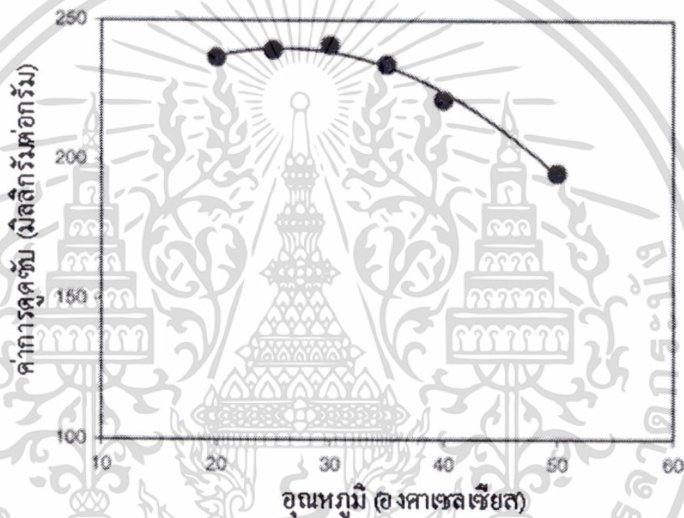
และทำการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_d$ เป็นแกน Y กับ $(1/T)$ เป็นแกน X โดยค่า ΔH หาได้จากความชันของกราฟ และค่า ΔS หาได้จากจุดตัดของกราฟ

โดยพบว่าถ้ามีค่า ΔH เป็นลบนั่นคือการดูดซับแบบ exothermic (คายความร้อน) คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มค่าการดูดซับจะลดลง ถ้า ΔH เป็นบวกนั่นคือการดูดซับแบบ endothermic (ดูดความร้อน) คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

Marungrueng and Pavasant (2006) ทำการศึกษาค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีเบสิก Astrazon blue FGRL ของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* พบว่ามีค่าเท่ากับ 14.87 กิโลจูลต่อโมล มีค่าเอนทัลปีเป็นบวก ส่วนในการศึกษาของ Aravindhana *et al.* (2007) ซึ่งค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีเบสิก Yellow dye ของสาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* พบว่าค่าเอนทัลปีเท่ากับ -3.306 กิโล

จูลต่อโมล มีค่าเอนทัลปีเป็นลบ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับทางชีวภาพของสีย้อมมีความสำคัญมากในการประยุกต์ใช้จริงของการดูดซับทางชีวภาพ เช่น วัสดุสิ่งทอต่างๆ และผลของสีย้อมอื่นๆ ซึ่งถูกผลิตที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ที่อุณหภูมิระดับ 20 , 25, 30, 35, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ พีเอชเริ่มต้น 3 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 2.6) พบว่าค่าสูงสุดที่ดูดซับสีย้อมได้คือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสแต่ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้นให้บริเวณผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าการดูดซับลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม AR 274 โดยสาหร่าย *E. prolifera* มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา (คายความร้อน) ในธรรมชาติ ของการดูดซับสีย้อมทางชีวภาพ (Ozer et al. 2005a)



ภาพที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera*
ที่มา : Ozer et al. (2005a)

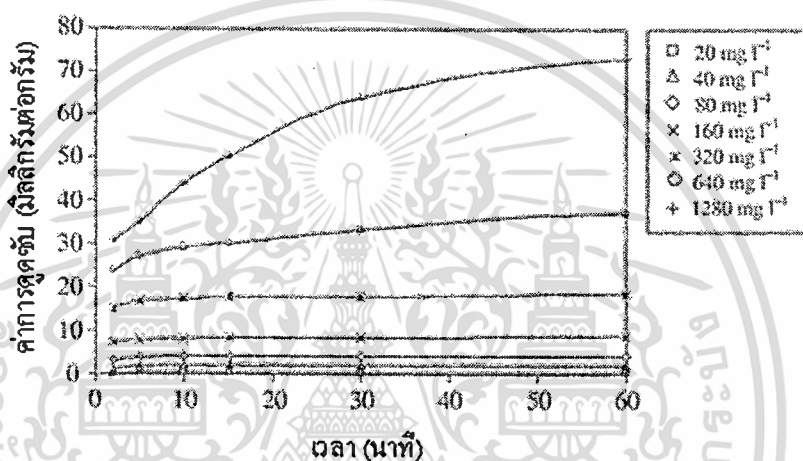
2.6.3 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น

ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นมีผลกระทบต่อความสามารถในการบำบัดสีย้อมของตัวดูดซับ ปกติแล้วการดูดซับทางชีวภาพสามารถใช้กับความเข้มข้นสีย้อมในช่วงกว้าง ถ้าความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การที่สีย้อมเข้มข้นมากทำให้มีการสะสมสีย้อมบนผิวเซลล์ตัวดูดซับซึ่งสามารถเกิดขึ้นซ้อนกันหลายๆ ชั้น ทำให้การดูดซับสูงขึ้นด้วย ความเข้มข้นสีย้อมที่สูงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงผลักของประจุสีย้อมจากสารละลายสู่ผนังเซลล์ตัวดูดซับสูง ทำให้เกิดการขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายได้แรงและเร็ว ตัวดูดซับจึงสามารถบำบัดสีย้อมได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และได้มาก ค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะถูกจำกัดโดยปริมาณตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ โดยถ้าความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ ค่าการดูดซับอาจจะต่ำ เพราะตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับไม่ได้ใช้ทั้งหมด

ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นมีความสำคัญทำให้เกิดเป็นแรงผลักดันให้ชนะแรงต้านของมวลการขนถ่ายโมเลกุลระหว่างน้ำและของแข็ง เช่น การศึกษาความสามารถการดูดซับสีย้อมเบสิก Astrazon Blue FGRL โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันคือ 20, 40, 80, 160, 320, 640 และ 1280 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 2.7) พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดทำให้สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Marungrueng and Pavasant. 2006)



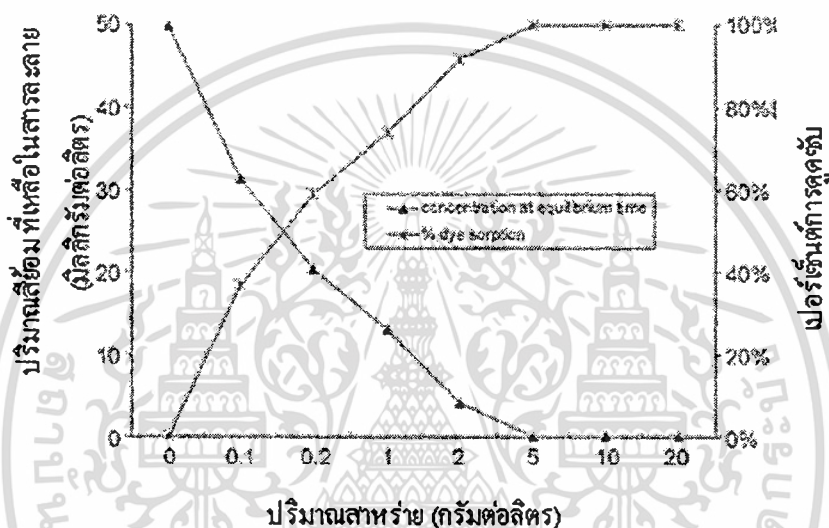
ภาพที่ 2.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกแอสตราซอลบลู FGRL โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่มา : Marungrueng and Pavasant. 2006)

2.6.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณของตัวดูดซับในสารละลายมีผลต่อปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ โดยปริมาณตัวดูดซับที่ต่ำจะเพิ่มความสามารถสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม (มิลลิกรัมสีย้อมกรัมตัวดูดซับ) และเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับจะลดลง เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันหรือขัดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งยึดจับบางส่วนไม่สามารถจับกับสีย้อมได้ ในบางสมมุติฐานกล่าวว่า การที่ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับลดลงนั้น เนื่องจากปริมาณสีย้อมที่มีอยู่ในสารละลายนั้นมีอยู่จำกัดหรือมีอยู่ในปริมาณน้อย เมื่อใส่ตัวดูดซับลงไปเป็นจำนวนมากเกิน จึงทำให้มีจำนวนตำแหน่งยึดจับมากเกินจำนวนสีย้อม เมื่อการดูดซับเสร็จสิ้นยังคงมีตำแหน่งยึดจับบางส่วนที่ว่างอยู่ หากใส่ตัวดูดซับจำนวนน้อยลงในปริมาณสีย้อมเท่ากันจะทำให้ตำแหน่งยึดจับ

สามารถจับสีย้อมได้เต็มที่ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันจึงทำให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนน้อยมีการดูดซับสีย้อมได้มากกว่า (Gadd. 1988; Fourest and Roux. 1992) ซึ่งปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมในการใช้สาหร่ายในการบำบัดสีย้อม

การดูดซับสีย้อมเบสิกเมทิลีนบลูโดยสาหร่าย *Enteromorpha* spp. ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันระหว่าง 0.1-20 กรัมต่อลิตร (ภาพที่ 2.8) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 37 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายจาก 0.1 ถึง 5 กรัมต่อลิตร (Ncibi et al. 2009)



ภาพที่ 2.8 ผลของปริมาณเซลล์ที่แตกต่างกันต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยสาหร่าย *Enteromorpha* spp.

ที่มา : Ncibi et al. (2009)

2.6.5 ผลของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน

พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของสาหร่ายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น ประกอบกับมีปริมาณรูพรุนมาก จะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ และทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะขบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่ ขนาดของรูพรุนยังมีส่วนช่วยให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารสีที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Punjongharn et al. (2008) ทำการศึกษาผลของความแตกต่างของขนาดสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* โดยผันแปรขนาดเล็ก (S) 0.1-0.84 มิลลิเมตร ขนาดกลาง (M) 0.84-2 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่ (L) มากกว่า 2 มิลลิเมตร ในการดูดซับสีแอสตราซอน (Astrazon

GTLN Red) พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กให้ความสามารถในการดูดซับมากกว่าสาหร่ายขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 ค่าการดูดซับสูงสุดของการดูดซับสีแอสตราซอน (Astrazon GTLN Red)

โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่ผันแปรขนาด

Basic dye	Sorbent size	Langmuir constant			Freundlich constant		
		q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	K_f	n	R^2
AR	L (> 2 mm)	78.7	3.4×10^{-3}	0.9584	0.6	1.2	0.8634
	M (0.84–2 mm)	76.9	7.0×10^{-3}	0.8997	1.6	1.5	0.7899
	S (0.1–0.84 mm)	113.6	4.6×10^{-3}	0.9139	0.3	1.4	0.8952

ที่มา: Punjongham *et al.* (2008)

2.7 กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีเขียว

2.7.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

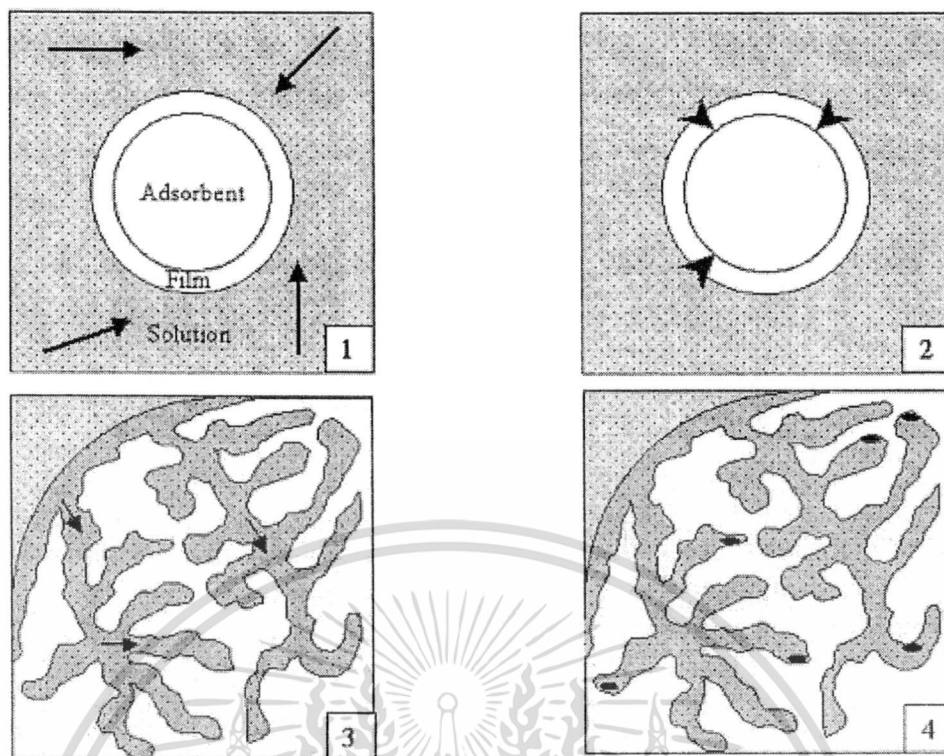
กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน (ภาพที่ 2.9) (Friberb *et al.* 1992; McKay *et al.* 1983)

ขั้นตอนที่ 1 Bulk Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (mass transfer) จากสารละลาย (bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือ โมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 Film Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ ข้ามฟิล์มน้ำ (boundary layer) ไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 Intraparticle Transport หรือ Pore Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (mass transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (adsorbent particle)

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนของกลไกการดูดซับ

ที่มา : Agrawal. (1990)

2.7.2 สภาวะสมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับ

การใช้สำหรับดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนมีศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) คือ อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ เรียกว่าเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วย ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและภายใต้อุณหภูมิคงที่

ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ เป็นการหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับโลหะหนักของสารช่วย การหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการของ Langmuir หรือ Freundlich

โดยไอโซเทอร์มของ Langmuir มีลักษณะการดูดซับเป็น homogeneous binding site คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งยึดจับที่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Langmuir adsorption isotherm มีสมการดังนี้

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

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_{\max}} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m} \quad \text{สมการที่ 3}$$

โดย q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สำหรับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)

Q_{\max} คือ ปริมาณสีย้อมสูงสุด (maximum capacity) ที่สาหร่ายสามารถดูดซับได้ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)

C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_a คือ ค่าคงที่ในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพรรคของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ไอโซเทอร์มของ Freundlich มีลักษณะการดูดซับเป็น heterogeneous binding site พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งยึดจับที่ต่างชนิดกัน ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว

Freundlich adsorption isotherm มีสมการดังนี้

$$q_e = K_F * C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 4}$$

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดย q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (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

การดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายนั้น ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm โดยในแต่ละการทดลองจะนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสีย้อม ซึ่งความสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการเลือกใช้อิโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีย้อมโดยใช้สาหร่ายคือ ทำให้สามารถอธิบาย สมดุลของสาหร่ายในระบบการบำบัดสีย้อมได้ถูกต้องตัวอย่างความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมและชนิดสาหร่ายแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมและชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกัน

Dye	Algae	Langmuir adsorbtion Isotherm			Freundlich adsorbtion Isotherm			References
		Q_{max} (mg ⁻¹ dry wt)	K_a (Lmg ⁻¹)	r^2	k_F	n	r^2	
Methylene blue	<i>Enteromorpha</i> spp.	273.79	0.02	1	18.09	1.89	0.9830	Ncibi <i>et al.</i> (2009)
Malachite green	<i>Turbinaria conoids</i>	66.66	0.02	0.998	3.75	1.83	0.9810	Kannan <i>et al.</i> (2010)
Acid red 274	<i>Enteromorpha prolifera</i>	244.00	0.07	0.996	23.28	0.62	0.9932	Ozer <i>et al.</i> (2005a)
Astrazon blue FGAL	<i>Caulerpa lentilifera</i>	37.17	0.02	0.975	0.77	1.10	0.9734	Marungrueng and Pavasant. (2006)

2.7.3 จลศาสตร์การดูดซับ

จลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่างๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพ (สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549) สำหรับการดูดซับสีย้อมโดยใช้สาหร่ายนั้นพบว่าได้มีการประยุกต์ใช้รูปแบบสมการเพิ่มขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการดูดซับ โดยสมการที่ได้รับการยอมรับในการศึกษาอันดับของปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน (pseudo first order reaction) และปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน (pseudo second order reaction)

สมการเส้นตรงของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad \text{สมการที่ 8}$$

โดย q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ อันดับที่หนึ่งเสมือน (ลิตรต่อนาที)

และทำการสร้างกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ เป็นแกน Y กับ t เป็นแกน X โดยค่า q_e หาได้จาก

จุดตัดของกราฟ และค่า k_1 หาได้จากความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเส้นตรงของปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน

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

สมการที่ 9

โดย q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบอันดับที่สองเสมือน (กรัมต่อมิลลิกรัม นาที)

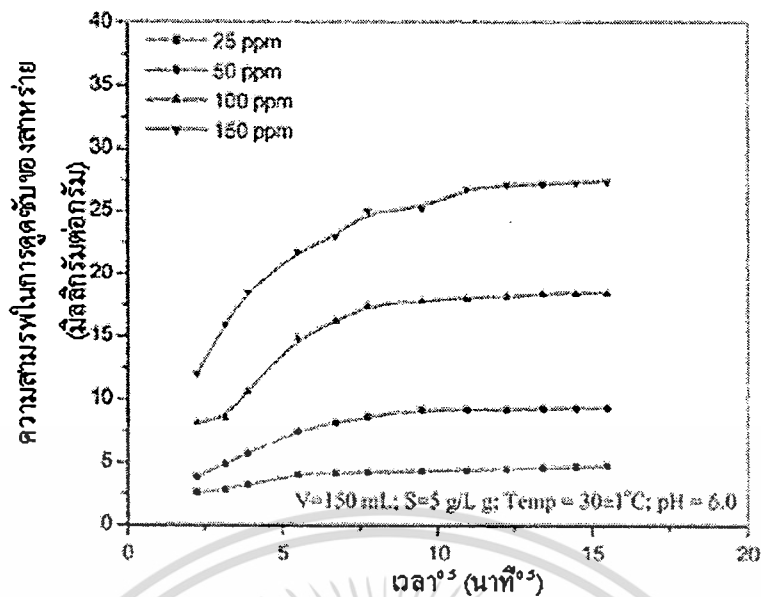
และทำการสร้างกราฟระหว่าง (t/q_t) เป็นแกน Y กับ t เป็นแกน X โดยค่า q_e หาได้จากความชันของกราฟ และค่า k_2 หาได้จากจุดตัดของกราฟ

จลศาสตร์การดูดซับของการดูดซับสีย้อมจากการศึกษาของ Marungrueng and Pavasant (2007) โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* รูปแบบจลศาสตร์ 3 แบบ pseudo-first order, pseudo-second order และ intra-particle ซึ่งพบว่ารูปแบบจลศาสตร์ pseudo-first order ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการทำนายจลศาสตร์การดูดซับ แต่สำหรับระบบการดูดซับทั้งหมดบ่งชี้ว่าจลศาสตร์การดูดซับที่สามารถอธิบายได้ดีที่สุดด้วยรูปแบบ pseudo-second order เนื่องจากการกรณีนี้เป็นการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้น โดยปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนผิวหน้าของตัวดูดซับและสีย้อม

การหาขึ้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการประเมินวิธีการดูดซับ Marungrueng and Pavasant (2007) รายงานว่าโดยทั่วไปกระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้โดย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มต้นด้วยการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ (ชั้นนี้มักไม่นำมาใช้กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ) ขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในอนุภาค (รูพรุน) และขั้นการดูดซับของสารละลายผ่านเข้าสู่ภายในผิวหน้าของรูพรุนและช่อง capillaries ของตัวดูดซับระหว่าง 3 ขั้นตอนนี้ ขั้นตอนสุดท้ายมีความสัมพันธ์กับความเร็ว

Aravindhan *et al.* (2007) ศึกษารูปแบบการแพร่เข้าของอนุภาคที่เข้าสู่จุดสมดุล *Caulerpa scalpelliformis* (ภาพที่ 2.10) พบว่าขั้นการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา

นอกจากนี้ Marungrueng and Pavasant (2007) ศึกษารูปแบบการแพร่เข้าของอนุภาคที่เข้าสู่จุดสมดุล *Caulerpa lentillifera* พบว่าขั้นการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.10 ชั้นการแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa scalpelliformis* ต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกเกตโล
ที่มา : Aravindhan *et al.* (2007)

2.8 การใช้สาหร่ายบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

การศึกษาการดูดซับสีย้อมของ Khalaf (2008) ได้ทำการทดลองโดยใช้สาหร่าย *Spirogyra* sp. บำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ Synazol จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำสาหร่ายมาทำการ pre-treatment โดยการนำไปผ่านหม้อนึ่งมาเชื่อก่อนการนำไปดูดซับ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาในการสัมผัสสีย้อม 18 ชั่วโมง

นอกจากนี้ Lim *et al.* (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพจากน้ำเสียที่มีสีอะโซ (Azo, เป็นสีย้อมประจุลบประเภทหนึ่ง) Supranol Red 3 BW ปนเปื้อนจากโรงงานฟอกหนังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยใช้เซลล์มีชีวิตซึ่งปริมาณเซลล์มีคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ในช่วง 0.17 ถึง 2.26 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 41.8 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.9 การล้างสีย้อมออกจากตัวดูดซับ (Desorption)

Desorption หมายถึงการปล่อยออกหรือการทำให้ตัวดูดซับปล่อยสารที่ดูดซับไว้ออกไป ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การดูดซับแบบถาวรและการดูดซับแบบย้อนกลับ การดูดซับแบบถาวรจะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การดูดซับแบบถาวรและการดูดซับแบบย้อนกลับ การดูดซับแบบถาวรจะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การดูดซับแบบถาวรและการดูดซับแบบย้อนกลับ การดูดซับแบบถาวรจะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การดูดซับแบบถาวรและการดูดซับแบบย้อนกลับ การดูดซับแบบถาวรจะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การดูดซับแบบถาวรและการดูดซับแบบย้อนกลับ การดูดซับแบบถาวรจะหมายถึงการที่สีย้อมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวเซลล์ของสาหร่ายถูกปล่อยออกมาจากสาหร่าย ซึ่งคือการล้างสีย้อมออกจากสาหร่ายที่ดูดซับสีย้อมไว้นั่นเอง ขบวนการ desorption นี้จะตรงข้ามกับการดูดซับหรือ sorption ส่วนความหมายในทางเคมี desorption คือความสามารถของสารเคมีที่ทำให้สีย้อมที่ยึดเกาะอยู่กับตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับแบ่งได้

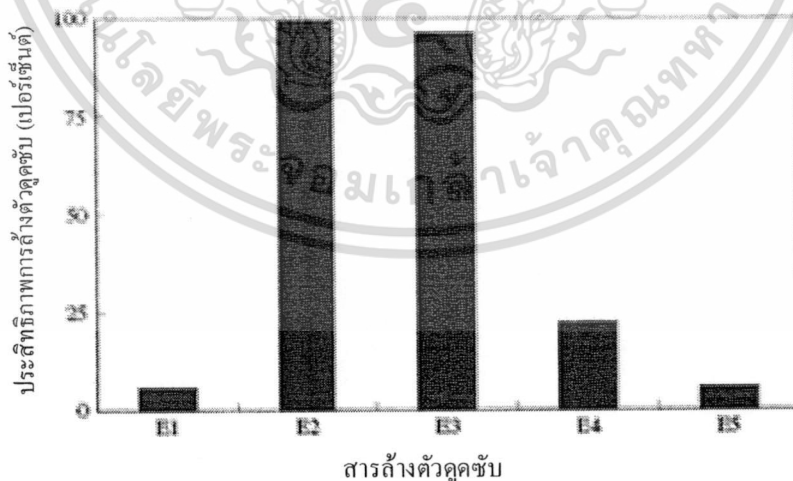
เป็น 2 ประเภท คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดได้หลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) มักจะเกิดในสภาวะอุณหภูมิต่ำๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับหลังการดูดซับชั้นของ โมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer)

ดังนั้นในการใช้สารที่แตกต่างกันในการล้างสีย้อมจากเซลล์สาหร่ายส่งผลต่อโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับแตกต่างกันได้

Vijayaraghavan and Yun (2008) ศึกษาการล้างตัวดูดซับสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) ออกจากสาหร่ายสีน้ำตาล *Laminaria sp.* ที่มีค่าการดูดซับสี 53.8 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้สารเคมีต่างๆ ประกอบด้วย HCl, NaOH, Na_2CO_3 , EDTA (disodium salt) และ Methanol (ภาพที่ 2.11) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร พบว่า NaOH 0.01 โมลาร์ มีความสามารถในการล้างตัวดูดซับสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 สูงสุดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.11 การล้างสาหร่าย *Laminaria sp.* ที่ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยใช้สารเคมีต่างกัน E1 คือ HCl 0.1 โมลาร์, E2 คือ NaOH 0.01 โมลาร์, E3 คือ Na_2CO_3 0.01 โมลาร์, E4 คือ EDTA 0.01 โมลาร์ และ E5 คือ Methanol 2 เปอร์เซ็นต์

ที่มา : Vijayaraghavan and Yun. (2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ชนิดของสาหร่าย

3.1.1 สาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย

3.1.1.1 *Arthrospira platensis*

3.1.1.2 *Phormidium angustissimum*

3.1.2 สาหร่ายสีเขียว

3.1.2.1 *Ulva intestinalis*

3.1.2.2 *Ulva rigida*

3.1.2.3 *Caulerpa lentillifera*

3.1.2.4 *Caulerpa sertularioides*

3.1.2.5 *Rhizoclonium* sp.

3.1.2.6 *Chaetomorpha* sp.

3.1.3 สาหร่ายสีน้ำตาล

3.1.3.1 *Padina* sp.

3.1.3.2 *Turbinaria* sp.

3.1.3.3 *Dictyota* sp.

3.1.3.4 *Sargassum* sp.

3.1.4 สาหร่ายสีแดง

3.1.4.1 *Acanthophora* sp.

3.1.4.2 *Gracilaria fisheri*

3.1.4.3 *Solieria* sp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมี

3.2.1 อาหารเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กรวมไฮยาโนแบคทีเรีย (ภาคผนวก ก)

3.2.1.1 Zarrouk' s medium

3.2.1.2 BG-11 medium

3.2.2 สีย้อมสำหรับการใช้ในการทดลอง

3.2.2.1 สีแอซิด (acid dye) OT 60304 A Benewol Red RS[®]

3.2.2.2 สีเบสิก (basic dye) OT 70701 A Malachite Green Crystal[®]

3.2.2.3 สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) OT 404021 Benefix Red 5 B[®]

3.2.3 เคมีภัณฑ์สำหรับการปรับพีเอช

3.2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Carlo erba, France)

3.2.3.2 กรดไนตริก (HNO₃) (Merck, Germany)

3.2.4 เคมีภัณฑ์สำหรับการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับ

โรงงานอุตสาหกรรม

3.2.4.1 อะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต (Carlo erba, France)

3.3 อุปกรณ์

3.3.1 เครื่องกรองลดความดัน (Suction pump) (Motor company, U.S.A.)

3.3.2 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (BECthai, Thailand)

3.3.3 ตู้ปลอดเชื้อ (Microminar flow, ABS 1200 A, UK)

3.3.5 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) (Hirayama, Hiclave HV-50, Japan)

3.3.6 ตู้อบ (Hot air oven) (Shellab 1350FX, U.S.A)

3.3.7 อ่างทำความร้อน (Water bath) (WNE, Germany)

3.3.8 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.3.9 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.3.10 เครื่องผสมสาร (vortex) (vision scientific, Korea)

3.3.11 เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) (MS300 HS, Korea)

3.3.12 ตะแกรงร่อน (sive)

3.3.13 กิวเวต (semimicro rectangular 10 mm, Hellma, U.S.A.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.14 ไมโครปิเปต (micro pipette) (socorex, Switzerland)

3.3.15 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) (Ecoscan, Netherlands)

3.3.16 โถดูดความชื้น (Descicator)

3.3.17 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.3.18 กระบอกลม (Cylinder)

3.3.20 เพลท (Plate)

3.3.22 ขวดน้ำเกลือ

3.3.23 สายออกซิเจน

3.3.24 ทิป (tip)

3.3.25 หลอดทดลอง

3.3.26 เครื่องแก้วต่างๆ

3.3.27 ภาชนะพลาสติก (polypropylene) ต่างๆ

3.3.28 ผ้ากรองเพลงก้ตอน

3.3.29 กระดาษกรอง

3.3.30 ซ้อนตักสาร

3.3.31 Rack

3.4 สถานที่ทำการวิจัย

3.4.1 ห้องปฏิบัติการเพลงก้ตอน หลักสูตรวิทยาศาสตรจารย์ประมง สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.5 วิธีการศึกษา

3.5.1 การเตรียมสาหร่ายและสีเขียว

3.5.1.1 การเตรียมสาหร่าย

เก็บสาหร่ายทะเลขนาดใหญ่จากธรรมชาติและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides* และ *Acanthophora* sp. จากบรจฟาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา เตือนพฤษภาคม *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Ulva rigida* และ *Ulva intestinalis* จากสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดตราด เตือนพฤษภาคม *Sargassum* sp., *Dictyota* sp. และ *Turbinaria* sp. เก็บมาจากชายหาดจังหวัดชลบุรี เตือนมีนาคม *Padina* sp. เก็บจากชายหาดจังหวัดตราด เตือนมีนาคม และ *Gracilaria fisheri* และ *Solieria* sp. เก็บมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพาะเลี้ยงกึ่งทะเล จังหวัดสมุทรสงครามเดือนเมษายน โดยครอบคลุมในกลุ่มของสาหร่ายคือ สาหร่ายสีแดง (*Acanthophora* sp., *G. fisheri* และ *Solieria* sp.) สาหร่ายสีน้ำตาล (*Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Dictyota* sp. และ *Sargassum* sp.) สาหร่ายสีเขียว (*C. lentilifera*, *C. sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *U. rigida*, *U. intestinalis* และ *Chaetomorpha* sp.) นำสาหร่ายมาล้างทำความสะอาด สะอาดจัดเศษสาหร่ายขนาดเล็กหรือเศษหอย เปรียง ขจัดสิ่งปนเปื้อนเช่น โปรโตซัว เศษดิน หินทราย จากนั้นนำไปฟุ้งแดดจนแห้งและบดให้ละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 0.5 และ 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ขนาดสาหร่ายที่อยู่ในช่วง 0.5-1 เก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำและนำไปใช้ทดสอบ การดูดซับสีย้อม

เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย (*Arthrospira platensis* และ *Phormidium angustissimum*) โดยเลี้ยง *A. platensis* ในอาหารสูตร Zarrouk' s และ *P. angustissimum* ในอาหารสูตร BG-11 ภายใได้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส มีการให้พองอากาศ เก็บสาหร่ายที่ระยะ 1 สัปดาห์ (exponential phase) โดยการกรองผ่านผ้ากรองขนาด 15 ไมครอน ล้างด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนแห้ง (3-5 วัน) เก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดลอง นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและใส่โถดูดความชื้นเพื่อไล่ความชื้น โดยสาหร่ายที่ใช้เป็น สายพันธุ์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการและนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ปริมาณมากเพื่อนำมาทดสอบ การดูดซับสีย้อม โดยสาหร่ายส่วนใหญ่ที่เลือกมาศึกษาเป็นสาหร่ายที่เกาะกันเป็นกลุ่มมีขนาดใหญ่ หรือเส้นสายยาว ซึ่งจะป้องกันการอุดตันของระบบนำบัคน้ำเสียได้ หากเก็บสาหร่ายขนาดเล็กจากธรรมชาติมาใช้โดยตรง อาจมีการปนเปื้อนสิ่งต่างๆ เพราะขนาดของสาหร่ายจะทำให้แยกออกจากกันได้ยาก จะทำให้ไม่ทราบประสิทธิภาพที่แท้จริงของสาหร่ายชนิดนั้นๆ ในการดูดซับสีย้อม

3.5.1.2 สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง

สีแอซิด (acid dye) OT 60304 A Benewol Red RS[®] นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน (Protein) ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมผ้าไหม หม่อนและขนสัตว์

สีเบสิก (basic dye) OT 70701 A Malachite Green Crystal[®] ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic) เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอนและอะคริลิก (ย้อมผ้าใยสังเคราะห์ เชือกไนลอน)

สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) OT 404021 Benefix Red 5 B[®] ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมผ้าฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน และอุตสาหกรรมกระดาษ

การหาความยาวคลื่นในการวัดค่าดูดกลืนแสงที่เหมาะสมของสีย้อมแต่ละประเภท โดยนำสีย้อมแต่ละประเภทมาชั่งและละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยโวลูมเมตริกฟลาก์สขนาด 100 มิลลิลิตรและทำการผันแปรความเข้มข้นหลายระดับที่สามารถนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย เครื่อง UV-vis spectrophotometer แล้วไม่ให้เกินค่ามาตรฐาน (ไม่เกิน 1) โดยสารสีแต่ละชนิดจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร โดยเครื่องจะทำการสแกนความยาวความคลื่นที่เหมาะสม โดยดูจาก peak ที่สูงสุด (ภาคผนวก ข) หลังจากนั้นนำสีย้อมแต่ละประเภทมาชั่งและละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยโวลูมเมตริกฟลาก์สขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการผันแปรความเข้มข้นหลายระดับเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยเมื่อนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer แล้วให้มีความเท่ากับหรือเข้าใกล้ 1 ที่สุด ความเข้มข้นสีย้อมระดับนี้จะนำมาเป็นค่าความเข้มข้นมาตรฐานตัวสุดท้ายในกราฟมาตรฐาน และทำการเจือจางอีก 4 ระดับ เป็นกราฟมาตรฐานที่สมบูรณ์

3.5.2 การศึกษาการดูดซับสีย้อมเพื่อคัดเลือกชนิดสารห่วยที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

3.5.2.1 การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

นำสารห่วยขนาดใหญ่ และขนาดเล็กที่เตรียมไว้ใส่ในสารละลายสีย้อมที่มีระดับพีเอชแตกต่างกัน คือ พีเอชเริ่มต้นที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 โดยปรับระดับพีเอชของสารละลายสีย้อม โดยใช้ HNO_3 0.1 โมลต่อลิตร และ NaOH 0.1 โมลต่อลิตร แล้วใส่สารห่วยที่เตรียมไว้ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสีย้อมสูงสุดที่สามารถวัดได้โดยเครื่อง spectrophotometer ของแต่ละสี (จากข้อ 3.5.1.2) โดยสีย้อมแอซิดเบเนวอลเรดและรีแอกทีฟเบเนฟิครีดที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร สีย้อมเบสิคมาลาไคท์กรีนวัดที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยทดลองระดับพีเอชละ 3 ชั่วโมงเทียบกับชุดควบคุม (คือสีย้อมไม่ใส่สารห่วย) เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองสารห่วยออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมครอน และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี

คำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารห่วย (q มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม)

ดังสมการ

$$q = V(C_0 - C_{eq})/M \quad \text{สมการที่ 10}$$

โดย V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (มิลลิลิตร)

C_0 คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{eq} คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

M คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของสารห่วย (กรัม)

3.5.2.2 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีข้อมในพีเอชที่เหมาะสม

เตรียมสารละลายสีข้อมที่พีเอชเหมาะสม (ผลจากข้อ 3.5.2.1) และใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ต่อสารละลายสีข้อมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีข้อมเบนเนออลเรด อาร์เอส 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีข้อมเบนเนฟิแคเรด 5 บี และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีข้อมมาลาไคท์กรีน คริสตัล เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และวัดปริมาณสีข้อมที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่างๆ กันคือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมง และหาจุดสมดุลในการดูดซับโดยการสร้างการระหว่างระยะเวลากับค่าการดูดซับ

3.5.2.3 การหาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีข้อมโดยสาหร่าย

เตรียมสารละลายสีข้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีข้อม 10 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสีข้อมแตกต่างกัน คือ 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่จุดสมดุล (ผลจากข้อ 3.5.2.2) และหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ โดยการหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich (สมการที่ 5 และ 7)

3.5.3 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้สาหร่ายในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคัดเลือกสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูงในแต่ละชนิดสีจากขั้นต้น 3 ชนิด ได้แก่ *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ในการดูดซับสีข้อมเบนเนออลเรด *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ในการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน และ *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ในการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิแคเรด

3.5.3.1 ศึกษาหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีข้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายขนาด 0.25-0.49 มิลลิเมตร โดยผันแปรปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 และ 6 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสีข้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสีข้อมตามข้อ 3.5.2.1 ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนเข้าสู่จุดสมดุล (ผลจากข้อ 3.5.2.2) และวัดปริมาณสีข้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเซี่ยงไฮ้ ภายใต้อิทธิพลของกฎหมายคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาของจีน การใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3.2 ความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายขนาด 0.25-0.49 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร โดยผันแปรความเข้มข้นของสีย้อม 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรเขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนเข้าสู่จุดสมดุล (ผลจากข้อ 3.5.2.2) และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

3.5.3.3 อุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายขนาด 0.25-0.49 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสีย้อมตามข้อ 7.2.1 ในหลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร โดยผันแปรอุณหภูมิที่ 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส บนอ่างทำความร้อน (water bath) จนเข้าสู่จุดสมดุล (ผลจากข้อ 3.5.2.2) และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี นำไปคำนวณตามสมการที่ 10 เพื่อหาความสามารถในการดูดซับ และคำนวณตามสมการที่ 1, 2 และ 3 เพื่อหาพลังงานของระบบ

3.5.3.4 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสีย้อมตามข้อ 3.5.2.1 โดยผันแปรขนาดสาหร่าย น้อยกว่า 0.1, 0.1-0.24, 0.25-0.49 และ 0.5-1 มิลลิเมตร โดยการแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน 0.1, 0.25 และ 1 มิลลิเมตร วัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

3.5.4 การศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลพลศาสตร์โดยใส่สาหร่ายในสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80, 160, 240, 320 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมเบนเนวอลเรด อาร์เอส และเบนเนฟิครด 5 บี และที่ความเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมมาลาไคท์กรีน คริสตัล ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมงและศึกษาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) ตามสมการที่ 8 และ 9 การหาขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ (rate limiting step) โดยสร้างกราฟระหว่างรากที่สองของเวลา (นาที) กับค่าการดูดซับ เพื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาค และสร้างกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ

สารละลายที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ ต่อสารละลายที่ย้อมเริ่มต้น เพื่อหาอัตราเร็วของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

3.5.5 การทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

นำน้ำประปาละลายสีย้อมเบนโวลเรด อาร์เอส ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สีย้อม เบนโวลเรด 5 ปี ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีย้อมมาลาโคท์กรีน คริสตัล ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่ปรับพีเอช นำน้ำเสี้ยวส่วนบนเหนือตะกอน มาบำบัดโดยใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลาย 200 มิลลิตร วัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่างๆ กันคือ 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

3.5.6 การวัดปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปริมาณสีย้อม ด้วยเครื่อง spectrophotometer (Genesys 20 Thermo Spectronic, Thailand) ทำการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) โดยในทุกชุดการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของชุดทดลองแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธี Duncan new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์ (SPSS For Windows 12.0)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อม

การคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อมโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) โดยทำนายจากค่าไอโซเทอร์มการดูดซับซึ่งการศึกษาค่าการดูดซับสูงสุดต้องศึกษาที่จุดสมมูลและระดับพีเอชเหมาะสม จึงทำการศึกษาพีเอชและเวลาที่เข้าสู่สมมูลเพื่อนำไปศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต่อไป

4.1.1 ระดับพีเอชของสารละลาย

ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไลท์กรีน และเบนเนฟิแคเรด โดยสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Phormidium angustissimum*, *Ulva intestinalis*, *Ulva rigida*, *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., *Dictyota* sp., *Gracilaria fisheri*, *Acanthophora* sp. และ *Solieria* sp.

4.1.1.1 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด

ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย 13 สกุลพบว่าสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดได้สูงที่สุดในสารละลายที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 3 (ตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1) โดย *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 33.68 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ *C. lentillifera* ซึ่งมีค่าการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 33.41 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) โดย *Solieria* sp. มีค่าการดูดซับต่ำสุด

พีเอชไม่เพียงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพแต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสีย้อม โดยที่พีเอชเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนลบของตัวสีแก่ น้ำ หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมที่แสดงประจุลบ (Anionic group) เช่น หมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) หมู่คาร์บอกซิลเลต (CO_3^-) ฯลฯ ซึ่งมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (pK_a) เท่ากับ 1.3 และ 1.7-4.7 ตามลำดับ โดยที่หมู่ซัลโฟเนตนั้นจะให้ความเป็นกรดที่แก่กว่าหมู่คาร์บอกซิลเลต ดังนั้นค่าพีเอชในสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดซับ โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลมากกว่าพีเอชสุดท้าย (Ozer et al. 2005b) ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารละลายสีย้อมประจุลบและพบว่าเมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวกของโปรตอน (H^+) และ hydronium ions (H_3O^+) ที่บริเวณผิวเซลล์ของสาหร่ายและเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีย้อมแอซิดได้มาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้สาหร่ายเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำ (Ozer et al. 2006a)

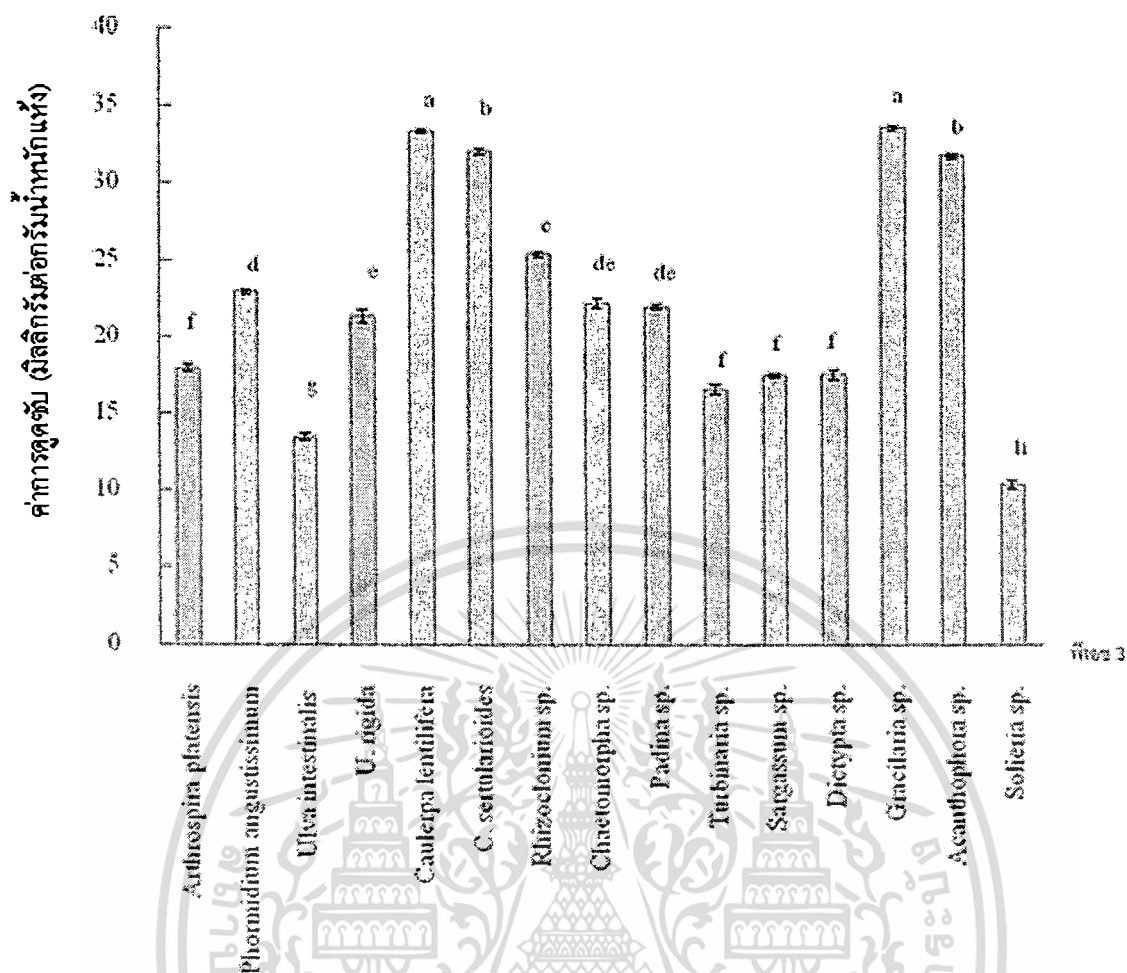
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การดูดซับสีของเบเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Algae	pH							
	2	3	4	5	6	7	8	
<i>Arthrospira platensis</i>	12.32±0.41 ^{bj}	17.94±0.24 ^{aF}	12.15±0.88 ^{bF}	9.18±0.54 ^{cF}	7.19±0.53 ^{dEF}	7.19±0.53 ^{dE}	7.19±0.53 ^{dG}	
<i>Phormidium angustissimum</i>	17.72±0.23 ^{cF}	22.95±0.15 ^{aD}	20.34±0.45 ^{bC}	16.14±0.38 ^{cC}	12.59±1.15 ^{dD}	11.15±0.29 ^{dC}	9.038±0.51 ^{dD}	
<i>Ulva intestinalis</i>	10.02±0.14 ^{cK}	13.49±0.21 ^{aG}	12.36±0.14 ^{bF}	10.14±0.20 ^{cF}	4.93±0.27 ^{eG}	6.43±0.09 ^{dEF}	5.10±0.07 ^{eH}	
<i>Ulva rigida</i>	20.27±0.23 ^{abE}	21.35±0.41 ^{aE}	18.86±1.05 ^{bcCD}	16.94±0.69 ^{cdC}	14.90±0.19 ^{deC}	13.51±0.10 ^{eb}	10.45±0.15 ^{fc}	
<i>Caulerpa lentillifera</i>	31.76±0.22 ^{ba}	33.41±0.18 ^{aA}	28.49±0.54 ^{ca}	27.30±0.33 ^{ca}	21.66±0.73 ^{da}	14.45±0.45 ^{eb}	11.38±0.29 ^{fb}	
<i>Caulerpa sertularioides</i>	31.08±0.21 ^{aB}	32.10±0.10 ^{aB}	27.49±0.62 ^{ba}	26.50±0.26 ^{ba}	21.99±0.47 ^{ca}	13.94±0.21 ^{db}	12.54±0.20 ^{ca}	
<i>Rhizoclonium sp.</i>	23.30±0.35 ^{bd}	25.41±0.14 ^{aC}	20.15±0.30 ^{cC}	16.65±0.21 ^{cC}	18.50±0.50 ^{dB}	15.76±0.22 ^{ea}	8.81±0.32 ^{fd}	
<i>Chaetomorpha sp.</i>	15.76±0.20 ^{cG}	22.23±0.32 ^{aDE}	16.54±0.43 ^{ce}	18.25±0.64 ^{bb}	14.55±0.40 ^{dc}	8.56±0.07 ^{ed}	7.66±0.12 ^{ee}	
<i>Padina sp.</i>	14.65±0.18 ^{ch}	21.99±0.15 ^{aDE}	18.18±0.21 ^{bDE}	12.92±0.24 ^{dd}	7.83±0.38 ^{ee}	7.92±0.06 ^{ed}	7.38±0.21 ^{eeF}	
<i>Turbinaria sp.</i>	11.95±0.08 ^{bj}	16.63±0.30 ^{aF}	11.77±0.69 ^{bF}	11.39±0.52 ^{be}	8.46±0.90 ^{ce}	6.14±0.22 ^{dEF}	7.86±0.21 ^{ce}	
<i>Sargassum sp.</i>	14.11±0.21 ^{bHI}	17.51±0.12 ^{aF}	11.77±0.62 ^{cf}	11.60±0.62 ^{ce}	5.56±1.66 ^{dFG}	5.50±0.09 ^{df}	7.63±0.13 ^{dEF}	
<i>Dictyota sp.</i>	13.79±0.19 ^{bi}	17.59±0.32 ^{aF}	11.27±0.26 ^{df}	12.51±0.25 ^{cdE}	9.03±0.31 ^{ee}	5.64±0.09 ^{gf}	7.38±0.15 ^{feF}	
<i>Gracilaria fisheri</i>	30.86±0.14 ^{bb}	33.68±0.16 ^{aA}	24.18±0.23 ^{eb}	15.94±0.32 ^{cc}	18.21±0.34 ^{db}	13.79±0.12 ^{fb}	10.22±0.45 ^{gc}	
<i>Acanthophora sp.</i>	30.18±0.18 ^{ac}	31.84±0.16 ^{ab}	23.63±1.42 ^{bb}	18.43±0.15 ^{cb}	19.38±0.08 ^{cb}	13.49±0.28 ^{db}	10.84±0.35 ^{ebC}	
<i>Solieria sp.</i>	6.34±0.09 ^{cl}	10.45±0.26 ^{ah}	6.43±0.24 ^{cG}	6.22±0.12 ^{cG}	7.72±0.48 ^{be}	6.75±0.12 ^{ce}	6.79±0.17 ^{cfG}	

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวนอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



พืช 3

ภาพที่ 4.1 การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายทะเลระดับพีเอชเหมาะสม (พีเอช 3) (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันเนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน (functional group) บริเวณพื้นผิวของสาหร่ายแต่ละชนิดต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชันเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและการจับกันระหว่างประจุของพื้นผิวสาหร่ายกับประจุของสีย้อม สาหร่ายมีโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว หมู่ฟังก์ชันมักเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของโมเลกุลที่มีพวกมันเป็นส่วนประกอบ สารชีวโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชันหลายอย่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้นก็มีกลุ่มของกรดที่ทำหน้าที่ดูดซับเป็นหลัก คือหมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ใน uronic acid หรือน้ำตาลที่เป็นกรด เช่น guluronic, glucuronic, mannuronic อาจพบใน sulphonate group ได้ด้วย สำหรับ hydroxyl group พบในพอลิแซคคาไรด์ทุกชนิด และจะให้ประจุลบได้เมื่อพีเอชมากกว่า 10 เท่านั้น (Schiewer and Volesky, 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่คาร์บอกซิลที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลักในการดูดซับได้มากในสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นเพราะมี alginic acid เป็นองค์ประกอบ หมู่คาร์บอกซิลจะพบน้อยใน glucuronic ของสาหร่ายสีเขียวและสีแดง ส่วน sulfonate group จะพบมากในสาหร่ายสีแดงเพราะมี carrageenan, porphyran และ agar และยังพบ sulfonate group ใน fucoidan ของสาหร่ายสีน้ำตาลและใน sulfated heteropolysaccharides ของสาหร่ายสีเขียว โดยเฉพาะในสาหร่ายสีเขียวยังพบหมู่ฟังก์ชันของ amino acid (hydroxyl, carboxyl, sulfhydryl, amine, imine, amide, และ anidazole) ด้วย ซึ่งพวกนี้จะประกอบอยู่ที่ผนังเซลล์และทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับได้เช่นกัน ส่วนผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีส่วนของ peptidoglycan อยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักผนังเซลล์ทั้งหมด ในส่วน peptidoglycan จะมี glucosamine และ muramic acid ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ปลายสายของกรดอมิโน และยังมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่กรดอมิโนต่างๆ เช่น asparagines, lysine, cysteine หรือ aspartic acid และมีส่วน lipopolysaccharide และ lipoprotein อยู่ที่ด้านนอกของผนังเซลล์ (outer membrane) ซึ่งจะมีกลุ่ม phosphonate ทำหน้าที่สร้างประจุลบที่ผิวหน้าทำให้เกิดการจับกับประจุบวกได้ (Schiewer and Volesky, 2000)

ปริมาณการดูดซับในการศึกษานี้ที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 3 ในช่วงที่มีการดูดซับสูงสุด เนื่องจากมีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตระหว่างผิวหน้าที่เป็นประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสีย้อมแอซิดซึ่งเป็นสีย้อมที่มีไอออนลบ (anionic dyes) เมื่อพีเอชเริ่มต้นเพิ่มขึ้นบริเวณพื้นที่ของประจุลบที่อยู่บนผิวหน้าของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นและปริมาณของประจุบวกลดลง ดังนั้นการดูดซับสีย้อมที่เป็นกรดจะดูดซับได้มากในสภาวะสารละลายที่เป็นกรดมากกว่าที่เป็นกลางและด่าง (Ozer *et al.* 2005a) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ozer *et al.* (2005b) ทำการศึกษาโดยใช้สาหร่ายสีเขียว *Enteromorpha prolifera* ดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 337 และแอซิดบลู 324 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2-6 พบว่าแอซิดเรด 337 และแอซิดบลู 324 มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 55.1 และ 59.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 2 และ 3 ตามลำดับ Padmesh *et al.* (2006) รายงานว่าการใช้พืชน้ำจืดขนาดใหญ่ *Azolla rongpong* ดูดซับสีย้อมแอซิด ได้แก่ แอซิดเรด 88, แอซิดกรีน 3, แอซิดออเรนจ์ 7, และแอซิดบลู 15 ที่พีเอช 2-7 พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 2.5 โดยมีค่าเท่ากับ 81.30, 83.33, 76.92 และ 76.34 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ Guezguez *et al.* (2009) รายงานว่าการใช้หญ้าทะเล *Pasidonia oceanica* ในการดูดซับสีย้อมแอซิดเฮลโล 59 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้พีเอชในสารละลายสีย้อมเริ่มต้นที่แตกต่างกันระหว่าง 2-11 พบว่า *P. oceanica* มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมประจุลบได้สูงสุดที่พีเอช 2-3 ดูดซับได้ 4.99 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ Ozer *et al.* (2006b) รายงานว่าการใช้สาหร่ายสีเขียว *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 290 และแอซิดบลู 324 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2-6 พบว่าการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 2 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 66.40 และ 46.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน

ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2) พบว่าระดับพีเอชเริ่มต้นในสารละลายที่เหมาะสมต่อ *Solieria* sp. คือที่ระดับพีเอช 5, *A. platensis*, *U. intestinalis* and *U. rigida* ที่ระดับพีเอช 7 และ สาหร่ายชนิดอื่นๆ ที่ระดับพีเอช 6 โดยที่ระดับพีเอชที่เหมาะสมนี้ *Padina* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 4.28 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) สำหรับ *Solieria* sp. และ *Chaetomorpha* sp. มีค่าการดูดซับต่ำสุดคือ 0.50 ± 0.03 และ 0.61 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่น ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่าค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายทุกชนิดสูงสุดที่พีเอชเริ่มต้นในช่วง 5-7 (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากสีย้อมมาลาไคท์กรีนซึ่งเป็นสีย้อมเบสิกเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกของสี่แก่น้ำ หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมที่แสดงประจุบวก (cationic group) เช่น แอมโมเนียมไอออน (NR_4^+) และไนโตรเนียมไอออน (NO_2^+) ซึ่งแตกตัวให้ประจุค่อนข้างกลางถึงค่าในสารละลาย (Marungrueng and Pavasant, 2007) โดยทั่วไปพบว่าที่พีเอช 3 ความเป็นประจุที่ผิวหน้าสาหร่ายกับสีย้อมชนิดเบสิกที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นกลุ่มของอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบของสี่จะมีค่าเป็นศูนย์ (zero point charge) (Kumar *et al.* 2006; Daneshvar *et al.* 2007) ที่ระดับพีเอชที่สูงกว่าระดับประจุที่เป็นศูนย์นี้ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของสาหร่ายเริ่มปรากฏของประจุลบ ซึ่งความเป็นประจุบวกของสีย้อมมาลาไคท์กรีนจึงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงกันข้ามระหว่างประจุบวกของสีย้อมและประจุลบของผิวเซลล์สาหร่าย และที่ระดับพีเอชต่ำกว่าระดับประจุที่เป็นศูนย์นี้จะทำให้ผิวเซลล์สาหร่ายเพิ่มปริมาณประจุบวกของโปรตอน (H^+) ซึ่งเป็นประจุชนิดเดียวกันกับประจุของสีย้อมมาลาไคท์กรีนจึงเกิดการผลักกันทำให้การดูดซับสีย้อมลดลง (Kumar *et al.* 2006; Daneshvar *et al.* 2007; Tsai and Chen, 2010)

จากการศึกษาลักษณะนี้พบว่ากลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ รองลงมาคือกลุ่มสาหร่ายสีเขียว กลุ่มสาหร่ายสีแดงและกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียตามลำดับ (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลมีหมู่มฟังก์ชันที่แตกตัวให้ประจุลบได้มากกว่ากว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ที่พีเอชสูงกว่า 3 และสามารถจับกับโมเลกุลของสี่เบสิกมาลาไคท์กรีนที่แตกตัวให้ประจุบวกได้ดีที่พีเอชสูงกว่า 3 เช่นกัน

ในการศึกษาอื่นๆ บางครั้งพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนมีค่าค่อนข้างสูง (พีเอช 8-10) เช่น การดูดซับสี่เบสิกมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* sp. ที่พีเอชของสารละลายสีย้อมแตกต่างกันคือ 2-11 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 9 ซึ่งมีการดูดซับเท่ากับ 2.05 มิลลิกรัมต่อ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Daneshvar *et al.* 2007) ในสาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่พีเอชของสารละลายสีย้อมแตกต่างกันคือ 2-10 พบว่าดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุดที่พีเอช 8 ซึ่งมีการดูดซับเท่ากับ 42 มิลลิกรัมต่อกรัม (Kannan *et al.*

2010) อย่างไรก็ตามในหลายการศึกษาแม้ว่าพีเอชค่อนข้างสูง (8-10) แต่พบว่าส่วนใหญ่ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกันตั้งแต่พีเอช 6 เป็นต้นไป เช่น การดูดซับสีเบสิกเมทิลีนบลู โดยสาหร่ายสีเขียว *Enteromorpha* spp. ที่พีเอชแตกต่างกัน 2-10 ในสารละลายสีข้อม พบว่าพีเอช 2 มีค่าการดูดซับต่ำที่สุด และเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วที่พีเอช 6-10 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 70.35 มิลลิกรัมต่อกรัม (Ncibi *et al.* 2009) ในการศึกษาครั้งนี้พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ในช่วง 5-7 โดยส่วนใหญ่อยู่ที่พีเอช 6 ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับสีข้อมเบสิกมาลาโคท์กรีน โดยสาหร่ายน้ำจืด *Pithophora* sp. ที่พีเอชของสารละลายแตกต่างกัน 2-7 พบว่าที่พีเอช 6 มีค่าการดูดซับสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 64.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และลดลงมาคือพีเอช 7 และ 5 ซึ่งมีค่าการดูดซับใกล้เคียงกันเท่ากับ 62.0 และ 58.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Kumar *et al.* 2006) และการศึกษาครั้งนี้ใกล้เคียงกับการดูดซับสีข้อมเบสิกมาลาโคท์กรีน โดยสาหร่ายสีเขียว *Cladophora* sp. ที่พีเอชแตกต่างกัน 1.5-8.5 พบว่าที่พีเอช 7.5 มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัม (Khataee *et al.* 2010)

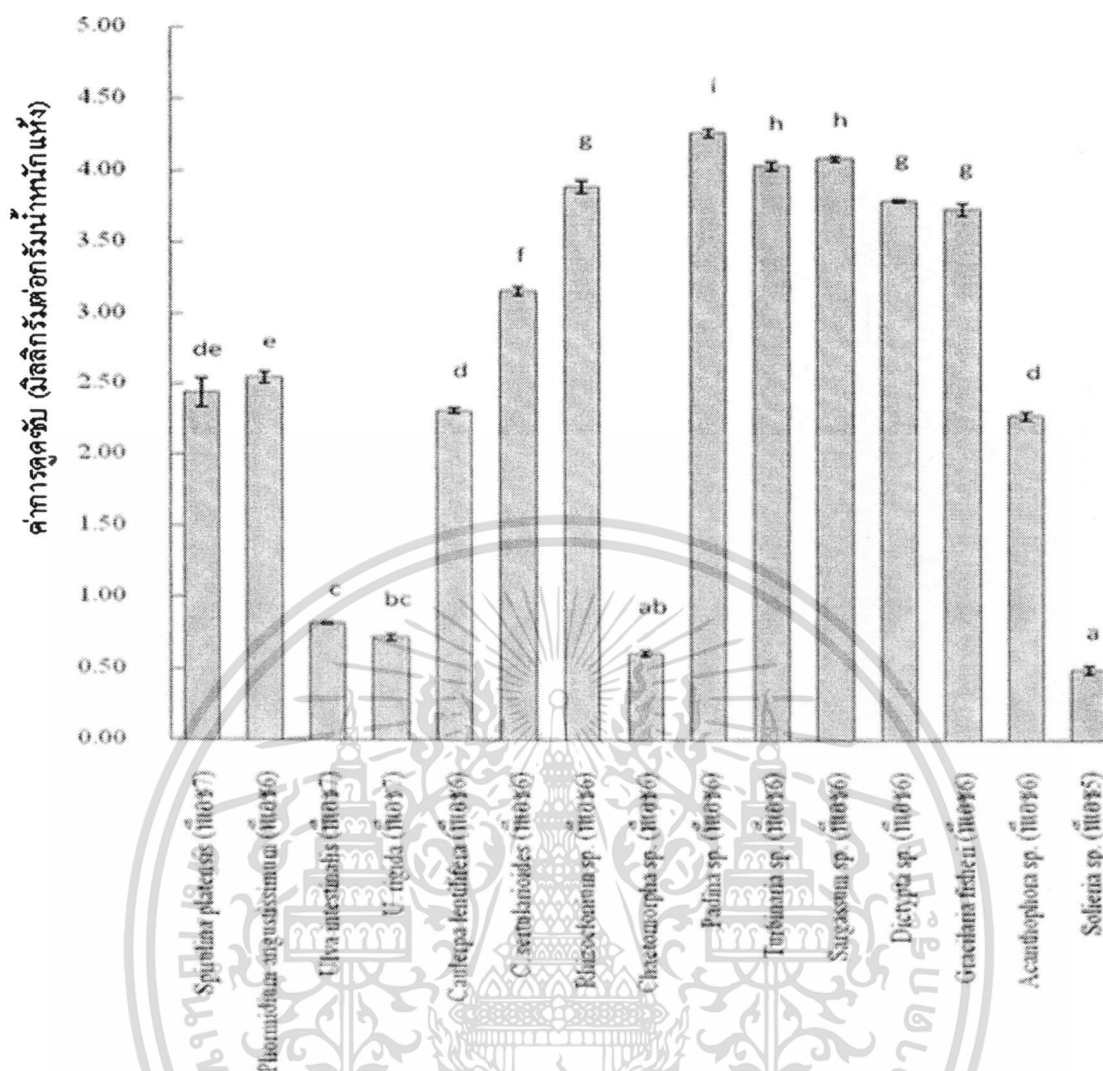


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การดูดซับสีเขียวของเบเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Algae	pH							
	2	3	4	5	6	7	8	
<i>Arthrospira platensis</i>	12.32±0.41 ^{bj}	17.94±0.24 ^{aF}	12.15±0.88 ^{bF}	9.18±0.54 ^{cF}	7.19±0.53 ^{dEF}	7.19±0.53 ^{dE}	7.19±0.53 ^{dG}	
<i>Phormidium angustissimum</i>	17.72±0.23 ^{cF}	22.95±0.15 ^{aD}	20.34±0.45 ^{bC}	16.14±0.38 ^{cC}	12.59±1.15 ^{dD}	11.15±0.29 ^{dC}	9.038±0.51 ^{eD}	
<i>Ulva intestinalis</i>	10.02±0.14 ^{ck}	13.49±0.21 ^{aG}	12.36±0.14 ^{bF}	10.14±0.20 ^{cF}	4.93±0.27 ^{eG}	6.43±0.09 ^{dEF}	5.10±0.07 ^{eH}	
<i>Ulva rigida</i>	20.27±0.23 ^{abE}	21.35±0.41 ^{aE}	18.86±1.05 ^{bcCD}	16.94±0.69 ^{cdC}	14.90±0.19 ^{deC}	13.51±0.10 ^{eB}	10.45±0.15 ^{fC}	
<i>Caulerpa lentillifera</i>	31.76±0.22 ^{ba}	33.41±0.18 ^{aA}	28.49±0.54 ^{ca}	27.30±0.33 ^{ca}	21.66±0.73 ^{da}	14.45±0.45 ^{eb}	11.38±0.29 ^{fb}	
<i>Caulerpa sertularioides</i>	31.08±0.21 ^{ab}	32.10±0.10 ^{ab}	27.49±0.62 ^{ba}	26.50±0.26 ^{ba}	21.99±0.47 ^{ca}	13.94±0.21 ^{db}	12.54±0.20 ^{ea}	
<i>Rhizoclonium sp.</i>	23.30±0.35 ^{bd}	25.41±0.14 ^{ac}	20.15±0.30 ^{cc}	16.65±0.21 ^{ec}	18.50±0.50 ^{db}	15.76±0.22 ^{ea}	8.81±0.32 ^{fd}	
<i>Chaetomorpha sp.</i>	15.76±0.20 ^{cg}	22.23±0.32 ^{ade}	16.54±0.43 ^{ce}	18.25±0.64 ^{bb}	14.55±0.40 ^{dc}	8.56±0.07 ^{ed}	7.66±0.12 ^{ee}	
<i>Padina sp.</i>	14.65±0.18 ^{ch}	21.99±0.15 ^{ade}	18.18±0.21 ^{bde}	12.92±0.24 ^{dd}	7.83±0.38 ^{ee}	7.92±0.06 ^{ed}	7.38±0.21 ^{eff}	
<i>Turbinaria sp.</i>	11.95±0.08 ^{bi}	16.63±0.30 ^{af}	11.77±0.69 ^{bF}	11.39±0.52 ^{be}	8.46±0.90 ^{ce}	6.14±0.22 ^{dEF}	7.86±0.21 ^{ce}	
<i>Sargassum sp.</i>	14.11±0.21 ^{bhi}	17.51±0.12 ^{af}	11.77±0.62 ^{cF}	11.60±0.62 ^{ce}	5.56±1.66 ^{dFG}	5.50±0.09 ^{dF}	7.63±0.13 ^{dEF}	
<i>Dictyota sp.</i>	13.79±0.19 ^{bi}	17.59±0.32 ^{af}	11.27±0.26 ^{dF}	12.51±0.25 ^{cDE}	9.03±0.31 ^{ce}	5.64±0.09 ^{ef}	7.38±0.15 ^{eff}	
<i>Gracilaria fisheri</i>	30.86±0.14 ^{bb}	33.68±0.16 ^{aA}	24.18±0.23 ^{eb}	15.94±0.32 ^{cC}	18.21±0.34 ^{db}	13.79±0.12 ^{fb}	10.22±0.45 ^{gC}	
<i>Acanthophora sp.</i>	30.18±0.18 ^{ac}	31.84±0.16 ^{ab}	23.63±1.42 ^{bb}	18.43±0.15 ^{cb}	19.38±0.08 ^{cb}	13.49±0.28 ^{db}	10.84±0.35 ^{gBC}	
<i>Solieria sp.</i>	6.34±0.09 ^{cl}	10.45±0.26 ^{ah}	6.43±0.24 ^{cg}	6.22±0.12 ^{cg}	7.72±0.48 ^{be}	6.75±0.12 ^{ce}	6.79±0.17 ^{cfG}	

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวนอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 4.2 การดูดซับสีเขียวมาลาโคทรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอชเหมาะสม (ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.1.1.3 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีเขียวเบนเนฟิแคเรด

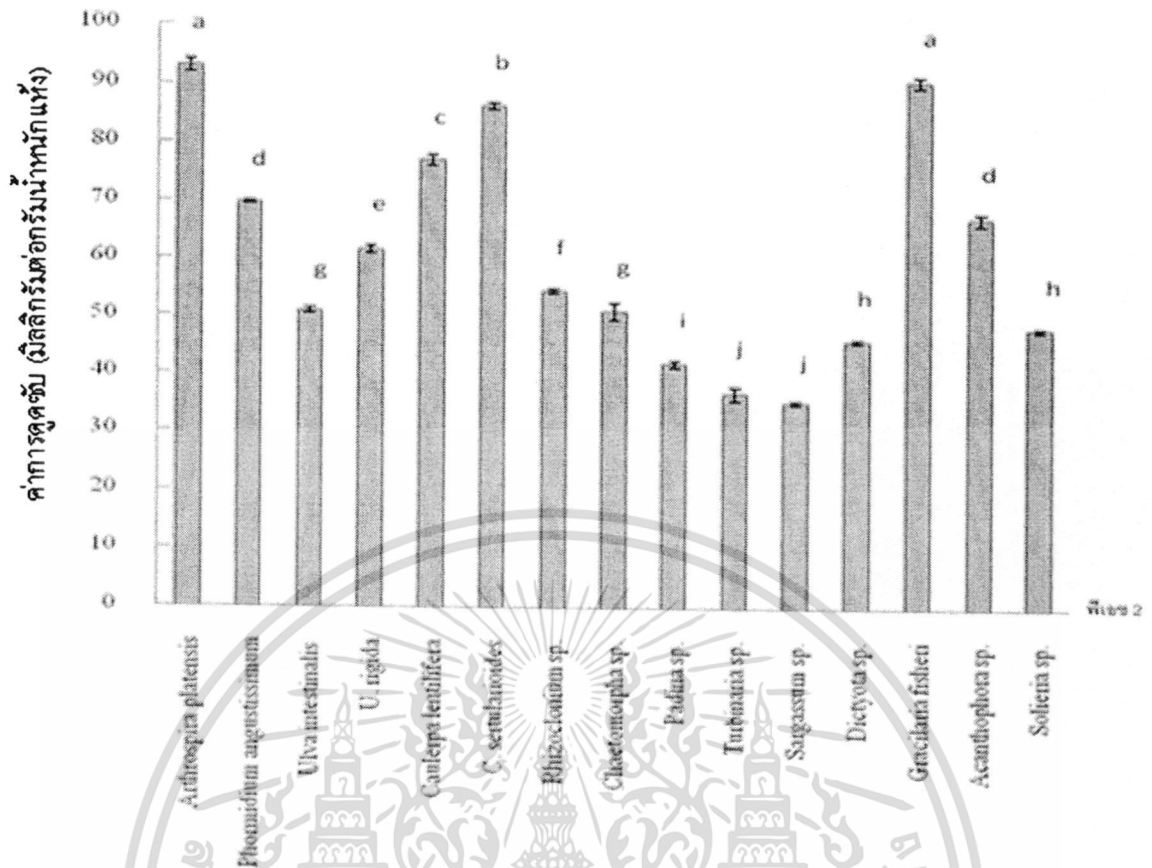
ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีเขียวเบนเนฟิแคเรด โดยสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีเขียวเบนเนฟิแคเรดในสารละลายที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 2 สูงสุด (ตารางที่ 4.3, ภาพที่ 4.3) โดย *A. platensis* มีค่าการดูดซับสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกับ *G. fisheri* โดยมีค่าการดูดซับสีเขียวเท่ากับ 93.06 ± 1.01 และ 90.96 ± 0.95 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) และ *Sargassum* sp. มีค่าการดูดซับต่ำสุดแต่ไม่แตกต่างกับ *Turbinaria* sp. โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 35.31 ± 0.34 และ 36.87 ± 1.13 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การดูดซับสีเขียวบนเบเนฟิเคเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Algae	pH						
	2	3	4	5	6	7	8
<i>Arthrospira platensis</i>	93.06±1.01 ^{aA}	59.17±0.63 ^{bA}	34.27±0.79 ^{cB}	25.90±0.20 ^{dB}	12.23±0.55 ^{eJ}	16.20±0.44 ^{fDE}	19.22±0.38 ^{eA}
<i>Phormidium angustissimum</i>	69.72±0.23 ^{aD}	48.29±0.63 ^{bDE}	35.53±0.61 ^{cCD}	27.01±0.80 ^{dGH}	16.02±0.65 ^{eEFG}	16.02±0.65 ^{fF}	16.14±0.82 ^{eD}
<i>Ulva intestinalis</i>	50.92±0.49 ^{aG}	40.57±0.91 ^{bDE}	27.76±0.41 ^{cCD}	17.87±0.63 ^{dGH}	17.05±0.36 ^{eEFG}	12.2±1.37 ^{eA}	12.62±0.25 ^{eB}
<i>Ulva rigida</i>	61.68±0.67 ^{aE}	43.07±0.57 ^{bC}	32.98±0.33 ^{cB}	20.80±0.37 ^{dDEF}	19.85±0.24 ^{eCD}	19.27±0.27 ^{eBC}	16.55±0.30 ^{fBC}
<i>Caulerpa lentillifera</i>	77.29±0.85 ^{aC}	42.31±0.50 ^{bCD}	36.41±1.06 ^{eA}	28.70±0.83 ^{dA}	25.51±0.16 ^{eA}	22.83±0.77 ^{fA}	16.58±0.13 ^{gBC}
<i>Caulerpa sertularioides</i>	86.53±0.56 ^{aB}	53.76±0.60 ^{bB}	27.20±0.67 ^{cCD}	23.73±0.54 ^{dBC}	19.37±0.26 ^{dCDE}	23.30±0.17 ^{eA}	17.40±0.39 ^{fB}
<i>Rhizoclonium sp.</i>	54.660±0.46 ^{aF}	38.83±0.22 ^{bE}	37.45±0.30 ^{bA}	22.65±64 ^{cCDE}	22.46±0.44 ^{cB}	20.67±0.17 ^{dB}	17.21±0.92 ^{eBC}
<i>Chaetomorpha sp.</i>	51.12±1.46 ^{aG}	35.01±0.44 ^{bF}	27.20±0.50 ^{cCD}	19.78±0.52 ^{deFG}	20.21±0.10 ^{dCD}	16.77±0.60 ^{fDE}	17.74±0.14 ^{efAB}
<i>Padina sp.</i>	41.91±0.52 ^{aI}	36.75±0.47 ^{bF}	23.58±0.33 ^{cE}	15.99±0.61 ^{eHI}	18.95±0.18 ^{dCDEF}	15.96±0.44 ^{eEF}	12.93±0.17 ^{fD}
<i>Turbinaria sp.</i>	36.87±1.13 ^{aJ}	27.99±0.23 ^{bG}	19.56±0.41 ^{cF}	14.37±0.95 ^{dI}	15.22±0.72 ^{dGH}	15.40±0.30 ^{eEFG}	16.58±0.76 ^{dBC}
<i>Sargassum sp.</i>	35.31±0.34 ^{aJ}	19.51±0.57 ^{bI}	18.77±0.35 ^{bF}	15.83±0.39 ^{cHI}	14.35±0.46 ^{cI}	14.21±0.22 ^{cFGH}	15.51±0.86 ^{cC}
<i>Dictyota sp.</i>	46.08±0.27 ^{aH}	39.81±0.62 ^{bE}	26.00±0.33 ^{cD}	20.52±0.26 ^{dEF}	18.85±0.27 ^{eCDEF}	18.11±0.65 ^{eCD}	18.31±0.25 ^{eAB}
<i>Gracilaria fisheri</i>	90.96±0.95 ^{aA}	19.77±0.31 ^{bI}	18.77±0.16 ^{cF}	15.55±0.66 ^{dHI}	16.78±0.21 ^{dFG}	13.51±0.47 ^{dGH}	8.53±0.49 ^{aE}
<i>Acanthophora sp.</i>	67.47±0.95 ^{aD}	35.01±1.46 ^{bF}	28.36±1.95 ^{cC}	23.13±2.17 ^{dCD}	20.56±0.87 ^{dBC}	20.24±0.11 ^{dB}	15.45±0.54 ^{eC}
<i>Solieria sp.</i>	48.25±0.30 ^{aH}	23.47±0.53 ^{bH}	23.05±0.36 ^{bE}	16.82±0.66 ^{cdHI}	17.99±0.15 ^{cDEF}	16.55±0.30 ^{dDE}	12.55±0.36 ^{fD}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 4.3 การดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรด (มีผลลิกรัมต่อลิตรน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอชเหมาะสม (พีเอช 2) (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่าค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรด โดยสาหร่ายทุกชนิดสูงสุดที่พีเอชเริ่มต้น 2 (ภาพที่ 4.3) โดยสีย้อมเบนเนฟิเคเรดเป็นประเภทสีรีแอคทีฟซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ประจุลบ (anionic group) สำหรับการศึกษาครั้งนี้จนถึงประจุเมื่อแตกตัวในการละลายซึ่งสัมพันธ์กับประจุผิวหน้าของตัวดูดซับ ดังนั้นสีย้อมเบนเนฟิเคเรดคล้ายคลึงกับสีย้อมประเภทแอซิด ดังนั้นเมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวกของโปรตอน (H^+) หรือกลุ่มประจุบวกอื่นๆ ที่บริเวณผิวเซลล์ของสาหร่ายและจับกับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีย้อมเบนเนฟิเคเรดได้ดี ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้สาหร่ายเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำเช่นเดียวกับสีย้อมประเภทแอซิด ซึ่งสีย้อมประจุลบในสภาวะที่เป็นค่าความสามารถในการดูดซับของสาหร่ายจึงลดลง เนื่องจากที่สภาวะเป็นค่าประจุบวกที่ผิวหน้าของสาหร่ายมีปริมาณลดลง ประจุลบของสีย้อมจึงไม่สามารถจับกับผิวหน้าของสาหร่ายได้ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Mahmoud, 2008) การศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับจากการทดลองการสาหร่ายสีเขียว

Spirogyra sp. นำมาดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟไซนาซอล ที่มีพีเอชในสารละลายแตกต่างกัน 1-4 พบว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

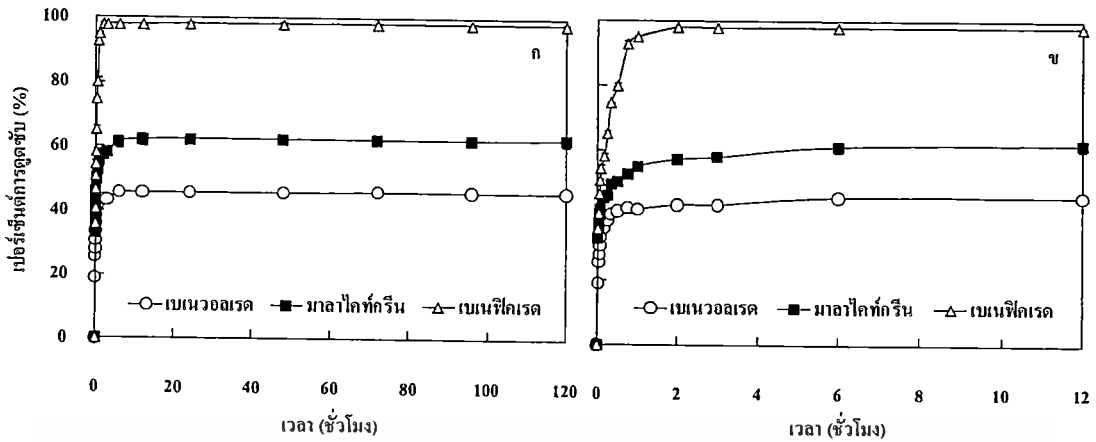
ที่พีเอช 3 มีค่าการดูดซับสูงสุดซึ่งเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าที่พีเอช 6-8 มีค่าการดูดซับน้อยมาก (ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) (Khalaf. 2008) การใช้สำหรับยีสี่เขียว *Cholorella vulgaris* ดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ ได้แก่ รีมาซอลแบลคบี (Remazol Black B, RB) รีมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol Red RR, RR) และรีมาซอลโกลเดนที่เยลโล (Remazol Golden Yellow RNL, RGY) ที่ระดับพีเอชในสารละลาย 1-3 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า *Cholorella vulgaris* ดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทุกชนิดได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 55.2, 55.3 และ 35.0 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Aksu and Tezer. 2005) และการใช้สำหรับยีสี่เขียว *Scenedesmus quadricauda* ดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟรีมาซอลบิลเลียนบลูอาร์ (Remazol Brilliant Blue R) ที่ระดับพีเอชในสารละลาย 2-8 ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 2 มีค่าเท่ากับ 45.7 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (Ergene *et al.* 2009)

นอกจากนี้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมนั้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับ อย่างไรก็ตามก็พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันจะมีความสามารถและมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพบว่าการศึกษารังนี้กลุ่มสาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับสีย้อมเอซิดและรีแอกทีฟได้ดี ยกเว้นสาหร่ายบางชนิด (*Solieria* sp.) ที่มีค่าการดูดซับต่ำ และกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลสามารถดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดี

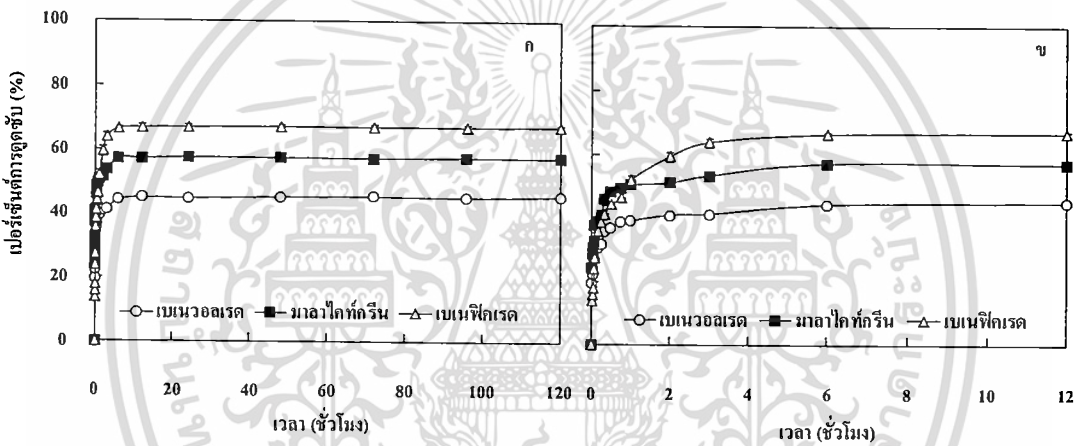
4.1.2 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสีย้อม

ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายที่มีระดับพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม (ผลของพีเอชจากข้อ 4.1.1) พบว่าไซยาโนแบคทีเรีย *A. platensis* ดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเพ็คเรด (ภาพที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15, 15 และ 30 นาทีแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30, 30 นาที และ 1 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 2 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 22.00 ± 0.44 , 2.73 ± 0.08 และ 90.27 ± 0.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ไซยาโนแบคทีเรีย *P. angustissimum* ดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเพ็คเรด (ภาพที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 20, 15 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 1, 2 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 21.32 ± 0.31 , 2.55 ± 0.05 และ 61.26 ± 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Arthrospira platensis* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Phormidium angustissimum* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

สำหรับสีเขียว *U. intestinalis* ดูดซับสีเขียวเบเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด (ภาพที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30, 15 นาที และ 20 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30, 20 นาที และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสีเขียวได้ 16.31 ± 0.17 , 1.09 ± 0.05 และ 44.45 ± 0.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับสีเขียว *U. rigida* ดูดซับสีเขียวเบเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด (ภาพที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30, 45 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 1, 2 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีเขียวได้ 21.60 ± 0.06 , 0.83 ± 0.01 และ 53.42 ± 0.38 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับสีเขียว *C. lentillifera* ดูดซับสีเขียวเบเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด (ภาพที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมง, 30 นาที และ 1 ชั่วโมง

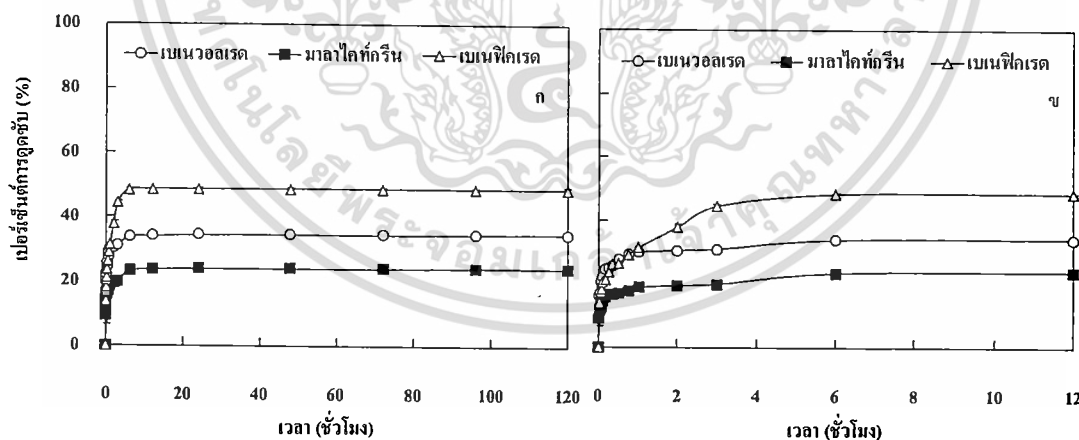
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 2, 1 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 34.23 ± 0.87 , 2.56 ± 0.03 และ 71.34 ± 1.20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

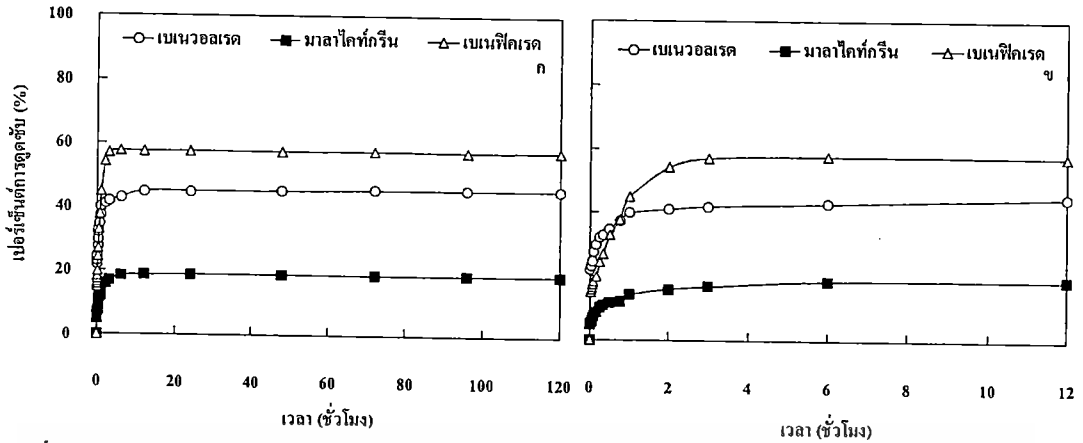
สาหร่ายสีเขียว *C. sertularioides* ดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเฟิคเรด (ภาพที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมง, 20 นาที และ 2 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมง, 30 นาที และ 3 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 36.37 ± 0.09 , 3.16 ± 0.02 และ 81.10 ± 0.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาหร่ายสีเขียว *Rhizoclonium* sp. ดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเฟิคเรด (ภาพที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15, 45 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30 นาที, 1 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 29.15 ± 0.69 , 3.93 ± 0.03 และ 42.56 ± 1.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

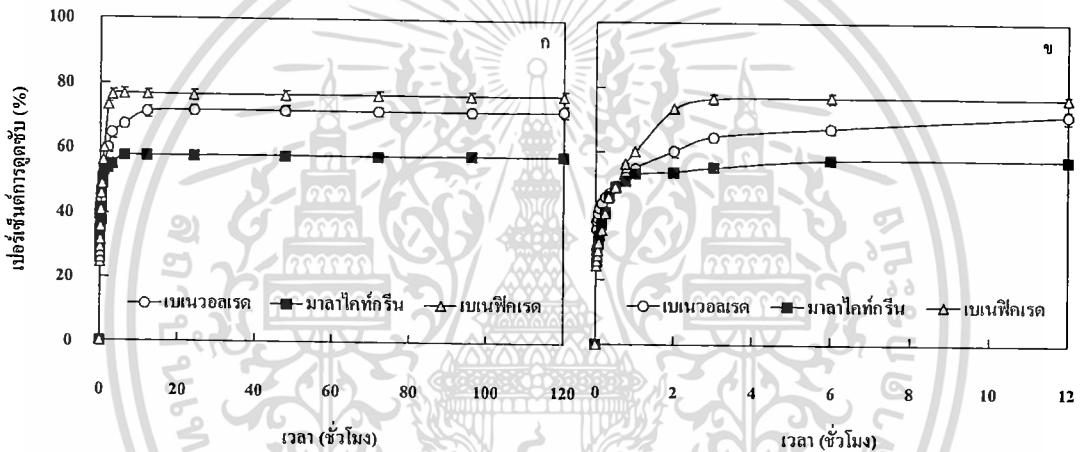
สาหร่ายสีเขียว *Chaetomorpha* sp. ดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเฟิคเรด (ภาพที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 20, 20 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30 นาที, 30 นาที และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 23.63 ± 0.25 , 0.70 ± 0.02 และ 43.22 ± 0.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



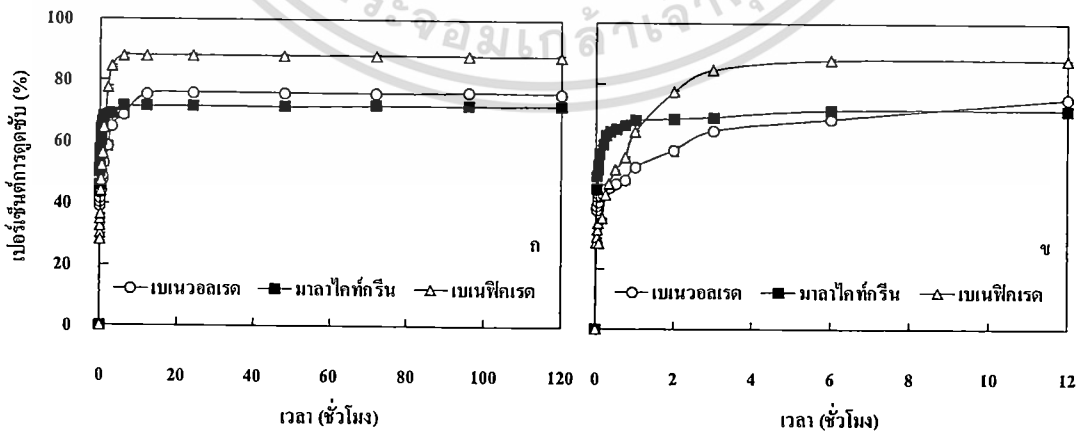
ภาพที่ 4.6 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ *Ulva intestinalis* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีย้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Ulva rigida* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

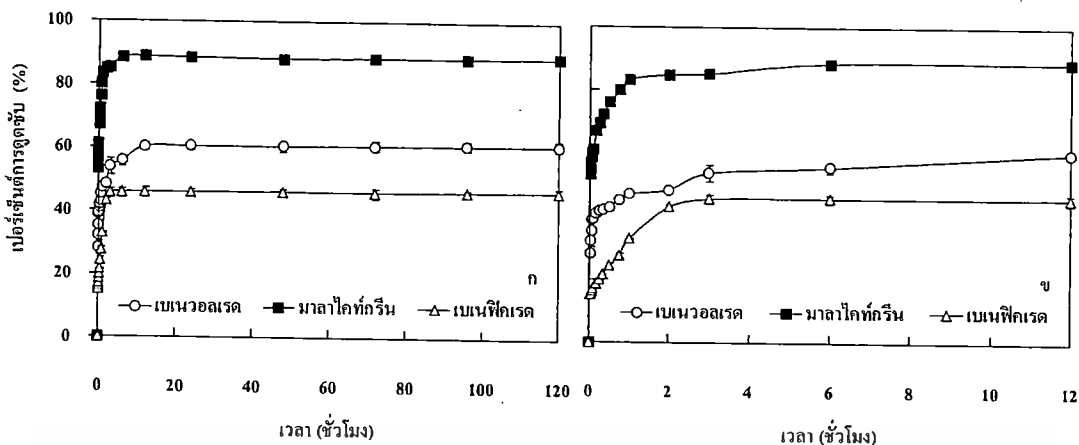


ภาพที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Caulerpa lentillifera* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

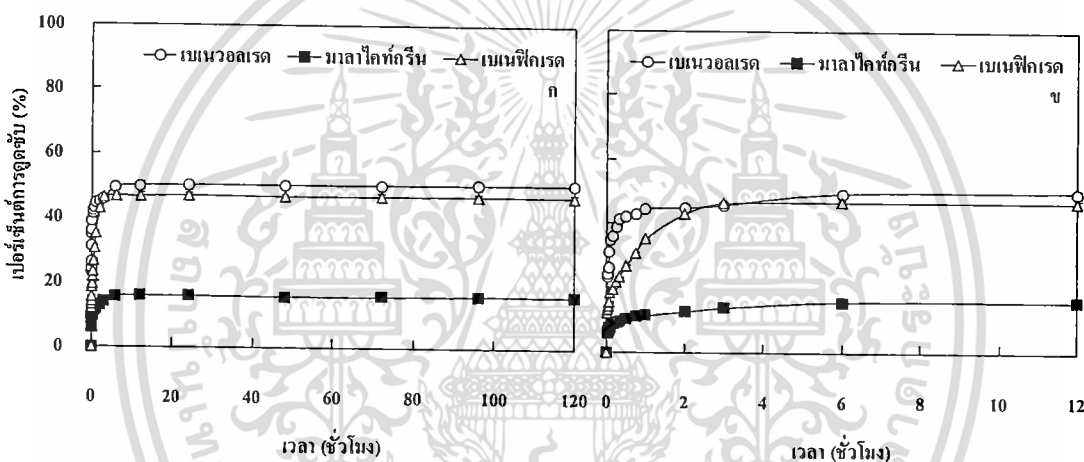


ภาพที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Caulerpa sertularioides* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ *Rhizoclonium* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีย้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



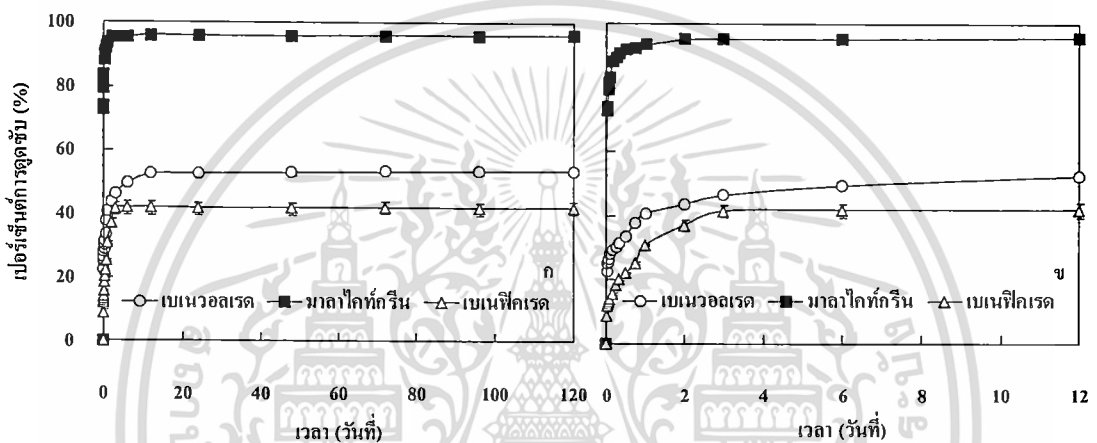
ภาพที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ *Chaetomorpha* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีย้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp. ดูดซับสีย้อมเบนโวลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเฟนิเกรด (ภาพที่ 4.12 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมง, 15 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมง, 20 นาที และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 2 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 25.19 ± 0.36 , 4.24 ± 0.03 และ 38.08 ± 1.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

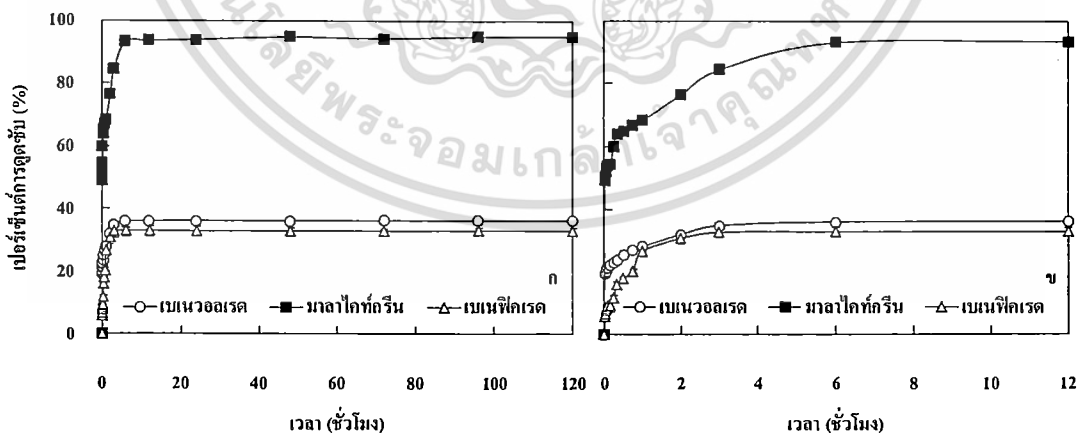
สาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria* sp. ดูดซับสีย้อมเบนโวลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเฟนิเกรด (ภาพที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1, 1 และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 2, 3 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 17.25 ± 0.13 , 4.15 ± 0.03 และ 30.11 ± 1.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาหร่ายสีน้ำตาล *Sargassum* sp. คูดซบสีข้อมเบเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบเนฟิเกรด (ภาพที่ 4.14 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาที, 1 และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มซาลงหลังจากผ่านไป 45 นาที, 2 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 3 และ 3 โดยสามารถคูดซบสีข้อมได้ 21.71 ± 0.24 , 4.07 ± 0.03 และ 29.53 ± 1.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

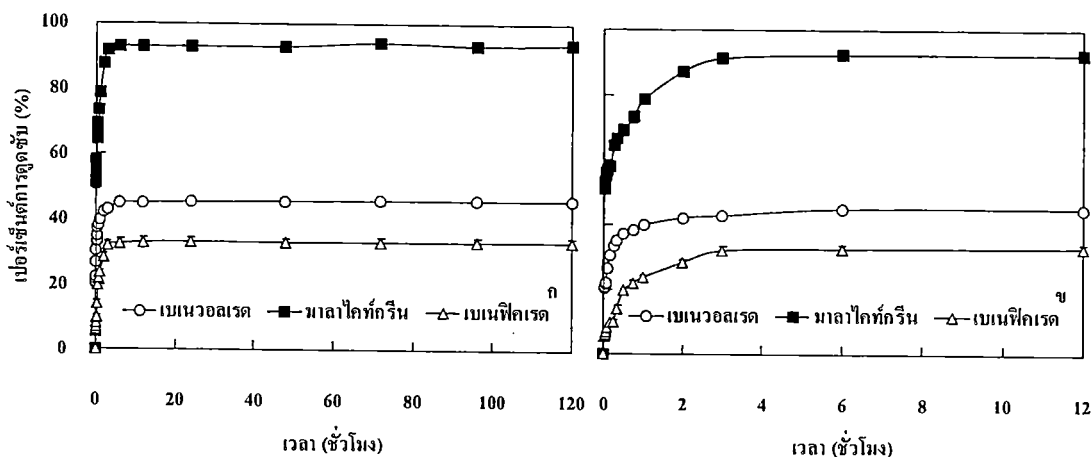
สาหร่ายสีน้ำตาล *Dictyota* sp. คูดซบสีข้อมเบเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบเนฟิเกรด (ภาพที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาที, 1 และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มซาลงหลังจากผ่านไป 45 นาที, 2 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถคูดซบสีข้อมได้ 21.51 ± 0.18 , 3.86 ± 0.07 และ 39.51 ± 0.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



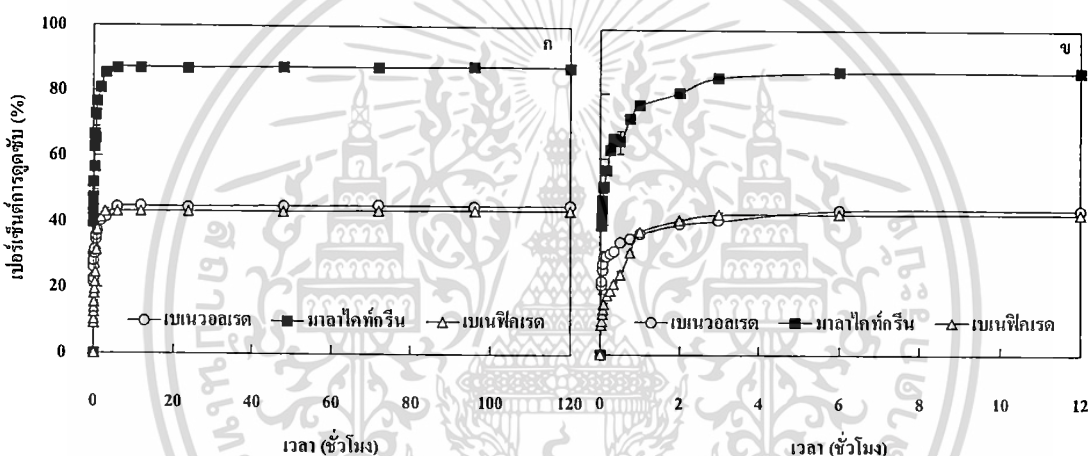
ภาพที่ 4.12 เปอร์เซนต์การคูดซบสีข้อมของ *Padina* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมพัทธ์สารละลายสีข้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการคูดซบเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.13 เปอร์เซนต์การคูดซบสีข้อมของ *Turbinaria* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมพัทธ์สารละลายสีข้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ระยะเวลาในการสัมพัทธ์สารละลายสีข้อมสู่จุดสมดุล



ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Sargassum* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



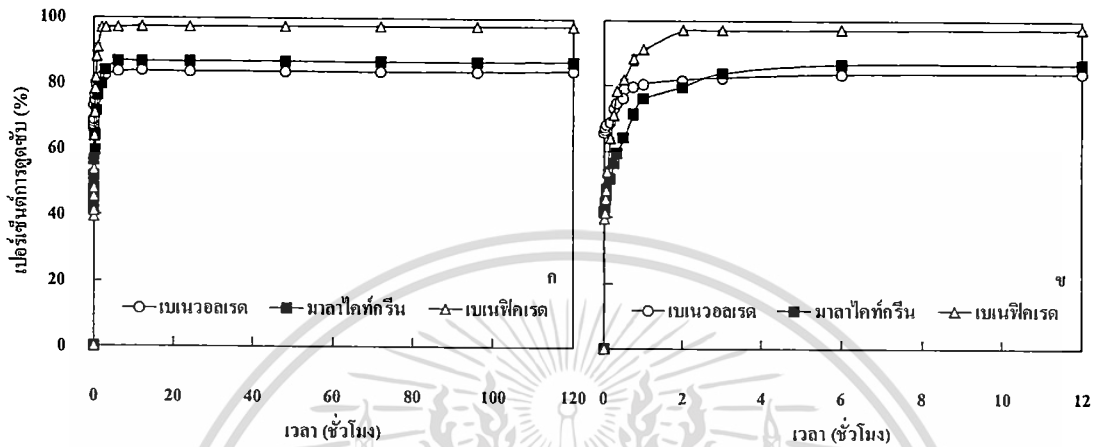
ภาพที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของ *Dicyyota* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

สาหร่ายสีแดง *G. fisheri* ดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรด, มาลาโคทกรีนิ และเบนเนฟิเคเรด (ภาพที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1, 1 และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 2, 2 และ 1 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 2 โดยสามารถดูดซับสีเขียวได้ 40.31 ± 0.42 , 3.85 ± 0.07 และ 90.49 ± 0.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

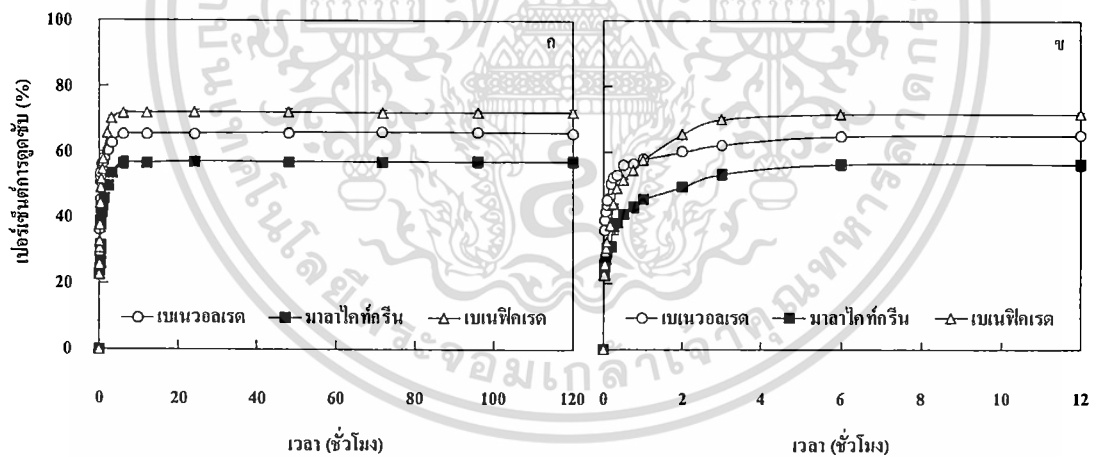
สาหร่ายสีแดง *Acanthophora* sp. ดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรด, มาลาโคทกรีนิ และเบนเนฟิเคเรด (ภาพที่ 4.17 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาที, 1 และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 1, 2 และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสีเขียวได้ 67.02 ± 1.03 , 2.52 ± 0.11 และ 31.52 ± 0.44 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสาหร่ายสีเขียวแกมมา *Solieria* sp. คุณค่าสารอาหารของเบเนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบเนฟิโครด (ภาพที่ 4.18 และ ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15, 15 นาที และ 1 ชั่วโมงแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30, 30 นาที และ 2 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 15.35 ± 0.24 , 0.71 ± 0.09 และ 44.06 ± 0.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

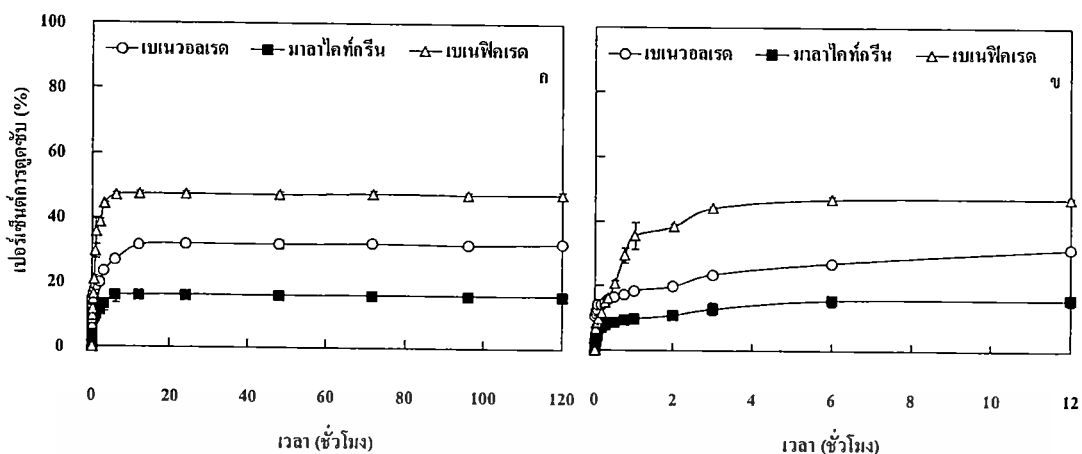


ภาพที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ *Gracilaria fisheri* (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีย้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมของ *Acanthophora* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีย้อม 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซับเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 เปอร์เซนต์การดูดซึบสีเขียวของ *Soliera* sp. (ก) ระยะเวลาในการสัมผัสสารละลายสีเขียว 120 ชั่วโมง และ (ข) ภาพขยายแสดงค่าการดูดซึบเฉพาะช่วงต้น 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซึบสีเขียวเบเนวอลเรดที่จุดสมดุลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมดุล (ชั่วโมง)	ค่าการดูดซึบ (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึบ
<i>Arthrospira platensis</i>	6	22.00±0.44 ^h	45.63±0.74 ^h
<i>Phormidium angustissimum</i>	6	21.32±0.31 ^h	44.21±0.54 ^h
<i>Ulva intestinalis</i>	6	16.31±0.17 ^j	33.82±0.59 ⁱ
<i>Ulva rigida</i>	12	21.60±0.06 ^h	45.09±0.23 ^h
<i>Caulerpa lentilifera</i>	12	34.23±0.87 ^c	71.46±1.78 ^c
<i>Caulerpa sertularioides</i>	12	36.37±0.09 ^b	75.43±0.55 ^b
<i>Rhizoclonium</i> sp.	12	29.15±0.69 ^e	60.44±1.25 ^e
<i>Chaetomorpha</i> sp.	6	23.63±0.25 ^g	49.33±1.06 ^g
<i>Padina</i> sp.	12	25.19±0.36 ^f	52.60±0.74 ^f
<i>Turbinaria</i> sp.	6	17.25±0.13 ⁱ	36.02±0.55 ⁱ
<i>Sargassum</i> sp.	6	21.71±0.24 ^h	44.93±0.54 ^h
<i>Dictyota</i> sp.	6	21.51±0.18 ^h	44.53±0.33 ^h
<i>Gracilaria fisheri</i>	6	40.31±0.42 ^a	83.43±0.23 ^a
<i>Acanthophora</i> sp.	6	31.52±0.44 ^d	65.25±0.93 ^d
<i>Soliera</i> sp.	12	15.35±0.24 ^j	31.77±0.37 ^j

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ แต่จะไม่ให้ค่าศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง ทำให้ตัวถูกละลายเกิดการดูดซับและการคายการดูดซับไปพร้อมๆ กัน จนกระทั่งอัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเรียกว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ (Adamson. 1990)

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมาลาโคทีกรีนที่จุดสมดุลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมดุล (ชั่วโมง)	ค่าการดูดซับ (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ
<i>Arthrospira platensis</i>	6	2.73±0.08 ^f	61.39±1.85 ^h
<i>Phormidium angustissimum</i>	6	2.55±0.05 ^g	57.35±1.05 ^h
<i>Ulva intestinalis</i>	6	1.09±0.05 ^h	23.30±1.07 ^{ij}
<i>Ulva rigida</i>	6	0.83±0.01 ⁱ	18.67±0.17 ^h
<i>Caulerpa lentilifera</i>	6	2.56±0.03 ^g	57.58±0.77 ^c
<i>Caulerpa sertularioides</i>	6	3.16±0.02 ^e	71.54±0.61 ^b
<i>Rhizoclonium</i> sp.	6	3.93±0.03 ^{cd}	88.59±0.55 ^c
<i>Chaetomorpha</i> sp.	6	0.70±0.02 ⁱ	15.89±0.34 ^g
<i>Padina</i> sp.	2	4.24±0.03 ^a	95.30±0.32 ^f
<i>Turbinaria</i> sp.	6	4.15±0.03 ^{ab}	93.29±0.14 ^h
<i>Sargassum</i> sp.	3	4.07±0.03 ^{bc}	91.67±0.28 ⁱ
<i>Dictyota</i> sp.	6	3.86±0.07 ^d	86.94±0.87 ^h
<i>Gracilaria fisheri</i>	6	3.85±0.07 ^d	86.67±1.11 ^a
<i>Acanthophora</i> sp.	6	2.52±0.11 ^g	56.70±1.91 ^d
<i>Soliera</i> sp.	6	0.71±0.09 ⁱ	15.88±1.78 ^j

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะของผิวสาหร่ายแต่ละชนิดและสีเขียวของแต่ละประเภท จากการทดลองนี้พบว่า การดูดซับสู่จุดสมมูลส่วนใหญ่สาหร่ายที่ดูดซับสีเขียว เบเนฟิครีดเข้าสู่จุดสมมูลได้รวดเร็วกว่ามาลาไคท์กรีน และเบเนวอลเรด ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6) ส่วนปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดสาหร่ายและประเภทสีเขียว

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับสีเขียวเบเนฟิครีดที่จุดสมมูลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมมูล (ชั่วโมง)	ค่าการดูดซับ (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ
<i>Arthrospira platensis</i>	2	90.27±0.45 ^a	97.95±0.42 ^c
<i>Phormidium angustissimum</i>	6	61.26±0.61 ^c	66.48±0.75 ^f
<i>Ulva intestinalis</i>	6	44.45±0.51 ^g	48.23±0.61 ^g
<i>Ulva rigida</i>	3	53.42±0.38 ^f	57.35±0.55 ^h
<i>Caulerpa lentilifera</i>	3	71.34±1.20 ^c	76.58±1.48 ^f
<i>Caulerpa sertularioides</i>	6	81.10±0.73 ^b	87.99±0.69 ^d
<i>Rhizoclonium</i> sp.	3	42.56±1.24 ^g	45.68±1.30 ^c
<i>Chaetomorpha</i> sp.	3	43.22±0.78 ^g	46.39±0.89 ^h
<i>Padina</i> sp.	3	38.08±1.75 ^h	41.57±1.81 ^a
<i>Turbinaria</i> sp.	3	30.11±1.60 ⁱ	32.87±1.63 ^{ab}
<i>Sargassum</i> sp.	3	29.53±1.47 ⁱ	32.23±1.49 ^b
<i>Dictyota</i> sp.	3	39.51±0.65 ^h	43.14±0.70 ^c
<i>Gracilaria fisheri</i>	2	90.49±0.47 ^a	96.96±0.31 ^c
<i>Acanthophora</i> sp.	6	67.02±1.03 ^d	71.80±0.91 ^f
<i>Soliera</i> sp.	6	44.06±0.99 ^g	47.20±0.87 ^h

อักษรภาษาอังกฤษ ในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาสถานะสมมูลในการดูดซับข้างต้น พบว่าการดูดซับสีเขียวเบเนวอลเรดโดยสาหร่ายสีเขียวเข้าสู่จุดสมมูลช้ากว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ในขณะที่กลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย สาหร่ายสีแดง และสาหร่ายสีน้ำตาล มีจุดสมมูลที่เร็วกว่า (ตารางที่ 4.4)

ในการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน พบว่าสาหร่ายทุกกลุ่มมีจุดสมมูลที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.5) ยกเว้นในกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลบางชนิดมีจุดสมมูลค่อนข้างรวดเร็วกว่า

ในการดูดซับสีเขียวเบเนฟิครีด พบว่าสาหร่ายทุกกลุ่มมีจุดสมมูลที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.6) โดยปกติแล้วสาหร่ายที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพมีลักษณะเซลล์ ประเภทเซลล์ที่

เอกลีกรีนเป็นเฮลิโอสโตรฟีคที่มีประสิทธิภาพในการจับไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไนเตรต ไม่อยู่ในรูปแอมโมเนียมไนเตรดในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนที่แตกต่างกันหลักๆ ตามกลุ่มของสาหร่ายจึงทำให้ตำแหน่งยึดจับหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประเภทแตกต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้น แม้ตำแหน่งยึดจับจะเป็นหมู่ฟังก์ชันประเภทเดียวกันก็ยังสามารถมีกลไกการจับที่แตกต่างกัน และยังขึ้นอยู่กับโมเลกุลของสีย้อมในการยึดจับกับหมู่ฟังก์ชันของผิวหน้าสาหร่ายในการจับกันอย่างรวดเร็วหรือช้ามากน้อยเพียงใดด้วย ซึ่งในการจับกันนี้ต้องอาศัยแรงและปฏิกิริยาทางเคมีหลายอย่างประกอบกัน ดังนั้นสีย้อมที่แตกต่างกันย่อมมีโครงสร้างของโมเลกุลที่จำเพาะแตกต่างกันด้วย ประกอบกับการจับหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้เวลาที่จุดสมมูลในการดูดซับต่างกันด้วย ในการศึกษาครั้งนี้เวลาที่จุดสมมูลในการดูดซับมีความแตกต่างกันตามชนิดของกลุ่มสาหร่ายแล้วและยังแตกต่างที่ประเภทของสีย้อมด้วย ดังนั้นในหลายๆ การศึกษาจึงต้องหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมของตัวดูดซับกับสีนั้นๆ เสมอก่อนทำการทดลองปัจจัยอื่นๆ

ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมมูลของตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีย้อมต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.7 และผลของระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมมูลนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ต่อไป

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลของตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ในการดูดซับสีย้อม

สีย้อม	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาที่จุดสมดุล	เอกสารอ้างอิง
สีย้อมแอซิด				
แอซิดเยลโล 59 (acid yellow 59)	พีชน้ำ <i>Pasidonia ocaenica</i>	100	24 ชั่วโมง	Guezguez <i>et al.</i> (2009)
แอซิดออเรนจ์ 7 (acid orange 7)	พีชน้ำ <i>Azolla rongpong</i>	100	9 ชั่วโมง	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
แอซิดเรด 88 (acid red 88)	พีชน้ำ <i>Azolla rongpong</i>	100	9 ชั่วโมง	Padmesh <i>et al.</i> (2006)
แอซิดบลู 290 (acid blue 290)	สาหร่ายสีเขียว <i>Spirogira rhizopus</i>	100	60 นาที	Ozer <i>et al.</i> (2006b)
สีย้อมเบสิก				
เมทิลีนบลู (Methylene blue)	สาหร่ายสีเขียว <i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>cylindracea</i>	100	90 นาที	Cengiz and Cavas. (2008)
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	สาหร่ายสีเขียว <i>Cosmarium</i>	10	8 ชั่วโมง	Daneshvar <i>et al.</i> (2007)
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella</i>	1000	60 นาที	Tsai and Chen. (2010)
สีย้อมรีแอคทีฟ				
รีมาซอลแบลคบี (Remazol black B)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella vulgaris</i>	200	6 ชั่วโมง	Aksu and Tezer. (2005)
รีมาซอลโกลเดนที่เยลโล (Remazol golden yellow RNL)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorellavulgaris</i>	200	7 ชั่วโมง	Aksu and Tezer. (2005)
รีมาซอลบิลเลียนบลูอาร์ (Remazol brilliant blue R)	สาหร่ายสีเขียว <i>Scenedesmus quadricauda</i>	150	300 นาที	Ergene <i>et al.</i> (2009)
รีแอคทีฟเรด 120 (Reactive red 120)	สาหร่ายสีเขียว <i>Spirogyra majuscul</i>	100	3 ชั่วโมง	Celekli <i>et al.</i> (2009)

4.1.3 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อม

ไอโซเทอร์มการดูดซับจากสมการของ Langmuir และ Freundlich เป็นค่าที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับสีย้อมและประเมินประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมของสาหร่าย ดังนั้นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคือต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับและต้องทำภายใต้อุณหภูมิคงที่ ผลจากข้อ 4.1.2

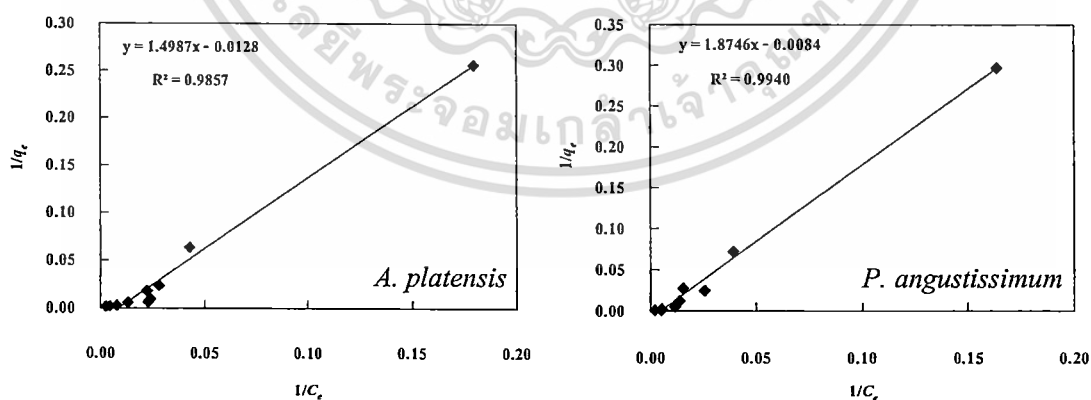
4.1.3.1 ประสิทธิภาพสูงสุดของสาหร่ายในการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนวอลเรดของ *G. fisheri* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ที่คำนวณได้เท่ากับ 484.13 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.8) และพบว่าการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรดของ *A. platensis*, *P. angustissimum*, *U. intestinalis*, *U. rigida*, *C. lentillifera*, *C. sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., *Dictyota* sp. และ *Solieria* sp. มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Freundlich (ภาพที่ 4.19) และ *G. fisheri* และ *Acanthophora* sp. มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir (ภาพที่ 4.20)

ตารางที่ 4.8 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด

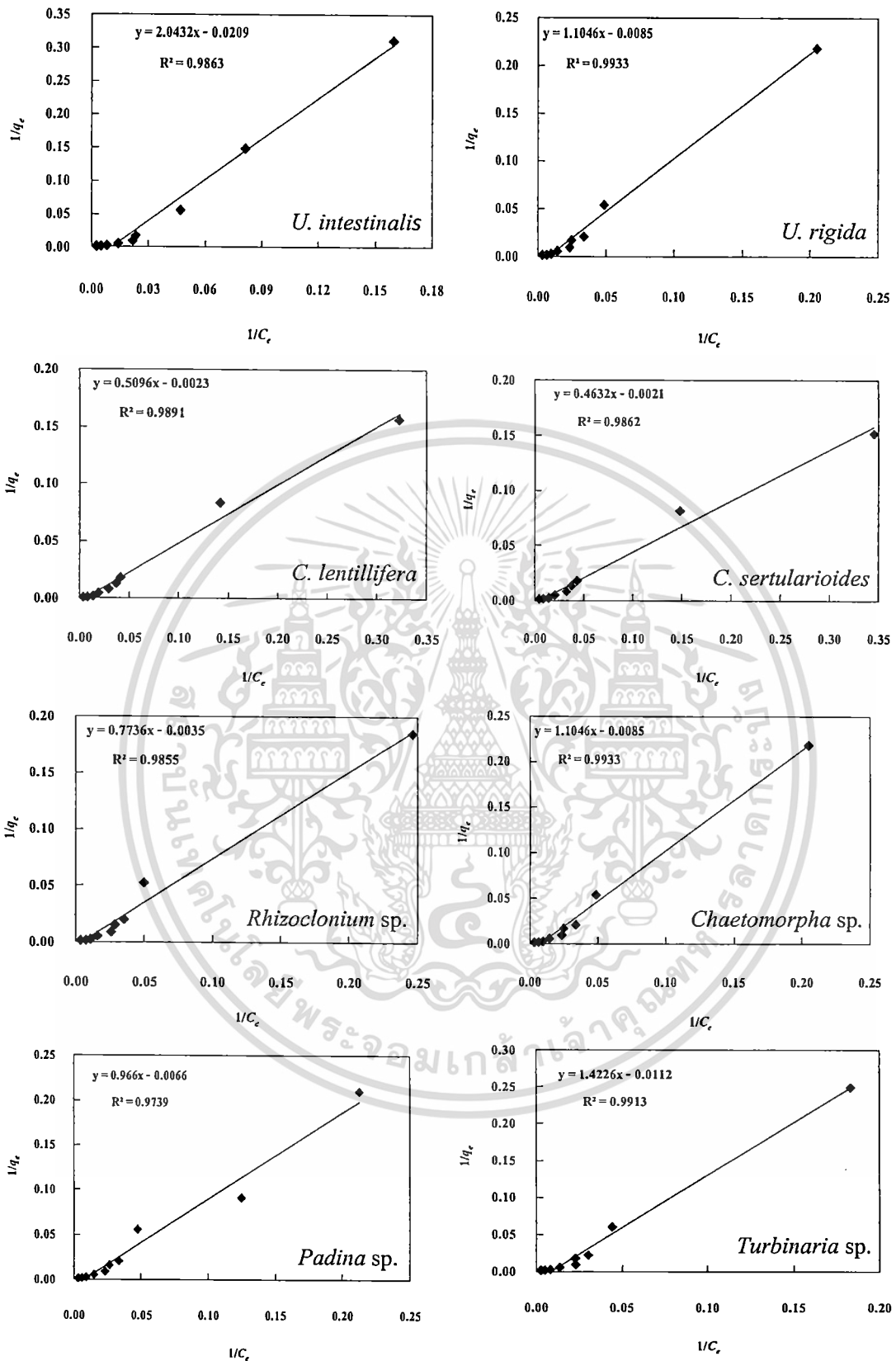
สาหร่าย	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir			ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich		
	Q_{max} (มิลลิกรัม ต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	K_d (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	r^2	K_F (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	n	r^2
<i>A. platensis</i>	78.39±1.61 ^{fg}	0.0085±0.0001	0.985	2.89±0.12	0.744±0.005	0.941
<i>P. angustissimum</i>	119.14±5.82 ^{de}	0.0045±0.0001	0.994	4.22±0.19	0.749±0.006	0.934
<i>U. intestinalis</i>	55.09±5.60 ^{fg}	0.0088±0.0006	0.985	4.21±0.24	0.685±0.006	0.948
<i>U. rigida</i>	117.98±5.17 ^{de}	0.0077±0.0002	0.993	1.48±0.01	0.782±0.001	0.960
<i>C. lentillifera</i>	440.12±14.07 ^b	0.0045±0.0002	0.988	1.37±0.04	0.833±0.008	0.953
<i>C. sertularioides</i>	479.92±33.76 ^a	0.0045±0.0001	0.986	1.29±0.08	0.795±0.011	0.962
<i>Rhizoclonium</i> sp.	281.51±12.72 ^c	0.0049±0.0001	0.987	1.40±0.05	0.867±0.006	0.961
<i>Chaetomorpha</i> sp.	147.76±15.73 ^d	0.0069±0.0004	0.992	1.40±0.05	0.783±0.005	0.954
<i>Padina</i> sp.	152.88±11.97 ^d	0.0068±0.0003	0.973	1.44±0.02	0.795±0.003	0.962
<i>Turbinaria</i> sp.	91.27±10.00 ^{ef}	0.0078±0.0005	0.991	1.87±0.06	0.776±0.001	0.956
<i>Sargassum</i> sp.	81.50±2.80 ^{efg}	0.0077±0.0001	0.991	1.75±0.03	0.794±0.002	0.924
<i>Dictyota</i> sp.	60.00±4.60 ^{fg}	0.0099±0.0003	0.985	1.86±0.05	0.794±0.002	0.952
<i>G. fisheri</i>	483.46±9.53 ^a	0.0067±0.0003	0.924	1.97±0.13	0.825±0.012	0.946
<i>Acanthophora</i> sp.	434.52±9.04 ^b	0.0061±0.0001	0.922	1.54±0.04	0.844±0.005	0.929
<i>Solieria</i> sp.	48.28±1.63 ^g	0.0051±0.0001	0.986	14.53±0.28	0.663±0.002	0.892

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



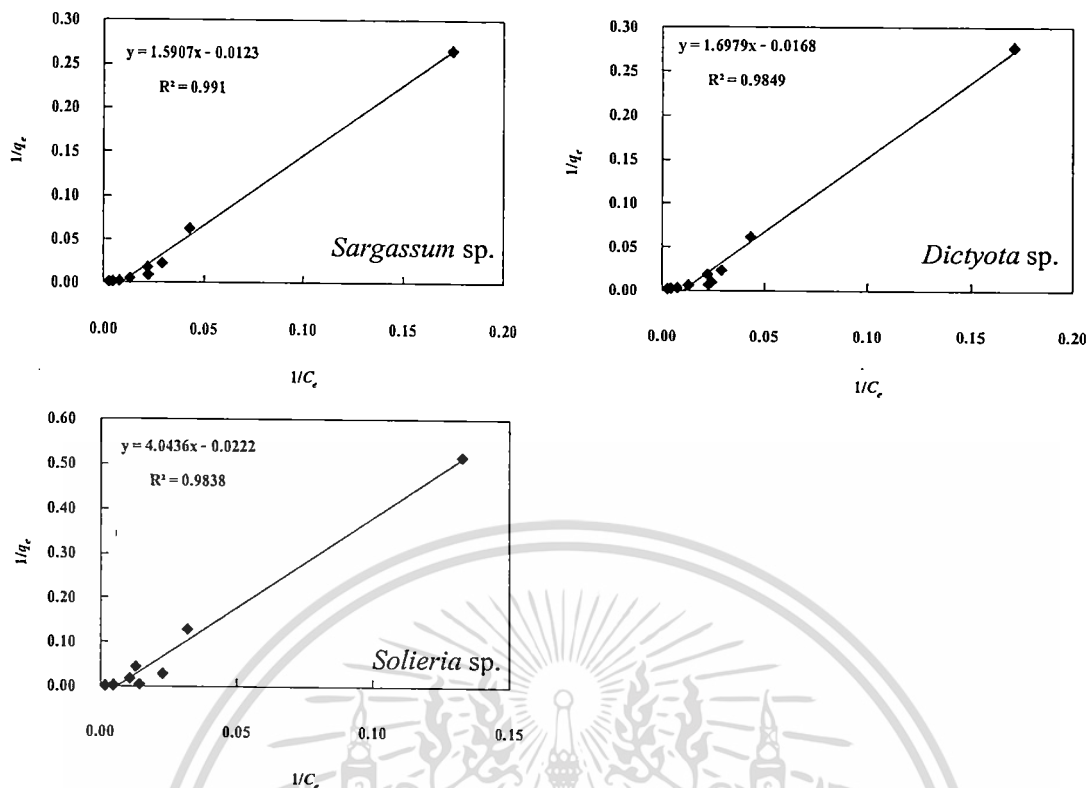
ภาพที่ 4.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

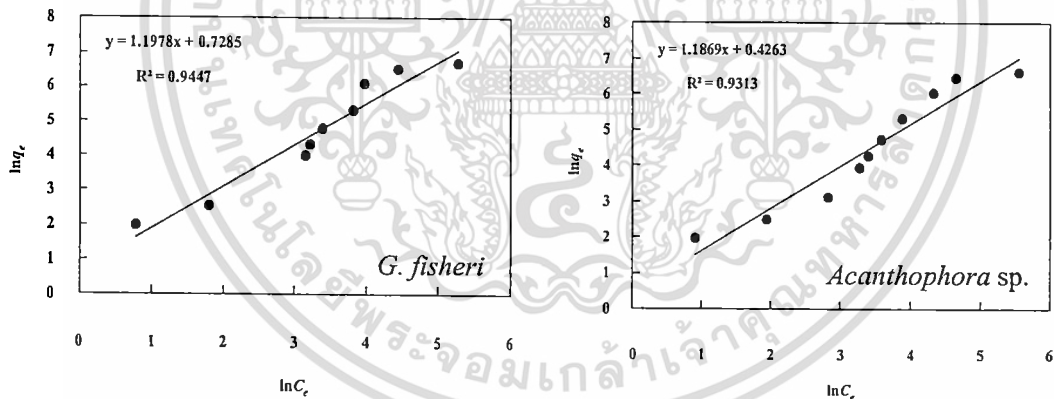


ภาพที่ 4.19 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 (ต่อ)



ภาพที่ 4.20 ไอโซเทอร์มของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

4.1.3.2 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย

การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนของ *Padina* sp. จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ที่คำนวณได้เท่ากับ 484.13 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.9) และพบว่า การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนของ *A. platensis*, *P. angustissimum*, *U. rigida*, *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., *Acanthophora* sp. และ *Solieria* sp. มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นเอกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

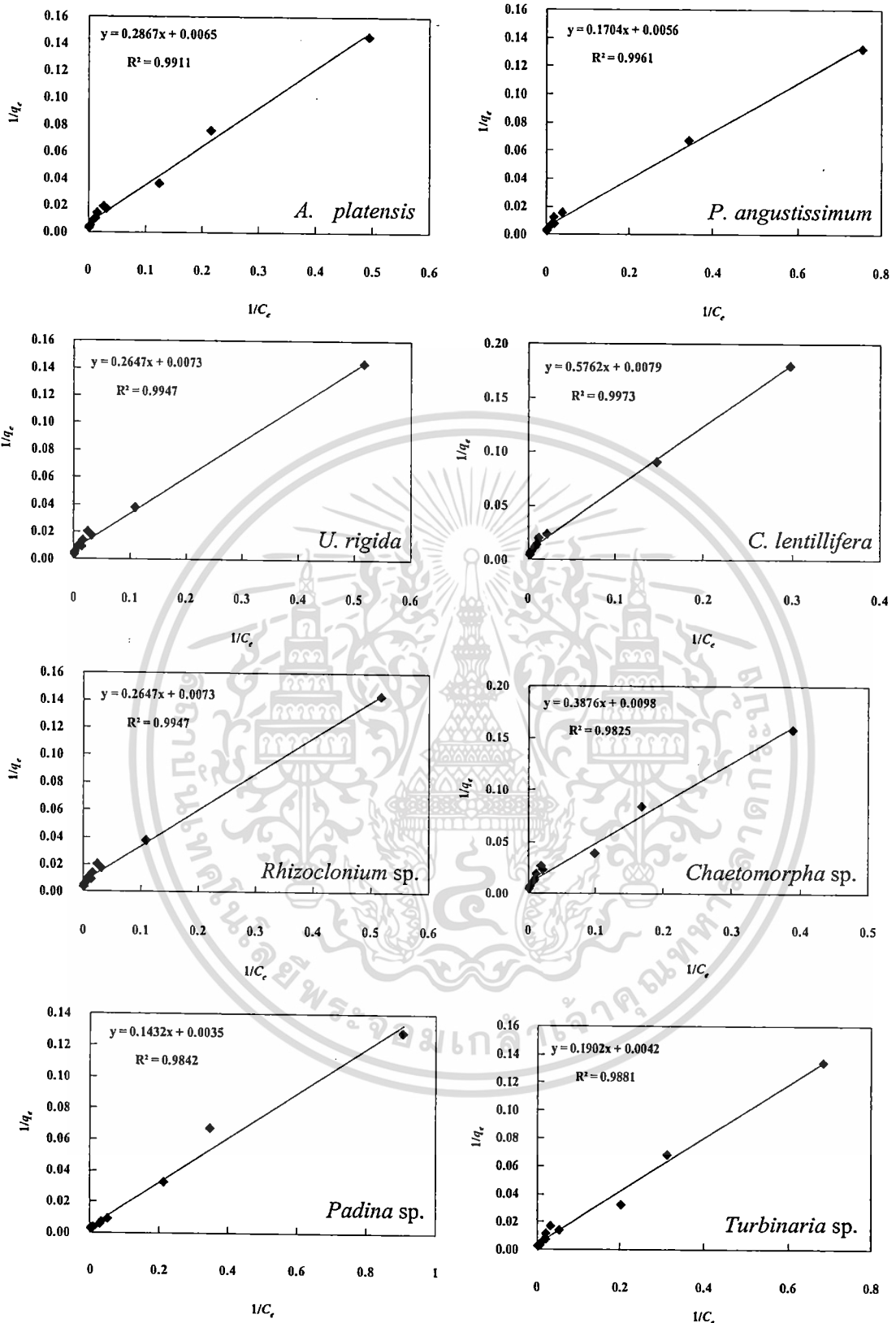
ดูดซับของ Langmuir มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Freundlich (ภาพที่ 4.21) และ *U. intestinalis*, *C. sertularioides*, *Dictyota* sp., *G. fisheri* มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir (ภาพที่ 4.22)

ตารางที่ 4.9 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน

สาหร่าย	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir			ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich		
	Q_{max} (มิลลิกรัม ต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	K_d (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	r^2	K_F (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	n	r^2
<i>A. platensis</i>	152.95±1.96 ^{ef}	0.0218±0.0002	0.987	5.04±0.07	1.528±0.007	0.983
<i>P. angustissimum</i>	154.37±1.99 ^{ef}	0.0226±0.0005	0.991	5.23±0.05	1.532±0.005	0.985
<i>U. intestinalis</i>	122.08±1.53 ⁱ	0.0208±0.0004	0.980	3.54±0.06	1.558±0.009	0.993
<i>U. rigida</i>	126.15±4.48 ^{hi}	0.0137±0.0005	0.997	2.84±0.03	1.516±0.013	0.989
<i>C. lentillifera</i>	137.08±3.30 ^{gh}	0.0275±0.0008	0.994	5.42±0.03	1.607±0.005	0.972
<i>C. sertularioides</i>	162.69±0.87 ^{da}	0.0331±0.0004	0.948	6.33±0.07	1.546±0.006	0.978
<i>Rhizoclonium</i> sp.	179.53±0.49 ^c	0.0327±0.0005	0.996	7.27±0.07	1.582±0.004	0.976
<i>Chaetomorpha</i> sp.	101.60±2.05 ^j	0.0254±0.0002	0.982	4.21±0.02	1.649±0.012	0.976
<i>Padina</i> sp.	288.80±9.30 ^a	0.0242±0.0007	0.983	10.63±0.18	1.527±0.007	0.913
<i>Turbinaria</i> sp.	238.44±6.36 ^b	0.0221±0.0010	0.9878	7.86±0.08	1.528±0.003	0.955
<i>Sargassum</i> sp.	173.53±5.27 ^{cd}	0.0316±0.0013	0.986	7.80±0.03	1.617±0.005	0.971
<i>Dictyota</i> sp.	154.78±2.25 ^{ef}	0.0211±0.0004	0.968	5.04±0.06	1.542±0.003	0.977
<i>G. fisheri</i>	143.96±2.41 ^{fg}	0.0241±0.0008	0.965	4.93±0.07	1.575±0.003	0.972
<i>Acanthophora</i> sp.	92.35±3.00 ^j	0.026±0.0009	0.984	4.32±0.03	1.729±0.018	0.973
<i>Solieria</i> sp.	76.94±1.73 ^k	0.0276±0.0003	0.988	3.96±0.01	1.852±0.020	0.970

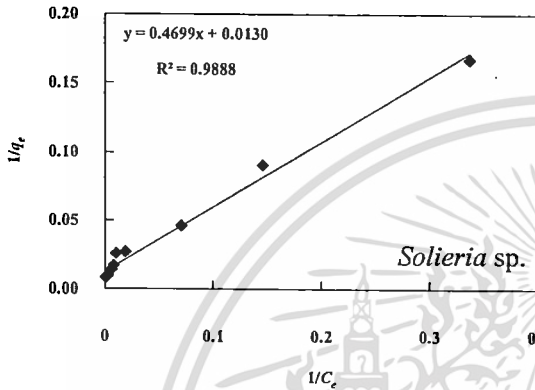
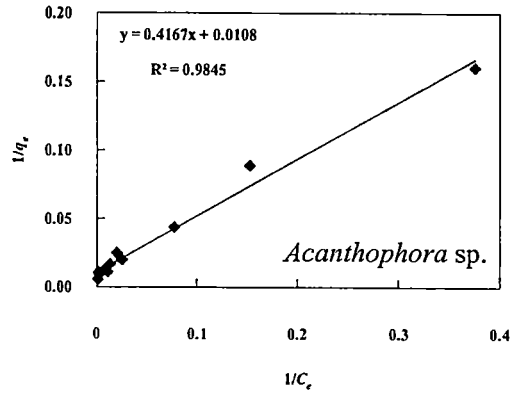
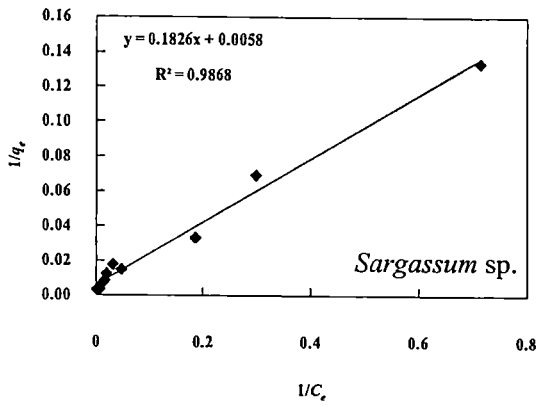
อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่ต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

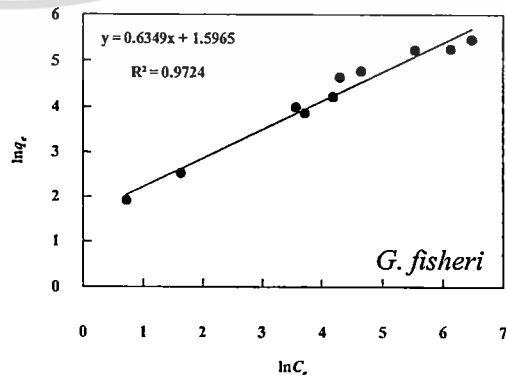
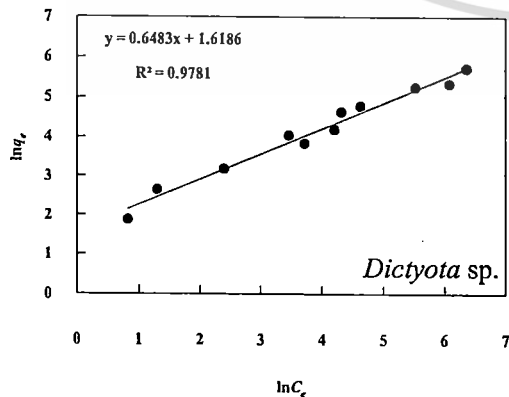
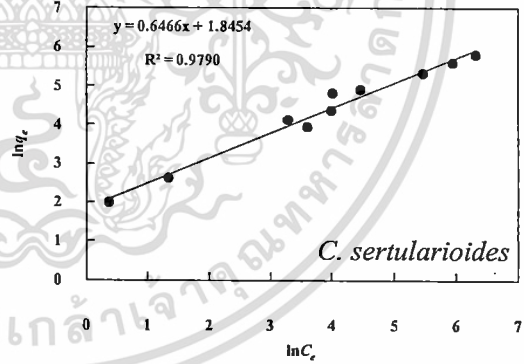
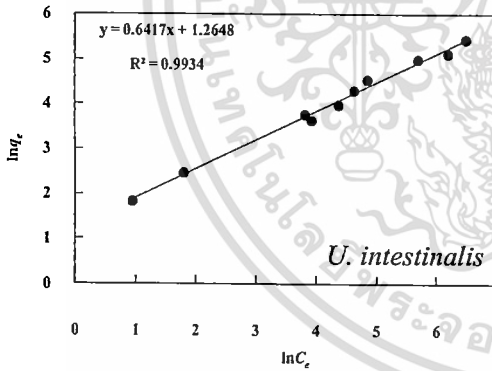


ภาพที่ 4.21 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีข้อมเบสิกโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 (ต่อ)



ภาพที่ 4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย

ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมเบนเฟิลเรดโดยสาหร่าย

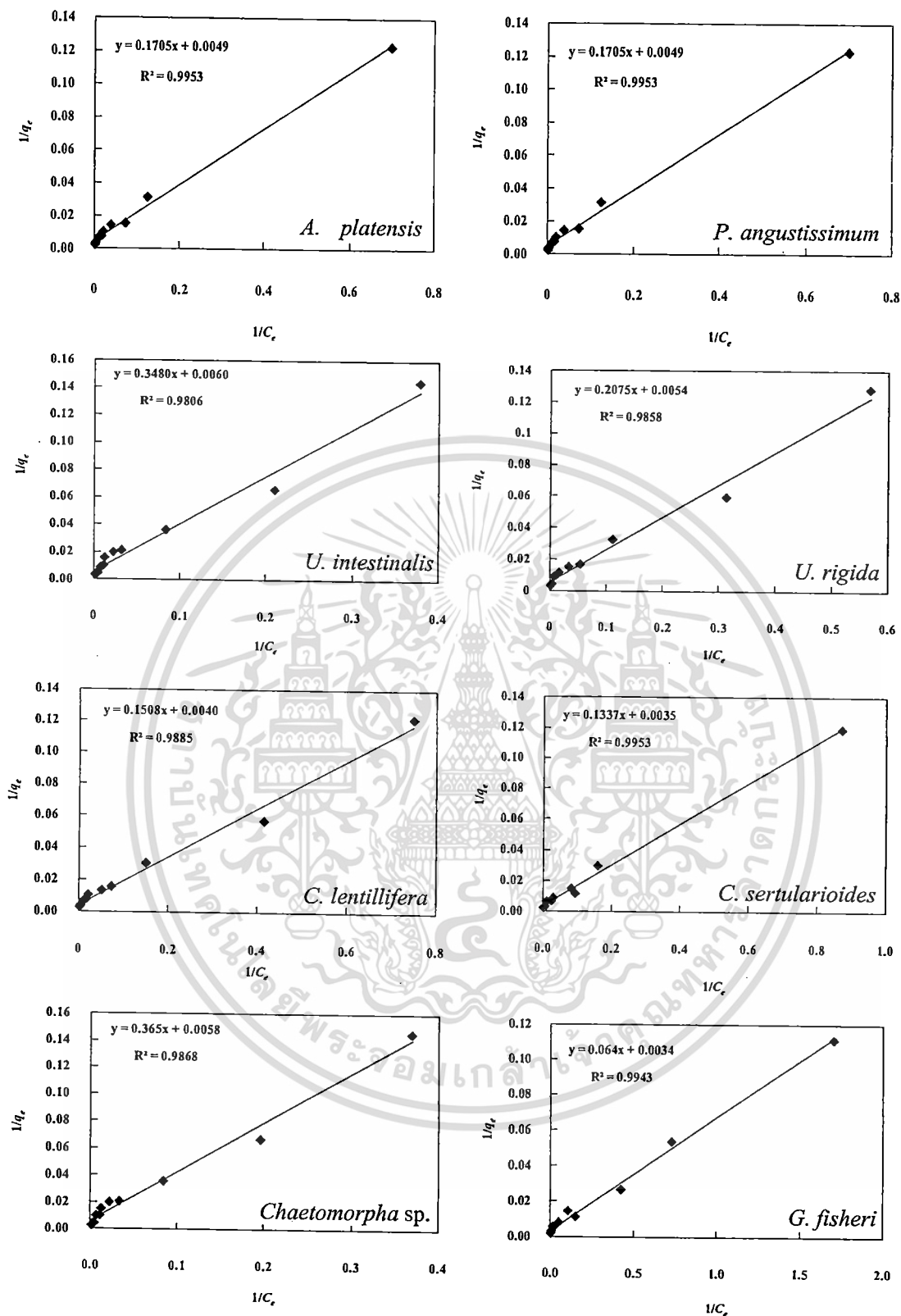
การดูดซับสีย้อมเบนเฟิลเรดของ *G. fisheri* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ที่คำนวณได้เท่ากับ 293.19 ± 8.76 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10) และพบว่า การดูดซับสีย้อมเบนเฟิลเรดของ *A. platensis*, *P. angustissimum*, *U. intestinalis*, *U. rigida*, *C. lentillifera*, *C. sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Gracilaria fisheri*, *Acanthophora* sp., และ *Solieria* sp. มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Freundlich (ภาพที่ 4.23) และ *Rhizoclonium* sp., *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., และ *Dictyota* sp. มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir (ภาพที่ 4.24)

ตารางที่ 4.10 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบนเฟิลเรด

สาหร่าย	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir			ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich		
	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	K_d (ลิตรต่อมิลลิกรัม)	r^2	K_f (มิลลิกรัมต่อกรัม)	n	r^2
<i>A. platensis</i>	277.12 ± 3.92^a	0.0460 ± 0.0015	0.995	16.01 ± 0.20	1.568 ± 0.008	0.970
<i>P. angustissimum</i>	205.89 ± 5.38^c	0.0285 ± 0.0019	0.995	9.48 ± 0.22	1.642 ± 0.010	0.977
<i>U. intestinalis</i>	168.05 ± 4.79^e	0.0172 ± 0.0005	0.980	4.44 ± 0.01	1.487 ± 0.002	0.979
<i>U. rigida</i>	187.32 ± 6.11^d	0.0258 ± 0.0016	0.985	7.54 ± 0.23	1.650 ± 0.025	0.974
<i>C. lentillifera</i>	259.30 ± 11.94^b	0.0257 ± 0.0019	0.988	9.73 ± 0.17	1.610 ± 0.014	0.981
<i>C. sertularioides</i>	288.90 ± 4.85^a	0.0258 ± 0.0011	0.995	16.10 ± 0.31	1.820 ± 0.011	0.963
<i>Rhizoclonium</i> sp.	165.37 ± 3.85^e	0.0203 ± 0.0007	0.974	5.28 ± 0.05	1.559 ± 0.006	0.978
<i>Chaetomorpha</i> sp.	171.08 ± 2.03^e	0.0160 ± 0.0003	0.985	4.07 ± 0.09	1.441 ± 0.012	0.975
<i>Padina</i> sp.	101.80 ± 4.42^e	0.0146 ± 0.0005	0.976	1.76 ± 0.09	1.266 ± 0.013	0.983
<i>Turbinaria</i> sp.	92.13 ± 2.81^{gh}	0.0160 ± 0.0009	0.978	1.68 ± 0.04	1.316 ± 0.009	0.989
<i>Sargassum</i> sp.	78.38 ± 0.75^h	0.0145 ± 0.0002	0.969	1.34 ± 0.01	1.280 ± 0.002	0.987
<i>Dictyota</i> sp.	118.99 ± 2.85^f	0.0112 ± 0.0006	0.976	1.65 ± 0.07	1.237 ± 0.013	0.985
<i>G. fisheri</i>	293.19 ± 8.76^a	0.0537 ± 0.0049	0.992	17.08 ± 0.64	1.569 ± 0.019	0.971
<i>Acanthophora</i> sp.	208.22 ± 7.02^c	0.0290 ± 0.0019	0.995	9.58 ± 0.12	1.645 ± 0.008	0.977
<i>Solieria</i> sp.	118.84 ± 4.37^f	0.0129 ± 0.0006	0.985	1.91 ± 0.01	1.268 ± 0.004	0.981

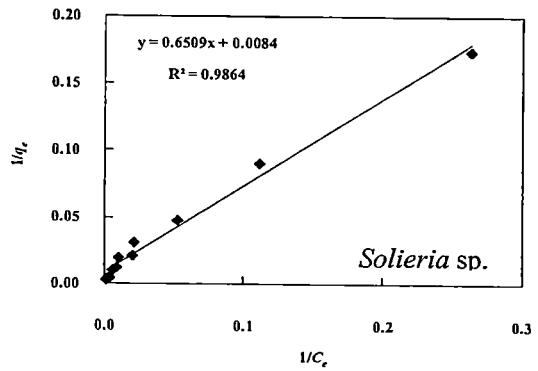
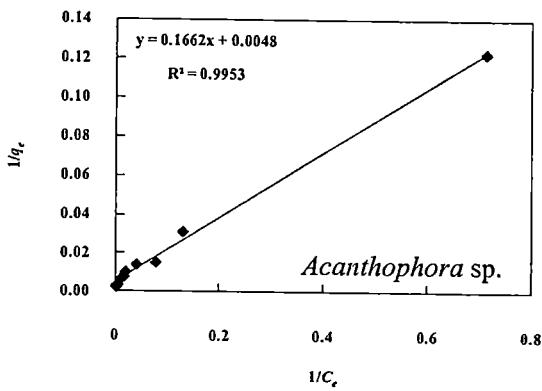
อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

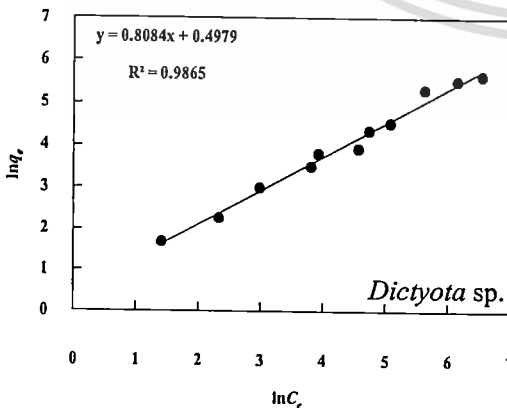
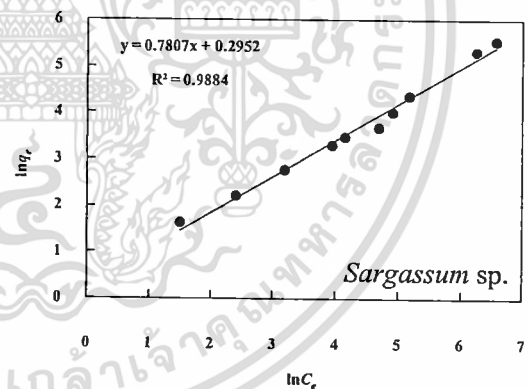
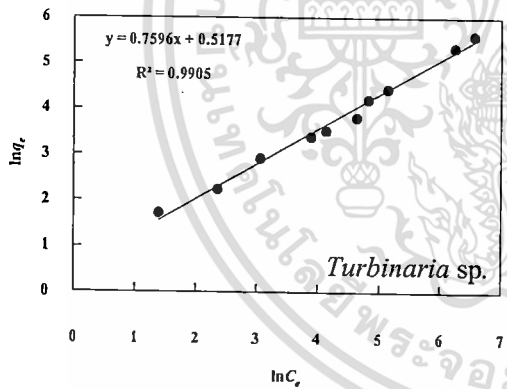
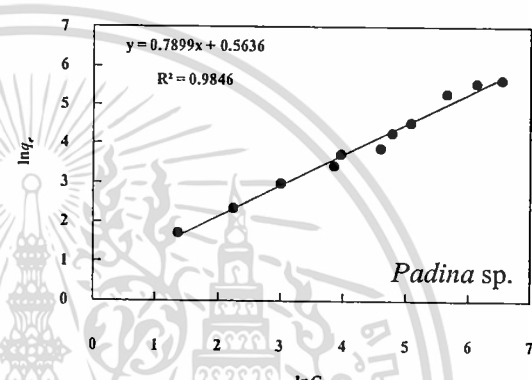
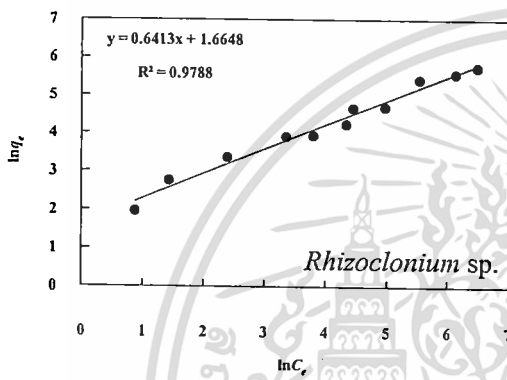


ภาพที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 (ต่อ)



ภาพที่ 4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟโดยสาหร่ายชนิด

ต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการดูดซับสี่ข้อมโดยสาหร่ายนั้น ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยในแต่ละการทดลองจะนำสมการทั้งสองแบบมาไว้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสี่ข้อม ซึ่งความสำคัญของการเลือกใช้อิโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี่ข้อม โดยใช้สาหร่ายคือ ทำให้สามารถอธิบายกลไกของสาหร่ายในระบบการบำบัดสี่ข้อมได้ถูกต้อง การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมเบเนวอลเรด มาลาโคทกรีนและเบเนฟิเคเรดในครั้งนี้ส่วนใหญ่สาหร่ายมีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Freundlich ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าการดูดซับสี่ข้อมโดยสาหร่ายที่มีความสัมพันธ์ตามทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir ซึ่งกล่าวไว้ว่าการดูดซับสี่ข้อมจะเกิดที่ผิวเซลล์เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และเกิดการดูดซับบนตำแหน่งดูดซับซึ่งมีความเหมือนกัน (homogenous binding site) และการดูดซับสี่ข้อมโดยสาหร่ายที่มีความสัมพันธ์ตามทฤษฎีการดูดซับของ Freundlich ซึ่งกล่าวไว้ว่าการดูดซับสี่ข้อมจะเกิดที่ผิวเซลล์เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และเกิดการดูดซับบนตำแหน่งดูดซับซึ่งต่างชนิดกัน (heterogeneous binding site) ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (Masel, 1996) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายส่วนใหญ่สัมพันธ์กับสมการการดูดซับของ Langmuir ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในใช้ในการดูดซับสี่ข้อมได้ โดยพิจารณาจากค่า การดูดซับสี่ข้อมสูงสุด (Q_{max})

โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสี่ข้อมสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายในการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ ในตารางที่ 4.11 พบว่าการศึกษานี้ค่าการดูดซับสี่ข้อมสูงสุดของสาหร่าย *G. fisheri* ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเบเนวอลเรดได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำ *Azolla filiculoides* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดกรีน 3 (Padmesh *et al.* 2005) และแอสิดออเรนจ์ 7 (Padmesh *et al.* 2006) หญ้าทะเล *Posidonia oceanica* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเฮลโล 59 (Guezguez *et al.* 2009) สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสี่ข้อม แอสิดเรด 337 แอสิดบลู 324 (Ozer *et al.* 2005) และแอสิดเรด 274 (Ozer *et al.* 2005b) และสาหร่าย *Spirogira rhizopus* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดบลู 329 แต่น้อยกว่าการใช้ดูดซับสี่ข้อมแอสิดบลู 290 (Ozer *et al.* 2006b)

สาหร่าย *Padina* sp. ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมเบสิคมาลาโคทกรีน ได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่าย *Turbinaria conoides* (Kannan *et al.* 2010) และ *Caulerpa racemosa* (Bekci *et al.* 2009) แต่น้อยกว่าการใช้สาหร่าย *Pithophora* sp. (Kumar *et al.* 2005) และมากกว่าการใช้สาหร่าย *Enteromorpha* spp. (Ncibi *et al.* 2009) ดูดซับสี่ข้อมเมททีลินบลูและมากกว่าสาหร่าย *C. lentillifera* ดูดซับสี่ข้อมแอสตราซอลบลู FGRL (Marungrueng and Pavasant, 2006) (ตารางที่ 4.11)

สาหร่าย *G. fisheri* ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมรีแอสิดทีฟได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่าย *Laminaria* sp. ในการดูดซับสี่รีแอสิดทีฟเบลคบี (Vijayaraghavan *et al.* 2008) และ *Phormidium* sp. ในการดูดซับสี่รีแอสิดทีฟเบลคบีและสี่รีมาซอลบลู (Sevgil and Gonul, (2007) แต่น้อยกว่าการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่าย *Spirogira rhizopus* ในการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟลโล 22 (Mohan *et al.* 2002) และมากกว่าการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในการดูดซับสีรีแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ และริมาซอลโกลเดนท์เฟลโล แต่น้อยกว่าการดูดซับสีรีแอกทีฟริมาซอลแบลคบี (Aksu and Tezer. 2005) (ตารางที่ 4.11)

นอกจากนี้ค่า K_d จากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ยังสามารถบอกค่าคงที่ในการดูดซับสีเขียวของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพรรคของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า K_d การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *G. fisheri* พบว่ามีค่า K_d ในการดูดซับสีเขียวแอสซิดเบเนวอลเรดสูงกว่าพืชน้ำ *Azolla filiculoides* ในการดูดซับสีเขียวแอสซิดกรีน 3 (Padmesh *et al.* 2005) แอสซิดออเรนจ์ 7 (Padmesh *et al.* 2006) และสาหร่าย *Spirogira rhizopus* ในการดูดซับสีเขียวแอสซิดบลู 329 และสีเขียวแอสซิดบลู 290 (Ozer *et al.* 2006b) แต่ต่ำกว่าหญ้าทะเล *Posidonia oceanica* ในการดูดซับสีเขียวแอสซิดเฟลโล 59 (Guezguez *et al.* 2009) สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีเขียวแอสซิดเรด 337 แอสซิดบลู 324 (Ozer *et al.* 2005) และแอสซิดเรด 274 (Ozer *et al.* 2005b)

สาหร่าย *Padina* sp. ให้ค่า K_d ในการดูดซับสีเขียวเบสิกมาลาไคท์กรีนสูงกว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่ดูดซับสีเขียวแอสตราซอนบลู FGRL (Marungrueng and Pavasant. 2006) สาหร่าย *Enteromorpha* spp. ดูดซับสีเขียวเมททีลินบลู (Ncibi *et al.* 2009) สาหร่าย *Turbinaria conoides* (Kannan *et al.* 2010) สาหร่าย *Caulerpa racemosa* (Bekci *et al.* 2009) และสาหร่าย *Pithophora* sp. (Kumar *et al.* 2005) ดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน (ตารางที่ 4.11)

สาหร่าย *G. fisheri* ให้ค่า K_d ในการดูดซับสีเขียวรีแอกทีฟได้สูงกว่าสาหร่าย *Laminaria* sp. ในการดูดซับสีรีแอกทีฟแบลคบี (Vijayaraghavan *et al.* 2008) แต่ต่ำกว่าสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในการดูดซับสีรีแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ ริมาซอลโกลเดนท์เฟลโล และริมาซอลแบลคบี (Aksu and Tezer. 2005) (ตารางที่ 4.11)

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของตัวดูดซับต่างๆ ในการดูดซับสีย้อม

สีย้อม	ตัวดูดซับ	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	K_d (มิลลิกรัมต่อ กรัม)	เอกสารอ้างอิง
สีย้อมแอซิด				
แอซิดกรีน 3 (Acid green 3)	พืชน้ำ <i>Azolla filiculoides</i>	137	0.0052	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
แอซิดออเรนจ์ 7 (Acid orange 7)	พืชน้ำ <i>Azolla filiculoides</i>	109.6	0.0043	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
แอซิดยลโล 59 (Acid yellow 59)	หญ้าทะเล <i>Posidonia oceanica</i>	76.9	2.94	Guezguez <i>et al.</i> (2009)
แอซิดเรด 337 (Acid red 337)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	210.87	0.0187	Ozer <i>et al.</i> (2005a)
แอซิดบลู 324 (Acid blue 324)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	160.59	0.00960	Ozer <i>et al.</i> (2005a)
แอซิดเรด 274 (Acid red 274)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	238.1	0.0649	Ozer <i>et al.</i> (2005b)
แอซิดบลู 324 (Acid blue 324)	<i>Spirogira rhizopus</i>	367	0.00332	Ozer <i>et al.</i> (2006b)
แอซิดบลู 290 (Acid blue 290)	<i>Spirogira rhizopus</i>	1360.6	0.00125	Ozer <i>et al.</i> (2006b)
เบนวอลเรด (Benewol red)	<i>Gracilaria fisheri</i>	483.46	0.0067	การศึกษาค้นคว้า
สีย้อมเบสิก				
แอสตราซอนบลู (Astrazon blue FGLR)	<i>C. lentillifera</i>	37.17	0.020	Marungrueng and Pavasant (2006)
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	สาหร่ายขนาดใหญ่ <i>Pithophora</i> sp.	117.647	0.0093	Kumar <i>et al.</i> (2005)
เมทิลีนบลู (Methylene blue)	<i>Enteromorpha</i> spp.	273.79	0.02	Ncibi <i>et al.</i> (2009)

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

สีย้อม	ตัวดูดซับ	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	K_d (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	เอกสารอ้างอิง
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	<i>Turbinaria conoides</i>	66.66	0.0203	Kannan <i>et al.</i> (2010)
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	<i>Caulerpa racemosa</i>	25.67	0.00094	Bekci <i>et al.</i> (2009)
มาลาไคท์กรีน (Malachite green)	<i>Padina</i> sp.	288.8	0.0242	การศึกษารั้งนี้
สีย้อมรีแอคทีฟ				
รีแอคทีฟเยลโล 22 (Reactive yellow 22)	สาหร่ายสีเขียว <i>Spirogyra</i> sp.	400	-	Mohan <i>et al.</i> (2002)
รีมาซอลแบลคบี (Remazol black B)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella vulgaris</i>	476.2	0.587	Aksu and Tezer (2005)
รีมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol red RR)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella vulgaris</i>	196.1	2.215	Aksu and Tezer (2005)
รีมาซอลโกลเดนเอนด์เยลโล (Remazol golden yellow RNL)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella vulgaris</i>	71.9	2.099	Aksu and Tezer (2005)
รีแอคทีฟแบลคบี (Reactive black 5)	สาหร่ายสีน้ำตาล <i>Laminaria</i> sp.	101.5	0.012	Vijayaraghavan <i>et al.</i> (2008)
รีแอคทีฟแบลคบี (reactive Black B)	ไซยาโนแบคทีเรีย <i>Phormidium</i> sp.	14.17	-	Sevgil and Gonul (2007)
รีมาซอลบลู (Remazol Blue)	ไซยาโนแบคทีเรีย <i>Phormidium</i> sp.	14.7	-	Sevgil and Gonul (2007)
เบเนฟิกเรด (Benefix Red)	<i>Gracilaria fisheri</i>	293.19	0.0537	การศึกษารั้งนี้
- ไม่แสดงข้อมูล				

4.2 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยการคัดเลือกสาหร่ายที่หาง่าย มีปริมาณมากในธรรมชาติ และให้ค่าการดูดซับสีย้อมสูง จากข้อ 4.1.3 พบว่าสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูง 3 ชนิด ในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ได้แก่ สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคเรด ได้แก่ ไชยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri* จึงได้นำสาหร่ายนี้มาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อม เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียจริงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

4.2.1.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้ 68.69 ± 0.57 , 63.77 ± 0.61 และ 69.80 ± 0.20 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 64.26 ± 0.28 , 59.67 ± 0.78 และ 65.3 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อปริมาณสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* เพิ่มขึ้นเป็น 6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมได้เพียง 6.17 ± 0.02 , 6.08 ± 0.03 และ 6.92 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมลดลงประมาณ 10 เท่า (ตารางที่ 4.12)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณ เซลล์ (กรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใช่สาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูด ซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	64.26±0.28 ^b	68.69±0.57 ^f	59.67±0.78 ^b	63.77±0.61 ^f	65.3±0.14 ^b	69.80±0.20 ^c
1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	33.35±0.08 ^f	71.29±0.11 ^e	32.06±0.26 ^f	68.54±0.31 ^c	39.42±0.35 ^f	84.27±0.47 ^d
1.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	22.63±0.09 ^e	72.58±0.23 ^d	22.28±0.09 ^e	71.43±0.17 ^d	27.11±0.12 ^e	86.92±0.06 ^{bc}
2	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	17.38±0.13 ^d	74.32±0.31 ^c	17.14±0.04 ^d	73.28±0.14 ^c	20.25±0.14 ^d	86.57±0.24 ^c
2.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	14.51±0.07 ^c	77.52±0.23 ^b	14.30±0.09 ^e	76.41±0.41 ^b	16.37±0.10 ^c	87.47±0.17 ^b
3	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	12.26±0.07 ^b	78.64±0.31 ^{ab}	12.01±0.10 ^b	77.03±0.53 ^{ab}	13.66±0.04 ^b	87.61±0.21 ^b
6	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	6.17±0.02 ^a	79.09±0.16 ^a	6.08±0.03 ^a	78.04±0.24 ^a	6.92±0.05 ^a	88.76±0.27 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.1.2 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน

การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ใช้ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนออกจากสารละลายได้ 90.71 ± 0.43 , 87.01 ± 0.17 และ 86.27 ± 0.36 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 8.60 ± 0.22 , 8.25 ± 0.19 และ 8.18 ± 0.19 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อปริมาณสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. เพิ่มขึ้นเป็น 6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีข้อมได้เพียง 0.77 ± 0.02 , 0.76 ± 0.02 และ 0.76 ± 0.11 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้งซึ่งความสามารถในการดูดซับลดลงประมาณ 11 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณ เซลล์ (กรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใช่สาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	8.60±0.22 ^a	90.71±0.43 ^c	8.25±0.19 ^a	87.01±0.17 ^f	8.18±0.19 ^a	86.27±0.36 ^c
1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.51±0.10 ^b	95.14±0.12 ^d	4.31±0.10 ^b	91.01±0.38 ^c	4.35±0.11 ^b	91.80±0.44 ^d
1.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	3.02±0.07 ^c	95.45±0.21 ^{cd}	2.91±0.06 ^c	91.95±0.13 ^d	2.90±0.08 ^c	91.88±0.65 ^d
2	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	2.28±0.05 ^d	96.04±0.25 ^c	2.20±0.05 ^d	92.80±0.11 ^c	2.19±0.05 ^d	92.45±0.17 ^d
2.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	1.84±0.04 ^e	96.78±0.23 ^b	1.77±0.04 ^e	93.57±0.27 ^{bc}	1.78±0.05 ^e	93.75±0.40 ^c
3	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	1.54±0.03 ^e	97.26±0.13 ^{ab}	1.49±0.03 ^e	94.21±0.23 ^b	1.50±0.03 ^e	95.11±0.28 ^b
6	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.77±0.02 ^f	97.96±0.13 ^a	0.76±0.02 ^f	96.62±0.42 ^a	0.76±0.02 ^f	96.43±0.22 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.1.3 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเบนเฟนเฟลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเฟนเฟลเรดโดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ใช้ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบนเฟนเฟลเรดออกจากสารละลายได้ 90.88 ± 0.23 , 68.63 ± 0.44 และ 91.56 ± 0.22 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 175.07 ± 0.75 , 132.21 ± 1.64 และ 176.37 ± 0.69 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับปริมาณสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อปริมาณสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* เพิ่มขึ้นเป็น 6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมได้เพียง 15.94 ± 0.09 , 13.60 ± 0.09 และ 15.98 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับลดลง 11, 9 และ 11 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.14)



ตารางที่ 4.14 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของแบคทีเรียโดยสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณ เซลล์ (กรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	175.07±0.75 ^a	90.88±0.23 ^e	132.21±1.64 ^a	68.63±0.44 ^f	176.37±0.69 ^a	91.56±0.22 ^d
1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	91.47±0.80 ^b	94.96±0.26 ^d	71.60±0.26 ^b	74.34±0.18 ^c	93.78±0.45 ^b	97.36±0.19 ^c
1.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	61.33±0.25 ^c	95.51±0.19 ^d	49.04±0.58 ^c	76.36±0.46 ^d	62.54±0.32 ^c	97.40±0.16 ^c
2	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	46.39±0.32 ^d	96.31±0.14 ^c	37.51±0.17 ^d	77.88±0.35 ^c	47.10±0.28 ^d	97.80±0.17 ^c
2.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	37.41±0.26 ^e	97.09±0.18 ^b	30.62±0.15 ^e	79.47±0.15 ^b	37.93±0.20 ^e	98.44±0.14 ^b
3	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	31.35±0.16 ^f	97.63±0.11 ^b	25.84±0.26 ^f	80.48±0.39 ^b	31.69±0.16 ^f	98.71±0.17 ^{ab}
6	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	15.94±0.09 ^g	99.29±0.09 ^a	13.60±0.09 ^g	84.71±0.65 ^a	15.98±0.11 ^g	99.11±0.18 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณสาหร่ายที่ใช้แตกต่างกันมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสีที่ถูกดูดซับได้ต่อเซลล์สาหร่ายแห้งลดลง (ตารางที่ 4.12, 4.13, และ 4.14) เนื่องจากปริมาณสาหร่ายน้อยทำให้มีพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งยึดจับของสาหร่ายกับโมเลกุลของสีต่อหน่วยของสาหร่ายได้มากกว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายมาก และปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันหรือชิดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งยึดจับบางส่วนไม่สามารถจับกับสีได้ (Ozer *et al.* 2005b; Cengiz and Cavas. 2008; Tsai and Chen. 2010) สอดคล้องกับการศึกษาผลของการใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน 50-200 กรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าการดูดซับ 33.67-9.45 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Tsai and Chen., 2010) และการใช้สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีข้อมแอซิด AB 324 และ AR 337 ที่ความแตกต่างของปริมาณตัวดูดซับ 5 ระดับ ในช่วง 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้มีการดูดซับสีข้อมทั้งหมด(เปอร์เซ็นต์การดูดซับ)เพิ่มขึ้นในขณะที่การดูดซับปริมาณสีข้อมต่อหน่วยสาหร่ายลดลง (Ozer *et al.* 2005b) และการศึกษาผลของปริมาณสาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* ต่อการดูดซับสีข้อมเบติก Yellow ที่ความแตกต่างของปริมาณตัวดูดซับ 4 ระดับ ในช่วง 3-10 กรัมต่อลิตร พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 81 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นการดูดซับต่อหน่วยกรัมสาหร่ายลดลง (Aravindhan *et al.* 2007) เนื่องจากปริมาณสีข้อมที่มีอยู่ในสารละลายนั้นมีอยู่จำกัด เมื่อใส่สาหร่ายลงไปเป็นจำนวนมากเกินจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่ม ตำแหน่งยึดจับมากขึ้นจำนวนสีข้อมเมื่อการดูดซับเสร็จสิ้นยังคงมีตำแหน่งยึดจับบางส่วนที่ว่างอยู่ หากใส่ตัวดูดซับจำนวนน้อยลงในปริมาณสีข้อมเท่ากันทำให้ตำแหน่งยึดจับสามารถจับสีข้อมได้เต็มที่ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันจึงทำให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนน้อยมีการดูดซับสีข้อมได้มากกว่า (Gadd. 1988; Fourest and Roux. 1992)

การใช้สาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ในการดูดซับสีข้อมเมทิลีนบลูที่ผันแปรปริมาณเซลล์สาหร่ายระหว่าง 0.1-2 กรัม ที่ความเข้มข้นของสีข้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นมีการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 81 เป็น 98 เปอร์เซ็นต์ (Cengiz and Cavas. 2008) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* sp. ดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนที่ปริมาณเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันจาก $1.5-7.5 \times 10^6$ เซลล์ต่อลิตร พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 65.7-89.1 เปอร์เซ็นต์ (Daneshvar *et al.* 2007) การใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสีข้อมแอซิดเรด274 ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับในช่วง 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อปริมาณของสาหร่ายเพิ่มขึ้นจากประมาณ 500-100 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Ozer *et al.*, 2006b)

นอกจากนี้การใช้พืชน้ำ *Pasidonia ocaenica* ดูดซับสีข้อมแอซิดเยลโล 59 (Acid Yellow 59) ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 0.5-10 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสีข้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 10 กรัมต่อลิตรการดูดซับลดลงจาก 8.3 ถึง 84.3 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 45.8 ถึง 90.3 เปอร์เซ็นต์ (Guezguez *et al.*, 2009)

4.2.2 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

4.2.2.1 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสำหรับ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบเนวอลเรด 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบเนวอลเรดออกจากสารละลายได้ 51.26 ± 1.42 , 40.56 ± 2.16 และ 59.47 ± 1.40 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 518.79 ± 14.08 , 410.56 ± 13.27 และ 601.80 ± 13.39 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบเนวอลเรดต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* สามารถดูดซับสีย้อมได้ 8.57 ± 0.13 , 8.43 ± 0.03 และ 8.52 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงประมาณ 65, 51 และ 70 เท่า ตามลำดับ แต่สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 90.54 ± 1.07 , 89.00 ± 0.29 และ 90.04 ± 1.19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

ตารางที่ 4.15 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
10	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	8.57±0.13 ^h	90.54±1.07 ^a	8.43±0.03 ⁱ	89.00±0.29 ^a	8.52±0.09 ^h	90.04±1.19 ^a
20	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	17.12±0.41 ^{gh}	90.04±0.81 ^a	16.86±0.16 ^{hi}	88.72±1.22 ^a	17.23±0.43 ^{gh}	90.65±1.30 ^a
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	34.91±0.45 ^e	89.0±0.95 ^{ab}	34.44±0.44 ^h	87.79±0.82 ^a	35.44±0.20 ^e	90.37±0.78 ^a
80	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	69.20±1.13 ^f	88.64±1.00 ^{ab}	66.67±1.22 ^e	85.40±1.26 ^a	70.18±1.33 ^f	89.80±1.00 ^a
100	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	87.43±0.57 ^f	87.17±1.06 ^{abc}	81.57±2.66 ^e	81.26±1.65 ^b	88.47±1.55 ^f	88.19±0.94 ^a
150	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	127.11±3.22 ^c	85.42±1.26 ^{bc}	112.55±2.45 ^f	75.64±0.99 ^c	131.83±2.54 ^e	88.60±0.75 ^a
200	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	168.53±2.27 ^d	83.16±1.73 ^c	141.84±0.73 ^e	70.00±0.18 ^d	181.39±0.73 ^d	89.52±1.11 ^a
250	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	180.33±3.89 ^d	71.56±0.97 ^d	166.50±2.86 ^d	66.08±0.97 ^c	182.61±3.05 ^d	72.47±0.61 ^b
500	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	309.89±11.56 ^c	62.01±2.31 ^e	259.76±1.22 ^c	51.98±0.99 ^f	332.35±8.81 ^c	66.50±1.52 ^c
750	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	459.63±17.94 ^b	60.77±1.91 ^e	341.79±15.01 ^b	45.19±1.62 ^e	505.20±14.98 ^b	66.81±1.45 ^c
1000	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	518.79±14.08 ^a	51.26±1.42 ^f	410.56±13.27 ^a	40.56±2.16 ^h	601.80±13.39 ^a	59.47±1.40 ^d

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.2.2 ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน

การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวมาลาไคท์กรีน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีเขียวมาลาไคท์กรีนออกจากสารละลายได้ 56.54 ± 0.61 , 48.33 ± 0.82 และ 46.44 ± 1.39 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีเขียวได้สูงสุด 483.37 ± 9.23 , 413.28 ± 11.45 และ 397.20 ± 16.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเขียวมาลาไคท์กรีนต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. สามารถดูดซับสีเขียวได้ 8.44 ± 0.08 , 8.22 ± 1.25 และ 8.23 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงประมาณ 57, 50 และ 48 เท่าตามลำดับ แต่สามารถกำจัดสีเขียวได้ถึง 95.12 ± 0.05 , 92.65 ± 0.82 และ 92.71 ± 0.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสี เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูด ซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
10	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	8.44±0.08 ⁱ	95.12±0.05 ^a	8.22±1.25 ⁱ	92.65±0.82 ^a	8.23±0.13 ⁱ	92.71±0.58 ^a
20	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	16.98±0.16 ⁱ	94.09±0.57 ^{ab}	16.36±0.19 ⁱ	90.68±0.58 ^a	16.36±0.27 ⁱ	90.68±0.91 ^a
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	32.49±0.41 ^h	93.40±0.53 ^{abc}	31.934±0.91 ^h	91.82±0.87 ^a	31.83±0.16 ^h	91.53±0.62 ^{ab}
80	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	81.41±1.11 ^b	92.10±0.62 ^{bcd}	77.86±1.32 ^b	88.08±0.57 ^{ab}	78.22±1.16 ^b	88.49±0.49 ^{bc}
100	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	81.65±1.05 ^b	92.00±0.58 ^{cd}	77.10±0.42 ^b	86.88±0.18 ^b	76.80±1.38 ^b	86.52±1.10 ^c
150	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	119.02±1.99 ^f	91.11±0.62 ^d	101.72±1.83 ^f	77.86±0.63 ^c	108.69±1.93 ^f	83.20±0.69 ^d
200	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	151.96±4.13 ^e	85.76±1.29 ^e	139.94±3.43 ^e	78.98±0.84 ^{cd}	133.45±0.74 ^e	75.35±0.69 ^e
250	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	189.42±1.92 ^d	84.11±0.35 ^e	171.51±2.70 ^d	76.15±0.49 ^{d e}	164.54±0.66 ^d	73.08±1.12 ^c
500	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	336.36±5.72 ^c	78.14±0.64 ^f	320.88±4.38 ^c	74.55±0.49 ^e	321.94±2.89 ^c	74.82±1.08 ^e
750	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	399.93±6.57 ^b	61.27±0.66 ^b	383.24±7.74 ^b	58.71±0.70 ^f	380.51±2.40 ^b	58.31±0.85 ^f
1000	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	483.37±9.23 ^a	56.54±0.61 ^h	413.28±11.45 ^a	48.33±0.82 ^b	397.20±16.33 ^a	46.44±1.39 ^b

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.2.3 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเฟลคเรด 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบนเฟลคเรดออกจากสารละลายได้ 65.08 ± 0.82 , 61.94 ± 0.53 และ 66.59 ± 0.66 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 632.44 ± 8.47 , 601.88 ± 5.64 และ 647.08 ± 6.88 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.17) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเฟลคเรดต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* สามารถดูดซับสีย้อมได้ 9.01 ± 0.17 , 8.94 ± 0.23 และ 9.20 ± 0.28 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งลดลงประมาณ 70, 67 และ 70 เท่า แต่สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 94.17 ± 1.54 , 93.46 ± 1.54 และ 96.15 ± 1.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า



ตารางที่ 4.17 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
10	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	9.01±0.17 ^k	94.17±1.54 ^a	8.94±0.23 ^k	93.46±1.54 ^a	9.20±0.28 ^k	96.15±1.59 ^a
20	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	18.72±0.25 ^j	93.48±1.42 ^{ab}	18.63±0.97 ^j	92.99±0.41 ^a	19.37±0.31 ^j	96.73±1.82 ^{ab}
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	36.51±0.31 ⁱ	91.59±1.13 ^{abc}	36.54±0.33 ⁱ	91.66±0.71 ^{ab}	38.20±0.12 ⁱ	95.83±0.78 ^{ab}
80	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	71.76±0.86 ^h	91.23±0.48 ^{bc}	70.98±0.82 ^h	90.23±0.69 ^b	74.04±0.54 ^h	94.13±1.01 ^{abc}
100	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	86.81±0.59 ^g	90.65±0.47 ^c	85.84±0.49 ^g	89.63±0.55 ^b	89.09±0.32 ^g	93.03±0.17 ^{bcd}
150	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	132.99±1.48 ^f	90.35±0.88 ^c	131.43±0.43 ^f	89.30±0.52 ^{bc}	135.13±0.98 ^f	91.82±0.91 ^{cd}
200	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	171.94±1.46 ^e	89.98±0.71 ^c	166.29±1.52 ^e	87.02±0.79 ^c	173.31±0.46 ^e	90.70±0.35 ^d
250	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	210.83±1.24 ^d	83.03±0.38 ^d	197.83±3.96 ^d	77.91±1.57 ^d	213.30±3.59 ^d	84.01±1.31 ^e
500	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	341.91±0.74 ^c	71.09±0.22 ^e	325.65±2.67 ^c	67.71±0.58 ^c	344.18±0.16 ^c	71.56±0.14 ^f
750	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	518.96±5.72 ^b	72.04±0.39 ^e	456.53±4.06 ^b	63.37±0.36 ^f	529.69±3.42 ^b	73.53±0.27 ^f
1000	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	632.44±8.47 ^a	65.08±0.82 ^f	601.88±5.64 ^a	61.94±0.53 ^f	647.08±6.88 ^a	66.59±0.66 ^g

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าความเข้มข้นสีเขียวที่เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าการดูดซับต่อหน่วย (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) เพิ่มขึ้นแต่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลง (ตารางที่ 4.15, 4.16 และ 4.17) เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์พบว่า การดูดซับยังคงมีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า 40-50 เปอร์เซ็นต์) ในการดูดซับสีเขียวเบนเนวอลเรด โดย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 100, 80 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15) การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 150, 100 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16) และการดูดซับสีเขียวเบนฟิคเรด โดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 4.17) เมื่อความเข้มข้นของสีเขียวสูงกว่าระดับดังกล่าวนี้แม้ว่าปริมาณการดูดซับสูงขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีเขียวต่ำลง ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับสูงขึ้นเนื่องมาจากการสะสมสีเขียวบนผิวเซลล์ตัวดูดซับซึ่งสามารถเกิดเป็นชั้นซ้อนกันหลายๆ ชั้น ทำให้การดูดซับสูงขึ้นและความเข้มข้นสีเขียวที่สูงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงผลักของประจุสีเขียวจากสารละลายสู่ผนังเซลล์ตัวดูดซับสูง ทำให้เกิดการขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายได้แรงและเร็ว ตัวดูดซับจึงสามารถบำบัดสีเขียวได้เร็วและได้มาก ค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะถูกจำกัดโดยปริมาณตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ โดยถ้าความเข้มข้นของสีเขียวต่ำ ค่าการดูดซับอาจจะต่ำ เพราะตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับไม่ได้ใช้ทั้งหมด (Ozer et al. 2006b) สอดคล้องกับการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีเขียวแอซิดเรด 274 เริ่มต้น โดยสาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25-3600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณการดูดซับสีเขียวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสีเขียวที่เพิ่มขึ้น (Ozer et al. 2006a) การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* sp. ที่ความเข้มข้น 2.5 ถึง 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณสีเขียวที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.22 ถึง 2.78 มิลลิกรัมต่อ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร หรือ 40 ถึง 83.33 เปอร์เซ็นต์ (Daneshvar et al. 2007) การใช้สาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* ดูดซับสีเขียวเบสิกเยลโล (Basic Yellow) ที่ปริมาณสาหร่าย 5 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีเขียวจาก 25 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 4.7 ถึง 27 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Aravindhana et al. 2007) การใช้สาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเขียวทีลินบลู ปริมาณสาหร่าย 0.5 กรัมต่อ 30 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าการดูดซับ 0.295-5.777 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Cengiz and Cavas. 2008) การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ที่ความเข้มข้นสีเขียวแตกต่างกัน 200-2000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 1.755-18.727 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในสาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* เมื่อนำมาดูดซับสีมาลาไคท์กรีน ที่ความเข้มข้น 25-200 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 11.0-47.08 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Kannan et al. 2010) การใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีรีแอคทีฟรีมาซอลแบลคบี (Remazol black B) รีมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol red RR) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 20-800 มิลลิกรัมต่อลิตร และรีมาซอลโกลเดนเทลโล (Remazol golden yellow RNL) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเซลล์ 1 กรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 14.9-368.8, 14.2-181.9 และ 6.2-52.8 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 82.6-46.4, 80.3-22.6 และ 60.3-26.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Aksu and Tezer. 2005) และการใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด (Reactive red) ที่ความเข้มข้น 22.2-79.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นระดับต่ำสุดมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 35.4 เปอร์เซ็นต์ (Karacakaya et al. 2009)

นอกจากนี้พบว่าการใช้พืชน้ำ *Azolla rongpong* นำมาดูดซับสีแอซิดเรด 88 (Acid red 88) ปริมาณเซลล์ 4 กรัมต่อลิตร ที่ความแตกต่างของความเข้มข้น 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเท่ากับ 2.04 ถึง 109 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยพบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 81.7 ถึง 43.6 เปอร์เซ็นต์ (Padmesh et al. 2006)

4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม

4.2.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส *C. lentillifera* มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 42.63 ± 0.71 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และกำจัดสีย้อมเบนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 80.70 ± 0.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วน *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสูงสุด ที่อุณหภูมิ 55 และ 45 องศาเซลเซียส เท่ากับ 40.77 ± 0.44 และ 46.16 ± 1.01 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีย้อมเบนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 73.20 ± 0.35 และ 87.40 ± 0.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.18)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีย้อมเบนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 99.15, 10.02 และ 87.14 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (ตารางที่ 4.19)

ตารางที่ 4.18 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
25	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	20.82±0.07 ^c	42.79±0.03 ^f	24.87±0.34 ^e	51.12±0.56 ^d	32.35±0.42 ^c	66.51±0.29 ^f
30	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	33.81±0.02 ^d	68.96±0.13 ^d	32.96±0.03 ^f	67.23±0.36 ^c	35.07±0.48 ^d	71.55±0.07 ^c
35	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	35.66±0.16 ^c	72.69±0.35 ^c	34.52±0.27 ^e	70.37±0.50 ^b	42.40±0.18 ^c	86.43±0.03 ^b
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	42.35±0.45 ^a	85.50±0.68 ^a	35.79±0.40 ^d	72.26±0.51 ^a	44.81±0.22 ^b	90.47±0.09 ^a
45	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	42.63±0.71 ^a	80.70±0.58 ^b	37.39±0.70 ^c	70.77±0.67 ^b	46.16±1.01 ^a	87.40±0.54 ^b
50	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	39.18±0.28 ^b	72.45±0.28 ^c	39.52±0.60 ^b	73.09±0.22 ^a	44.76±0.78 ^b	82.78±0.58 ^c
55	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	36.51±0.52 ^c	65.54±0.71 ^e	40.77±0.44 ^a	73.20±0.35 ^a	43.95±0.64 ^b	78.90±0.62 ^d

ตารางที่ 4.19 ค่าเอนทัลปี (ΔH) เอนโทรปี (ΔS) และพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) ของการดูดซับ สีย้อมเบนเนวอลเรด

สาหร่าย	ΔH	ΔS	ΔG						
			25	30	35	40	45	50	55
<i>C. lentilifera</i>	99.15	0.33	-0.38	-1.28	-2.93	-4.59	-	-	-
<i>Rhizoclonium</i> sp.	10.02	0.04	-	-1.81	-	-	-2.39	-2.59	-2.78
<i>G. fisheri</i>	87.14	0.30	-1.43	-2.91	-4.40	-5.89	-	-	-

ΔH , ΔS และ ΔG (กิโลจูลต่อโมล)

หมายเหตุ - ไม่ได้หาค่า

4.2.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน

การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่า *Padina* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.49 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 94.82 ± 0.45 เปอร์เซ็นต์ ส่วน *Turbinaria* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.26 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 93.38 ± 0.60 เปอร์เซ็นต์ และ *Sargassum* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.26 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 93.53 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.20)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 50.40, 46.16 และ 47.85 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (ตารางที่ 4.21)

ตารางที่ 4.20 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
25	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.06±0.01 ^d	89.86±0.41 ^c	2.89±0.04 ^d	64.11±0.81 ^e	3.19±0.05 ^d	70.75±0.80 ^d
30	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.21±0.06 ^c	90.88±0.37 ^c	3.76±0.09 ^c	81.10±0.86 ^d	3.74±0.09 ^c	80.77±0.99 ^c
35	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.35±0.05 ^{bc}	93.21±0.46 ^d	3.95±0.07 ^b	84.68±0.52 ^c	3.81±0.07 ^c	81.55±0.76 ^c
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.35±0.05 ^{abc}	96.12±0.35 ^{ab}	4.00±0.05 ^b	88.28±0.52 ^b	3.90±0.04 ^c	86.11±0.41 ^b
45	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.49±0.03 ^a	94.82±0.45 ^{bc}	4.25±0.01 ^a	89.64±0.32 ^b	4.08±0.04 ^b	86.07±0.38 ^b
50	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.44±0.04 ^{ab}	97.41±0.18 ^a	4.26±0.06 ^a	93.38±0.60 ^a	4.22±0.04 ^{ab}	92.59±0.33 ^a
55	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.32±0.05 ^{bc}	94.65±0.77 ^c	4.08±0.04 ^b	89.40±0.66 ^b	4.27±0.04 ^a	93.53±0.57 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.21 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีน

สาหร่าย	ΔH	ΔS	ΔG						
			25	30	35	40	45	50	55
<i>Padina</i> sp.	50.40	0.19	-5.16	-6.09	-7.02	-7.96	-	-9.82	-
<i>Turbinaria</i> sp.	46.16	0.16	-	-3.59	-4.41	-5.23	-6.05	-6.87	-
<i>Sargassum</i> sp.	47.85	0.17	-2.36	-3.20	-4.04	-4.88	-	-6.57	-7.41

ΔH , ΔS และ ΔG (กิโลจูลต่อโมล)

หมายเหตุ - ไม่ได้หาค่า

4.2.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวมเบเนฟิเคเรด

การดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่า *A. platensis* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 93.45 ± 0.76 และ 93.39 ± 0.60 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) สามารถกำจัดสีเขียวมเบเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 87.90 ± 0.34 และ 87.90 ± 0.34 เปอร์เซ็นต์ ส่วน *C. lentillifera* มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเท่ากับ 70.89 ± 0.65 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีเขียวมเบเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 75.93 ± 0.43 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.22)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 38.04, -41.25 และ 35.83 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (ตารางที่ 4.23)

ตารางที่ 4.22 ค่าการดูดซับสีเขียวเบนเนฟิคโดยสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
25	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	63.02±0.51 ^c	70.94±0.59 ^c	41.17±0.65 ^f	45.57±0.77 ^f	64.09±0.06 ^a	70.94±0.59 ^f
30	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	68.32±1.66 ^d	75.04±0.56 ^c	61.85±1.03 ^d	65.02±0.91 ^c	71.37±0.38 ^f	75.04±0.56 ^c
35	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	71.11±1.35 ^d	80.18±0.46 ^d	70.89±0.65 ^a	75.93±0.43 ^a	74.85±0.65 ^c	80.18±0.46 ^d
40	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	77.88±0.48 ^c	83.75±0.59 ^c	70.24±0.54 ^a	72.019±0.42 ^b	81.68±0.72 ^d	83.75±0.59 ^c
45	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	87.34±0.51 ^b	85.91±0.56 ^b	67.11±1.15 ^b	65.20±0.91 ^c	88.41±0.33 ^b	85.91±0.56 ^b
50	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	93.45±0.76 ^a	87.90±0.34 ^a	64.42±0.96 ^c	60.63±0.69 ^d	93.39±0.60 ^a	87.90±0.34 ^a
55	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	90.14±1.07 ^b	79.44±0.36 ^b	58.04±0.46 ^e	54.44±0.56 ^c	84.71±0.37 ^c	79.44±0.36 ^d

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.23 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครด

สาหร่าย	ΔH	ΔS	ΔG						
			25	30	35	40	45	50	55
<i>A. platensis</i>	38.04	0.13	-1.81	-2.48	-3.15	-3.82	-4.49	-5.16	-
<i>C. lentilifera</i>	-41.25	-0.12	-	-	2.98	2.36	1.74	1.12	0.50
<i>G. fisheri</i>	35.83	0.13	-2.23	-2.87	-3.51	-4.14	-4.78	-5.42	-

* ΔH , ΔS และ ΔG (กิโลจูลต่อโมล)

หมายเหตุ - ไม่ได้หาค่า

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 45-50 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 55 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.18, 4.20, และ 4.22) การดูดซับลดลงอาจเนื่องมาจากบริเวณผิวหน้าสาหร่ายถูกทำลายด้วยความร้อนจึงส่งผลให้ตำแหน่งที่จับกับสีย้อมเสียสภาพทำให้การดูดซับลดลง (Marunreung and Pavasant, 2006) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาคั้งนี้ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ไม่ได้ส่งผลให้การดูดซับลดลงมากนักอาจเนื่องมาจากการทำลายผิวหน้าเซลล์สาหร่ายอาจเกิดเป็นบางส่วน และยังพบว่าในการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครดโดยสาหร่าย *Rhizoclonium* sp. และการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Sargassum* sp. ค่าการดูดซับยังคงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 55 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.18 และ 4.20) แสดงว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ยังไม่สูงพอที่จะส่งผลต่อผิวหน้าสาหร่าย *Rhizoclonium* sp. และ *Sargassum* sp. ในการดูดซับสีย้อมดังกล่าว ยกเว้นในการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครดโดยสาหร่าย *C. lentilifera* ที่มีการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าระดับนี้มีค่าการดูดซับลดลง (ตารางที่ 4.22)

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้น ไม่มีผลต่อการดูดซับ และอุณหภูมียังมีผลเกี่ยวข้องต่อการดูดซับสีย้อมของสิ่งมีชีวิต โดยความเร็วของปฏิกิริยาหรือ rate of chemical reaction จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Ledin, 2000) ส่วนใหญ่แล้วความสามารถในการบำบัดหรือดูดซับสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ การดูดซับจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Wild, 1993) แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยพบว่าถ้ามีค่าเอนทัลปี (ΔH) เป็นลบนั้นคือเป็นการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้ำแบบ exothermic (คายความร้อน) คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มค่าการดูดซับจะลดลง ถ้าเอนทัลปีเป็นบวกนั้นคือเป็นการดูดซับแบบ endothermic (ดูดความร้อน) คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) ใช้ทำนายทิศทางของปฏิกิริยาเคมี ถ้าพลังงานอิสระกิบส์เป็นลบปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้ (spontaneous nature of biosorption) เพราะมีพลังงานเพียงพอในการดูดซับ ถ้าพลังงานกิบส์เป็นศูนย์แสดงว่าระบบอยู่ในสมดุล ถ้าพลังงานกิบส์เป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้หรือเกิดขึ้นแบบย้อนกลับ ส่วนค่าเอนโทรปี (ΔS) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบหรือความสับสนของระบบ ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะยิ่งมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะยิ่งมีค่าต่ำ

จากการศึกษาในครั้งนี้หากพิจารณาค่าเอนทัลปีพบว่า การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด มาลาไลท์กรีน และเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่ายทุกชนิดมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.19, 4.21 และ 4.23 และภาคผนวก ง) ยกเว้นการดูดซับสีย้อมเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่าย *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะลดลง และค่าเอนโทรปีพบว่า การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด มาลาไลท์กรีน และเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่ายทุกชนิดมีค่าเป็นบวกแสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มการสุมจับหรือ ไม่มีการเลือกตำแหน่งยึดจับระหว่างผิวตัวดูดซับกับสีย้อมในสารละลาย ยกเว้นการดูดซับสีย้อมเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่าย *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นลบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับลดลงเนื่องจากการลดการสุมจับหรือมีการเลือกตำแหน่งยึดจับระหว่างผิวตัวดูดซับกับสีย้อมในสารละลายมากขึ้นในสาหร่ายชนิดนี้ หรือหากพิจารณาค่าพลังงานอิสระกิบส์ พบว่าการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด มาลาไลท์กรีน และเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่ายทุกชนิดมีค่าเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้ (ตารางที่ 4.19, 4.21 และ 4.23) ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิยิ่งทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ ยกเว้นการดูดซับสีย้อมเบเนฟิเดเรด โดยสาหร่าย *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นบวก (ตารางที่ 4.23) แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้หรือเกิดขึ้นแบบย้อนกลับนั่นคือการลดอุณหภูมิทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ในการศึกษารั้งนี้พบว่าค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ในสาหร่ายทุกกลุ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับในการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด แต่สาหร่ายกลุ่มสีเขียวในการดูดซับสีย้อมเบเนฟิเดเรดมีค่าตรงข้ามจากผลการทดลองดังกล่าว

ในหลายๆ การศึกษามักใช้ค่าเอนทัลปีหรือพลังงานอิสระกิบส์ในการพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เนื่องจากอธิบายได้ง่ายว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีลักษณะอย่างไร เช่น รายงานการศึกษาของ Marungrueng and Pavasant (2006) ซึ่งทำการศึกษาค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีย้อม Astrazon blue FGRL ของสาหร่าย *C. lentillifera* ที่อุณหภูมิ 18, 27, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเป็นบวกซึ่งเท่ากับ 14.87 กิโลจูลต่อโมล โดยไม่นำอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มาคิด เนื่องจากผนังเซลล์สาหร่ายถูกทำลายโดยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาของ Aravindhan *et al.* (2007) ซึ่งค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีเบสิก Yellow dye ของสาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* พบว่าค่าเอนทัลปีเท่ากับ -3.306 กิโลจูลต่อโมล จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิด AR 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ที่อุณหภูมิ ระดับ 20, 25, 30, 35, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าสูงสุดที่ดูดซับสีย้อมได้คือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสแต่ความสามารถ ในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้น ให้บริเวณผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าการดูดซับลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า กระบวนการดูดซับสีย้อม AR 274 โดยสาหร่าย *E. prolifera* มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา (คาย ความร้อน) ในธรรมชาติ ของการดูดซับสีย้อมทางชีวภาพ (Ozer *et al.* 2005a) โดยมีค่าพลังงาน อิสระกิบส์ -5.28, -4.67, -4.06 และ -2.83 กิโลจูลต่อโมล การใช้พืชน้ำ *Azolla rongpong* ดูดซับสี ย้อมแอซิด ได้แก่ แอซิดเรด 88 (acid red 88), แอซิดกรีน 3 (acid green 3), แอซิดออเรนจ์ 7 (acid orange 7) และแอซิดบลู (acid blue 15) ที่พื้นปรุอุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณ เซลล์ 4 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 30 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับสูงสุดซึ่งเท่ากับ 81.30, 83.33, 76.92 และ 76.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าเอนทัลปีเป็นบวกซึ่งเท่ากับ 21.83, 30.98, 25.82 และ 15.23 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (Padmesh *et al.* 2006) การดูดซับสีย้อมมาลา ไคท์กรีน โดยสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ *Pithophora* sp. ที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วหาค่า พลังงานอิสระกิบส์พบว่าพลังงานอิสระเป็นลบมีค่าเท่ากับ -8.585 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าการดูด ซับเกิดขึ้นได้เอง (Kumar *et al.* 2005)

การใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 298, 308 และ 318 องศาเคลวิน พบว่ามีค่าพลังงานอิสระกิบส์เป็นลบมีค่า เท่ากับ -7.1, -9.8 และ -10.9 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ และค่าเอนทัลปีเป็นบวกเท่ากับ 49.6 กิโลจูล ต่อโมล ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 318 องศาเคลวินหรือ 45 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับเท่ากับ 25.67 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Bekci *et al.* 2009) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ดูดซับ มาลาไคท์กรีนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 298, 298 และ 318 องศาเคลวิน พบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 9.074, 9.452 และ 9.302 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Tsai and Chen. 2010) การดูดซับ สีย้อมแอซิดเรด 337 (acid red 337) และแอซิดบลู 324 (acid blue 324) โดยสาหร่ายสีเขียว *Enteromorpha prolifera* ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการดูดซับ เท่ากับ 41.55, 61.32, 67.29, 63.73 และ 45.05 และ 32.93, 66.27, 53.57, 45.84 และ 36.22 มิลลิกรัม ต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อหาค่าพลังงานของแอซิดเรด 337 โดยใช้อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส และแอซิดบลู 324 โดยใช้อุณหภูมิ 25-50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเอนทัลปีเท่ากับ -13.58 และ -3.64 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (Ozer *et al.* 2005b) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ดูดซับสี

ย้อมรีแอคทีฟรีมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol red RR) และรีมาซอลโกลเดนที่เยลโลอาร์เอ็นแอล (Remazol golden yellow RNL) ที่ระดับอุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่า *C. vulgaris* ดูดซับสีย้อมทั้ง 2 สูงสุดที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 196.1 และ 71.9 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น *C. vulgaris* มีค่าการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ลดลง โดยมีค่าเอนทัลปีเท่ากับ -10.63 และ -23.15 กิโลจูลต่อโมล (Aksu and Tezer.2005) การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟรีมาซอลบิลเลียบบลูอาร์ (Remazol brilliant blue R) โดยสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus quadricauda* ที่ระดับอุณหภูมิ 20-45 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ 30 องศาเซลเซียส การดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 45.3 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่าระดับนี้ นอกจากนี้มีค่าพลังงานอิสระ 6.42 กิโลจูลต่อโมล (Ergene et al. 2009)

4.2.4 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

ทำการศึกษาผลของขนาดสาหร่ายต่อการดูดซับสีย้อมโดยใช้สาหร่ายขนาดน้อยกว่า 0.1, 0.1-0.24, 0.25-0.49 และ 0.5-1 มิลลิเมตร ในการศึกษา

4.2.4.1 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่ายที่ขนาดแตกต่างกันพบว่าขนาดสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.24) สามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้สูงสุดเท่ากับ 73.13 ± 0.66 , 63.24 ± 0.18 และ 80.83 ± 0.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ *C. lentillifera* และ *Rhizoclonium* sp. สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 34.03 ± 0.42 และ 29.43 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกับขนาดเซลล์ 0.1-0.24 มิลลิเมตร แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *G. fisheri* สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 37.61 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.24 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวมเบเนวอลเรดโดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
น้อยกว่า 0.1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	34.03±0.42 ^a	73.13±0.66 ^a	29.43±0.07 ^a	63.24±0.18 ^a	37.61±0.36 ^a	80.83±0.85 ^a
0.1-0.24	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	33.20±0.20 ^{ab}	71.35±0.41 ^b	28.61±0.35 ^a	61.49±0.52 ^b	35.29±0.33 ^b	75.83±0.70 ^b
0.25-0.49	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	32.84±0.34 ^b	70.58±0.46 ^{bc}	26.97±0.28 ^b	57.95±0.38 ^c	34.26±0.19 ^c	73.63±0.19 ^c
0.5-1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	32.34±0.11 ^b	69.50±0.08 ^c	25.98±0.29 ^c	55.82±0.39 ^d	32.13±0.07 ^d	69.05±0.43 ^d

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.4.2 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน

การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายที่ขนาดแตกต่างกันพบว่าขนาดสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.25) สามารถกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนออกจากสารละลายได้สูงสุดเท่ากับ 94.13 ± 0.36 , 90.33 ± 0.12 และ 90.90 ± 0.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 34.03 ± 0.42 , 4.08 ± 0.02 และ 4.10 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกับขนาดเซลล์ 0.1-0.49 มิลลิเมตร แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า 0.5-1 มิลลิเมตร ($p < 0.05$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม้ใส่สาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
น้อยกว่า 0.1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.25±0.02 ^a	94.13±0.36 ^a	4.08±0.02 ^a	90.33±0.12 ^a	4.10±0.02 ^a	90.90±0.11 ^a
0.1-0.24	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.18±0.03 ^a	92.61±0.28 ^b	4.05±0.03 ^a	89.62±0.16 ^a	4.08±0.02 ^a	90.36±0.16 ^a
0.25-0.49	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.18±0.02 ^a	92.55±0.10 ^b	4.01±0.03 ^{ab}	88.71±0.33 ^b	4.06±0.03 ^{ab}	90.02±0.19 ^a
0.5-1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	4.03±0.03 ^b	89.15±0.14 ^c	3.94±0.02 ^b	87.17±0.34 ^c	3.98±0.05 ^b	88.30±0.95 ^b

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.4.3 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครเรด

การดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรดโดยสาหร่ายที่ขนาดแตกต่างกันพบว่าขนาดสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.26) สามารถกำจัดสีข้อมเบเนวอลเรดออกจากสารละลายได้สูงสุดเท่ากับ 94.62 ± 0.21 , 88.35 ± 0.21 และ 99.26 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ *A. platensis* และ *G. fisheri* สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 92.77 ± 0.73 และ 97.32 ± 0.56 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกับขนาดเซลล์ 0.1-0.5 มิลลิเมตร แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์ที่มากกว่า 0.5-1 มิลลิเมตร ($p < 0.05$) ส่วน *C. lentillifera* สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 86.62 ± 0.59 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
น้อยกว่า 0.1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	92.77±0.73 ^a	94.62±0.21 ^a	86.62±0.59 ^a	88.35±0.21 ^a	97.32±0.56 ^a	99.26±0.09 ^a
0.1-0.24	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	92.15±0.65 ^{ab}	93.99±0.19 ^{ab}	84.05±0.54 ^b	85.73±0.06 ^b	96.31±0.42 ^a	98.23±0.26 ^b
0.25-0.49	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	91.14±0.76 ^{ab}	92.96±0.24 ^b	82.88±1.02 ^{bc}	84.53±0.59 ^c	96.15±0.72 ^a	98.06±0.11 ^b
0.5-1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	89.03±1.37 ^b	90.79±0.81 ^c	81.32±0.27 ^c	82.95±0.33 ^d	93.81±0.82 ^b	95.68±0.19 ^c

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษานี้พบว่า การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด โดย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* การดูดซับสีย้อมมาลาโคทกรีน โดย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด โดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ขนาดสาหร่ายน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับสูงสุด (ตารางที่ 4.24, 4.25 และ 4.26) โดยทั่วไปความสามารถในการดูดซับสีถูกควบคุมด้วยสองกลไก คือพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Punjongharn *et al.*, 2008) โดยขนาดสาหร่ายที่เล็กทำให้พื้นที่ผิวน้ำของสาหร่ายมีโอกาสสัมผัสโมเลกุลของสีย้อมในสารละลายมากกว่าสาหร่ายที่ขนาดใหญ่กว่า อนุภาคตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวโดยรวมทั้งหมดมากจึงสามารถกำจัดสีออกจากระบบได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่สอดคล้องกับ Punjongharn *et al.* (2008) ซึ่งทำการศึกษาผลของการความแตกต่างของขนาดสาหร่าย *C. lentillifera* โดยขนาดเล็ก (0.1-0.84 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (0.84-2 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (มากกว่า 2 มิลลิเมตร) ต่อการดูดซับสีเบสิกแอสตราซอน โกลเดนที่เยล โลจีแอลอี (Astrazon Golden Yellow GL-E) แอสตราซอนแอฟจีเออาร์แอลบลู (Astrazon FGRL Blue) และแอสตราซอนจีทีแอลเอ็นเรด (Astrazon GTLN Red) พบว่าสาหร่ายที่มีขนาดเล็กมีค่าการดูดซับสูงสุดและการดูดซับลดลงเมื่อขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีค่าการดูดซับสีแอสตราซอน โกลเดนที่เยล โลจีแอลอีของสาหร่ายแต่ละขนาดเท่ากับ 35.5, 27.4 และ 26.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับสีแอสตราซอนแอฟจีเออาร์แอลบลู 80.7, 70.4 และ 68.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และการดูดซับสีแอสตราซอนจีทีแอลเอ็นเรด 113.6, 76.9 และ 78.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และการใช้ไดอะโตมาเคียส (diatomaceous) จากสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมในการดูดซับสีย้อมเบสิกเมทีลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.13-1.87 มิลลิโมลต่อลิตร โดยขนาดของไดอะโตมาเคียสที่แตกต่างกันคือ 45-63, 200-500 และมากกว่า 500 ไมโครเมตร พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 27.8, 17.4 และ 13.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Shawabkeh and Tutunji, 2003) การใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (rhodamine B) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขนาดที่แตกต่างกันระหว่างสาหร่ายรูปแบบที่ไม่บดเป็นผงและรูปแบบที่บดเป็นผง พบว่าสาหร่ายในรูปแบบที่บดเป็นผงมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่ารูปแบบที่ไม่บดเป็นผง โดยสาหร่ายสามารถดูดซับโรดามีนบีได้ 96 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Hii *et al.* 2009)

นอกจากนี้การใช้พีชกลุ่มเฟรีนดูดซับสีย้อมเบสิกเรด 13 (Basic red 13) ที่มีความเข้มข้น 25-180 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ขนาดแตกต่างกัน 38-45, 74-88, 104-124 ไมโครเมตร พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 1.01, 0.844 และ 0.778 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ (Ho *et al.* 2005)

4.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาอันดับของปฏิกิริยา และขึ้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา จากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยการคัดเลือกสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูง ง่าย และมีปริมาณมากจากธรรมชาติ จากข้อ 4.1.3 มา 3 ชนิด ได้แก่ การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเตรดโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri* และนำมาศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.3.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri*

การพิจารณาว่าสาหร่ายมีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นอันดับใดพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (x) ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา

โดยอันดับของปฏิกิริยาใดที่มีค่า x สูงกว่าคืออันดับปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายชนิดนั้นๆ การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนกัน (ตารางที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 และภาพที่ 4.25, 4.26 และ 4.27) และอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสองมีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขึ้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 4.30, 4.31 และ 4.32 และภาพที่ 4.28, 4.29 และ 4.30)

ตารางที่ 4.27 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดย *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นของ สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตรต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
10	5.0666	0.7755	37.2627	0.9989
20	8.2908	0.9159	20.9348	0.9997
40	5.5272	0.8785	6.7875	0.9987
80	8.7514	0.7449	8.6399	1
160	7.8302	0.9483	2.3876	0.9991
240	4.8363	0.7077	3.0984	0.9995
320	6.6787	0.8323	2.8409	0.9999
400	5.2969	0.6009	4.0083	0.9999

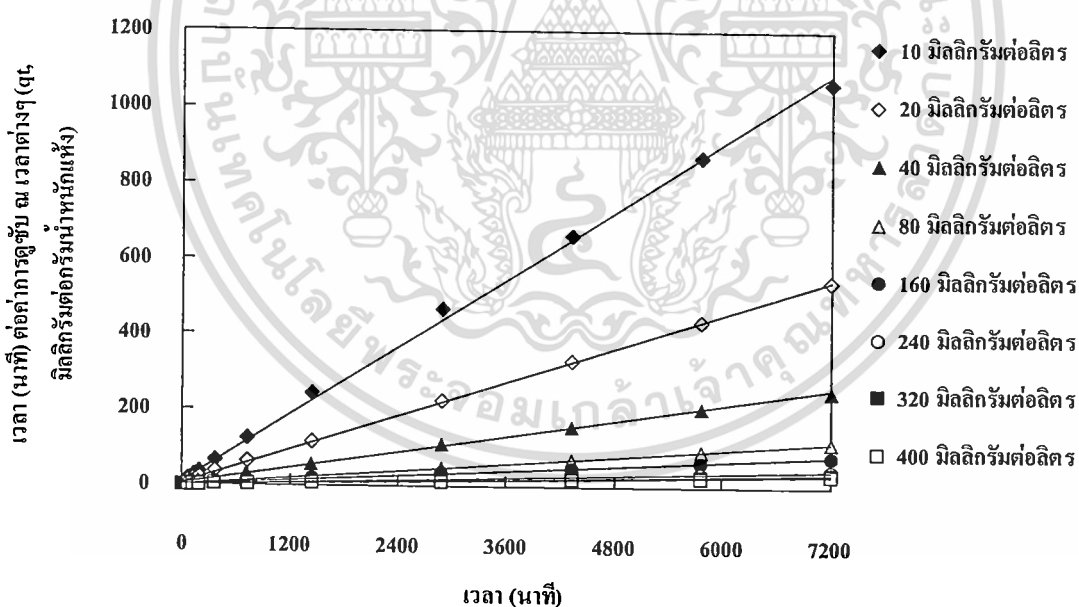
ตารางที่ 4.28 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดย *Rhizoclonium* sp.

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
10	5.9878	0.7299	69.3776	0.9998
20	7.5999	0.8533	31.8701	0.9998
40	7.8302	0.8926	15.3641	0.9998
80	7.1393	0.7887	9.7540	0.9998
160	8.2908	0.7473	5.2134	0.9999
240	8.5211	0.8851	2.0771	0.9998
320	7.3696	0.856	2.0474	0.9998
400	6.6787	0.8628	0.9093	0.9994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

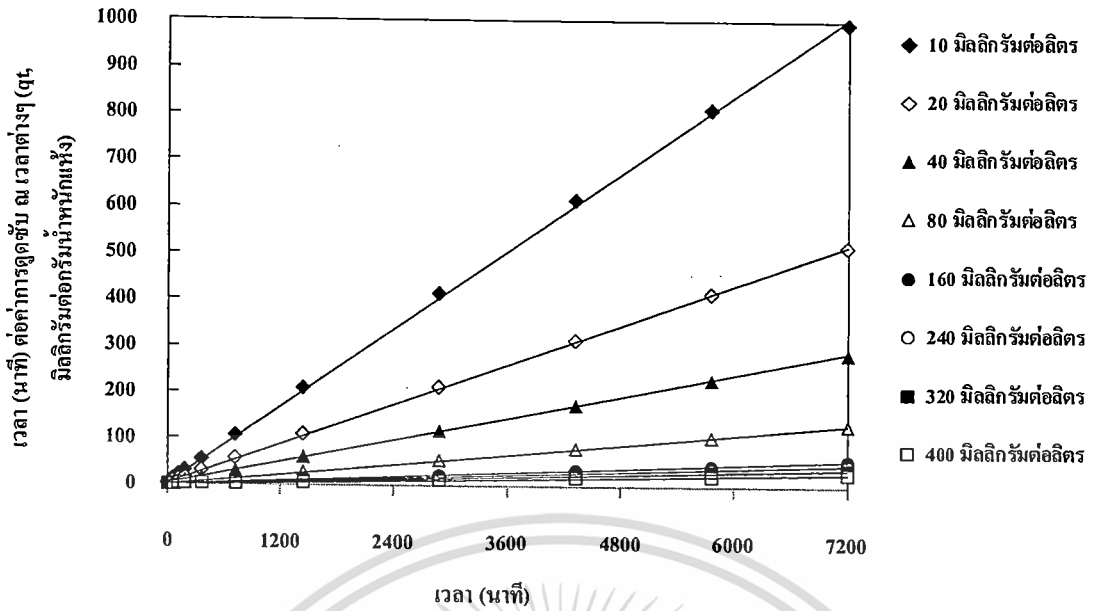
ตารางที่ 4.29 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวของเบนเนออลเรดโดย *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	$-k$ ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	$-r$	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อมิลลิกรัม ต่อนาที)	r
10	8.0605	0.6357	47.1735	0.9998
20	9.6726	0.7744	20.2614	0.9998
40	8.0605	0.6027	21.1438	1
80	6.2181	0.6856	7.0382	0.9996
160	7.5999	0.7503	3.5892	0.9999
240	7.5999	0.7609	1.4830	0.9996
320	8.2908	0.7798	1.6348	0.9999
400	7.3696	0.801	0.9890	0.9996

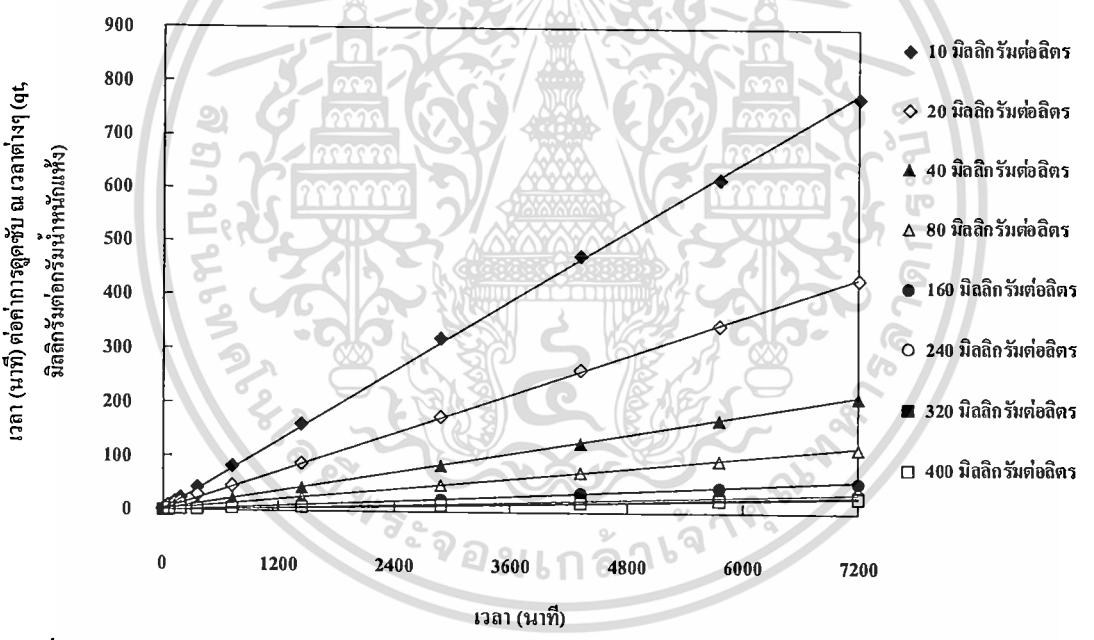


ภาพที่ 4.25 ปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวของเบนเนออลเรดโดย *Caulerpa lentillifera*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.26 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด โดย *Rhizoclonium* sp.



ภาพที่ 4.27 ปฏิกริยาอันดับที่สองเหมือนของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด โดย *Gracilaria fisheri*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
10	0.0103	0.2664	0.1871
20	0.0044	0.4442	0.1936
40	0.0133	1.4402	0.2751
80	0.0119	4.7789	0.9603
160	0.0116	5.3353	1.2510
240	0.0062	4.4820	2.1242
320	0.0086	7.0899	0.6908
400	0.0051	8.2534	1.2356

ตารางที่ 4.31 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Rhizoclonium* sp.

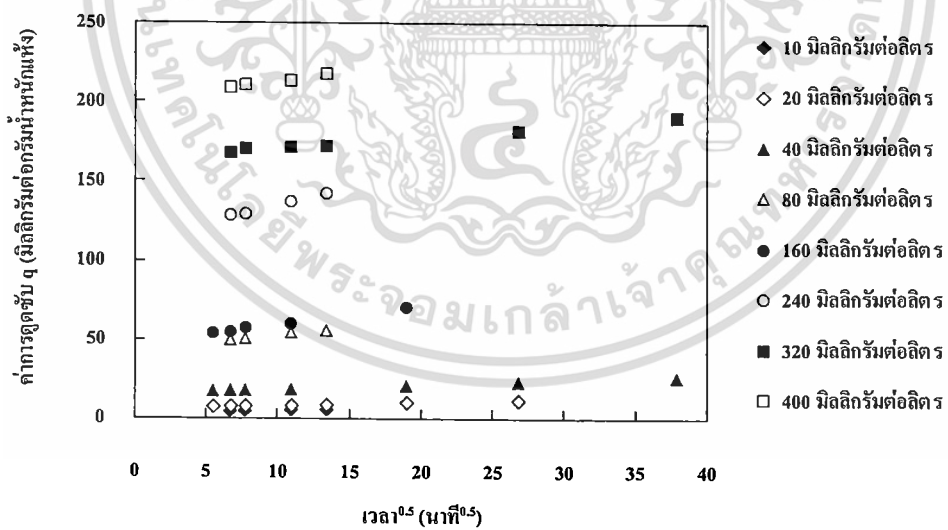
ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
10	0.0114	0.2522	0.1000
20	0.0081	0.8035	0.3232
40	0.0024	1.1438	0.4122
80	0.0054	0.6267	1.1822
160	0.0076	3.8388	3.9659
240	0.0038	2.4510	1.9809
320	0.0060	7.1641	2.4540
400	0.0099	12.5672	3.9238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

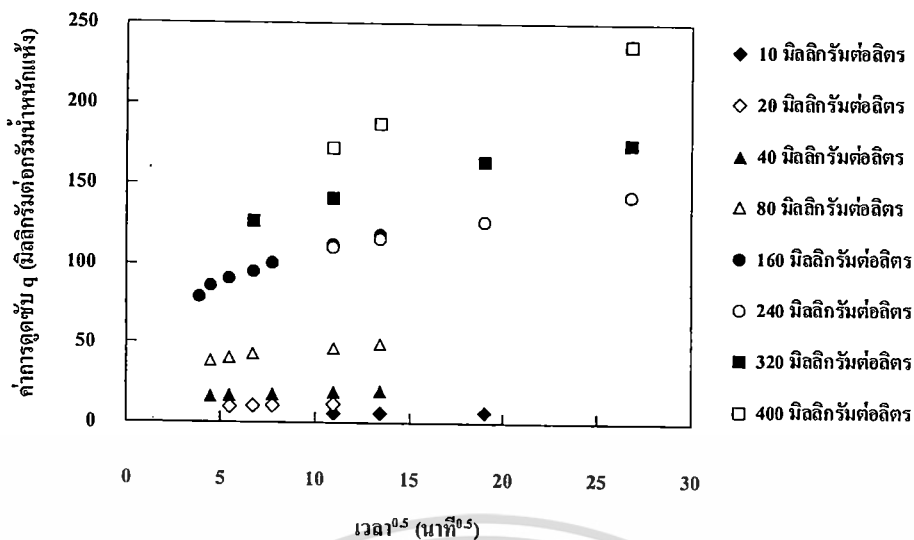
ตารางที่ 4.32 ความเข้มข้นของสีย้อมเบเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
10	0.0276	1.4077	0.1327
20	0.0086	0.8636	0.2764
40	0.0066	0.8397	1.7719
80	0.0651	14.0942	1.9393
160	0.0070	3.4716	2.9175
240	0.0192	8.8677	4.3714
320	0.0051	9.7431	4.2034
400	0.0025	14.9518	5.7555

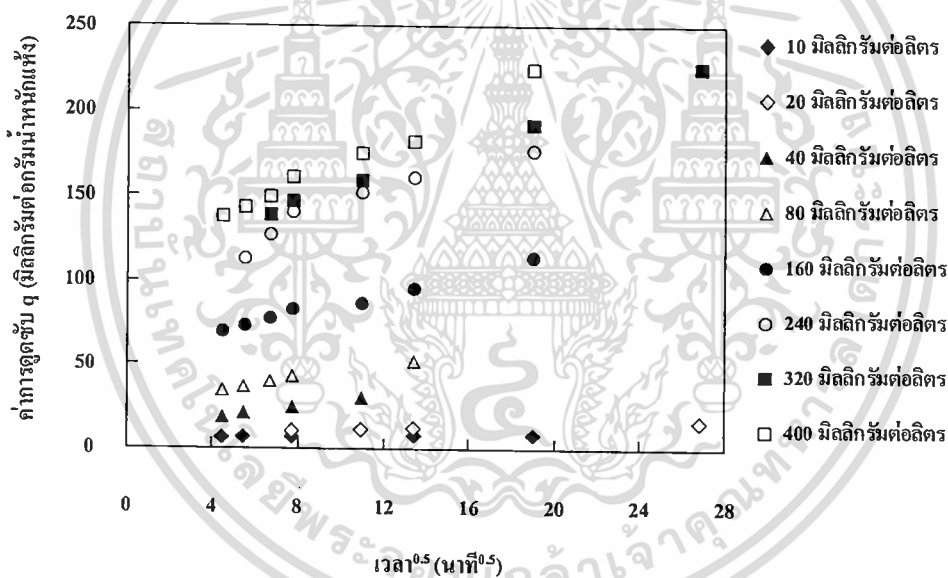


ภาพที่ 4.28 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera* ของการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดช่วงที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Rhizoclonium* sp. ของการดูดซับสี่ข้อมเบเนวอลเรดช่วงที่สอง



ภาพที่ 4.30 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri* ของการดูดซับสี่ข้อมเบเนวอลเรดช่วงที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina sp.*, *Turbinaria sp.* และ *Sargassum sp.*

การดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนโดย *Turbinaria sp.*, *Padina sp.* และ *Sargassum sp.* มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (ตารางที่ 4.33, 4.34 และ 4.35 และภาพที่ 4.31, 4.32 และ 4.33) และอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสองมีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 4.36, 4.37 และ 4.38 และภาพที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 และ)

ตารางที่ 4.33 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนโดย *Padina sp.*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	$-k$ ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	$-r$	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
1	6.6787	0.6287	1601.0352	1
2.5	6.9090	0.8145	246.3160	0.9999
5	7.8302	0.7416	196.3734	1
10	7.1393	0.7401	70.0155	0.9999
20	6.6787	0.7402	39.8810	0.9999
40	8.2908	0.8634	14.1461	0.9999
60	11.2847	0.7098	17.7134	1
100	8.2908	0.7704	5.5029	0.9999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

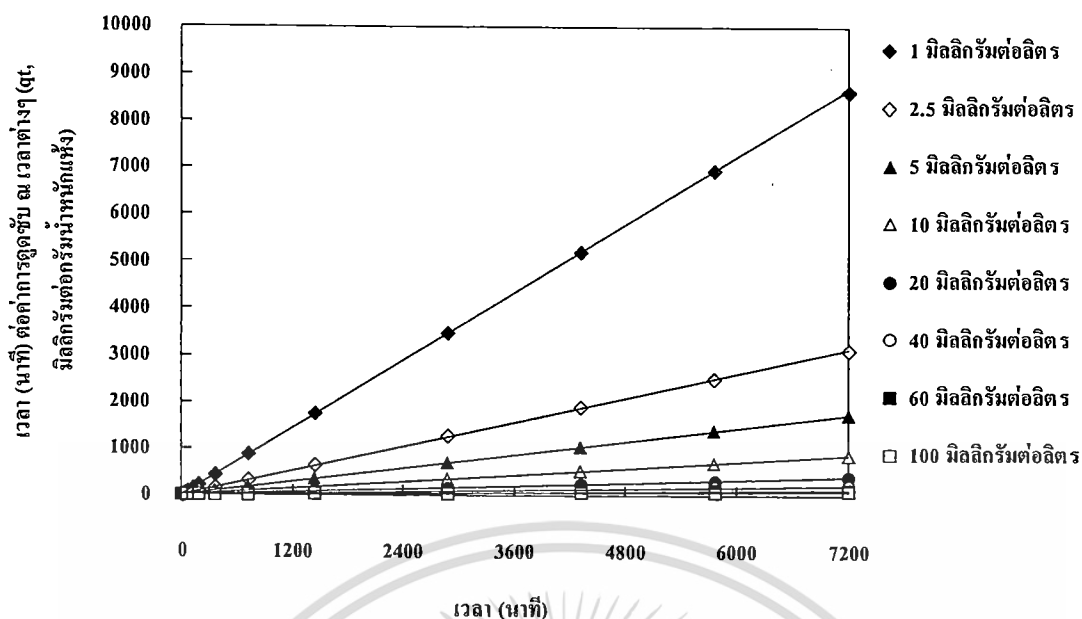
ตารางที่ 4.34 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดย *Turbinaria* sp.

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
1	8.5211	0.8233	703.6307	0.9999
2.5	8.0605	0.7411	474.6441	1
5	7.5999	0.7695	116.0035	0.9999
10	8.5211	0.7857	66.6406	1
20	8.7514	0.5969	71.6522	1
40	8.5211	0.8554	13.9561	0.9999
60	9.212	0.8025	8.8348	1
100	10.3635	0.7776	5.3311	1

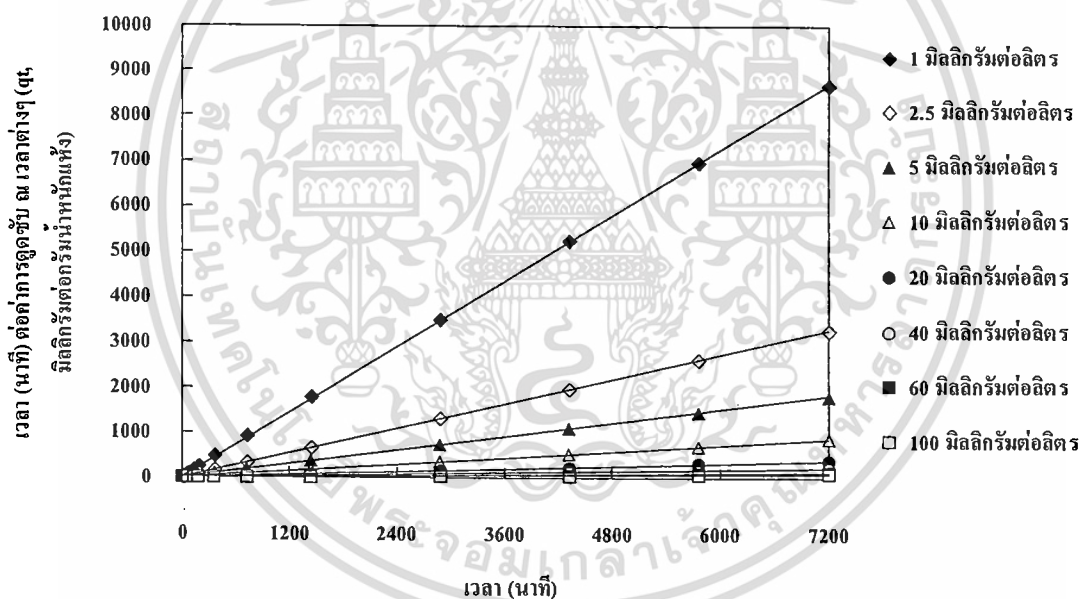
ตารางที่ 4.35 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดย *Sargassum* sp.

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
1	7.1393	0.7349	749.1763	0.9999
2.5	6.2181	0.6946	322.5669	0.9999
5	8.5211	0.7365	130.0311	0.9999
10	7.8302	0.7539	62.3557	0.9999
20	8.9817	0.7084	63.568	1
40	10.5938	0.7889	17.4893	0.9999
60	9.212	0.7999	12.2613	0.9999
100	9.212	0.7455	7.4926	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

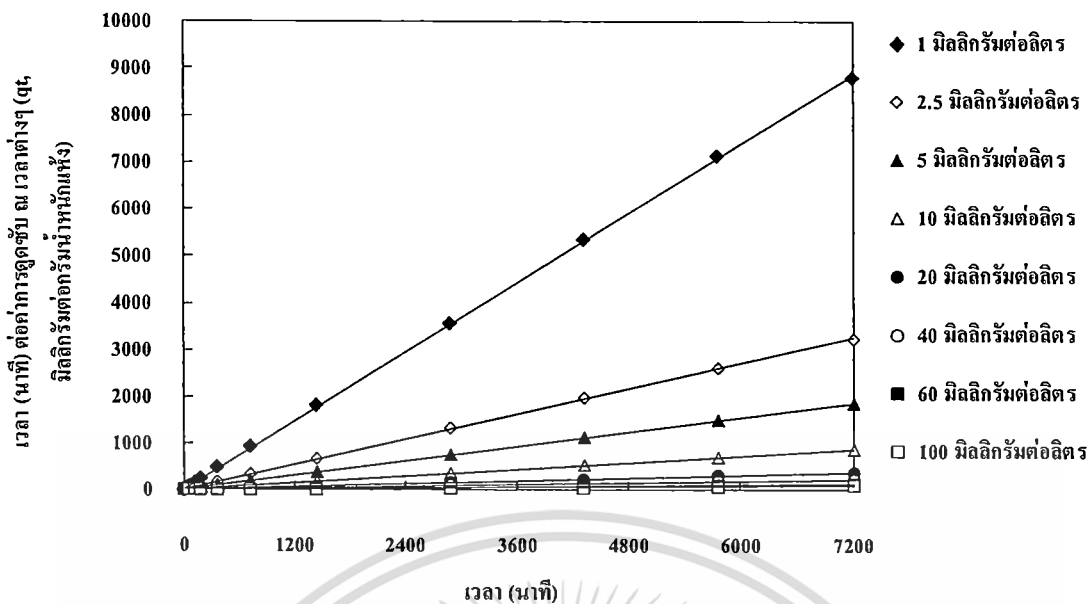


ภาพที่ 4.31 ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีน โดย *Padina* sp.



ภาพที่ 4.32 ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีน โดย *Turbinaria* sp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีน โดย *Sargassum* sp.

ตารางที่ 4.36 ความเข้มข้นของสีเขียวมมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Padina* sp.

ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม		การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก	การดูดซับช่วงแรก	การดูดซับช่วงที่สอง	
	(นาฬิกา ⁻¹)	(มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาฬิกา ^{-0.5})	(มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาฬิกา ^{-0.5})	
1	0.0064	0.0228	0.0355	
2.5	0.0063	0.0287	0.0714	
5	0.0207	0.4034	0.2549	
10	0.0211	0.5537	0.1991	
20	0.0091	1.2171	0.8390	
40	0.0175	2.7622	0.8390	
60	0.0196	7.7845	4.9849	
100	0.0245	6.8267	4.5951	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.37 ความเข้มข้นของสีเขียวมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Turbinaria* sp.

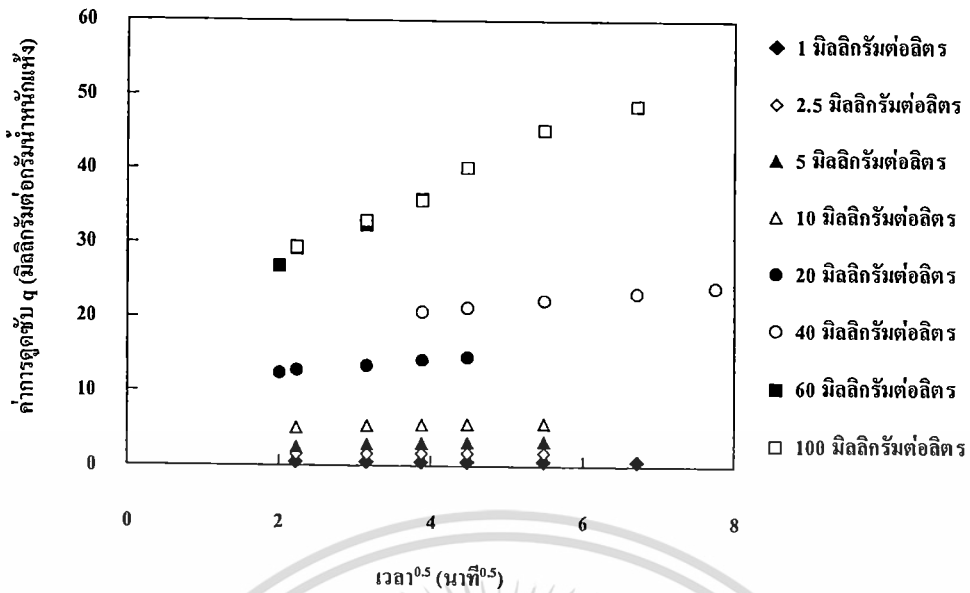
ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
1	0.0147	0.0493	0.0144
2.5	0.0210	0.1691	0.0504
5	0.0190	0.2834	0.1134
10	0.0122	0.6947	0.2397
20	0.0137	1.2741	1.3508
40	0.0556	5.9303	0.6715
60	0.0334	6.0995	1.9266
100	0.0142	5.8773	4.2719

ตารางที่ 4.38 ความเข้มข้นของสีเขียวมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Sargassum* sp.

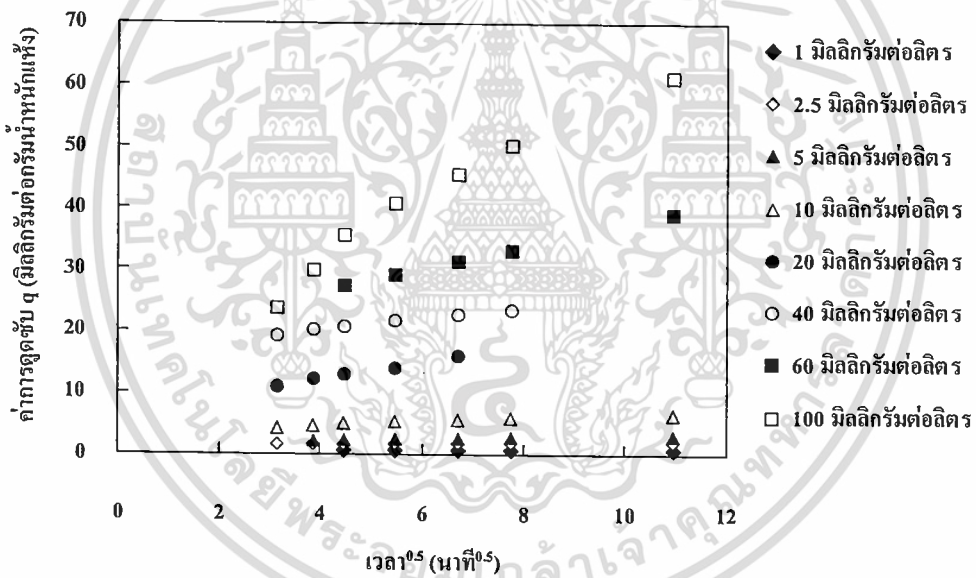
ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
1	0.0183	0.0778	0.0264
2.5	0.0216	0.1683	0.0529
5	0.0220	0.2455	0.1808
10	0.0234	0.6867	0.4534
20	0.0139	1.1310	0.9952
40	0.0381	3.4645	1.5556
60	0.0198	6.6219	1.3910
100	0.0145	6.8876	7.0834

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

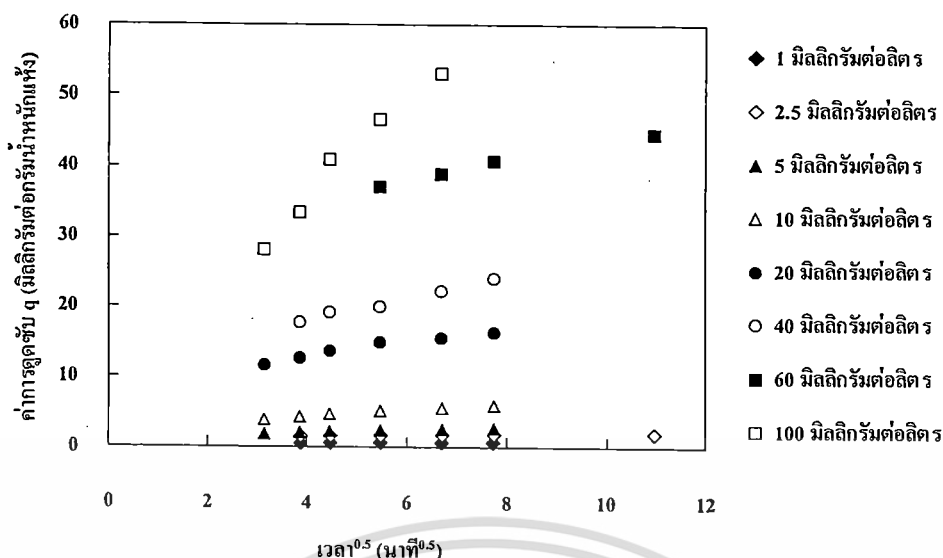


ภาพที่ 4.34 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Padina* sp. ของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง



ภาพที่ 4.35 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Turbinaria* sp. ของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.36 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Sargassum* sp. ของการดูดซับสี่ข้อมมาลาไคท์กรีนช่วงที่สอง

4.3.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับสี่ข้อมเบนเฟลเกรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri*

การดูดซับสี่ข้อมเบนเฟลเกรดโดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (ตารางที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 และภาพที่ 4.37, 4.38 และ 4.39) และ *C. lentillifera* มีอัตราเร็วของการดูดซับขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรก (ตารางที่ 4.43 และภาพที่ 4.41) *A. platensis* และ *G. fisheri* มีอัตราเร็วของการดูดซับขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสองมีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 4.42 และ 4.44 และภาพที่ 4.40 และ 4.42)

ตารางที่ 4.39 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีเขียวเบนเฟิครด โดย *Arthrospira platensis*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k (x10 ⁻⁴ ลิตร ต่อนาที)	-r	k (x10 ⁻⁴ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
10	6.6787	0.5958	61.8459	0.9998
20	6.6787	0.5131	43.908	0.9999
40	8.5211	0.4709	46.8587	1
80	8.5211	0.8071	5.4411	0.9998
160	8.9817	0.7265	3.1243	1
240	11.9756	0.7497	2.1758	1
320	9.6726	0.6966	1.3912	1
400	8.0605	0.6027	0.9689	0.9999

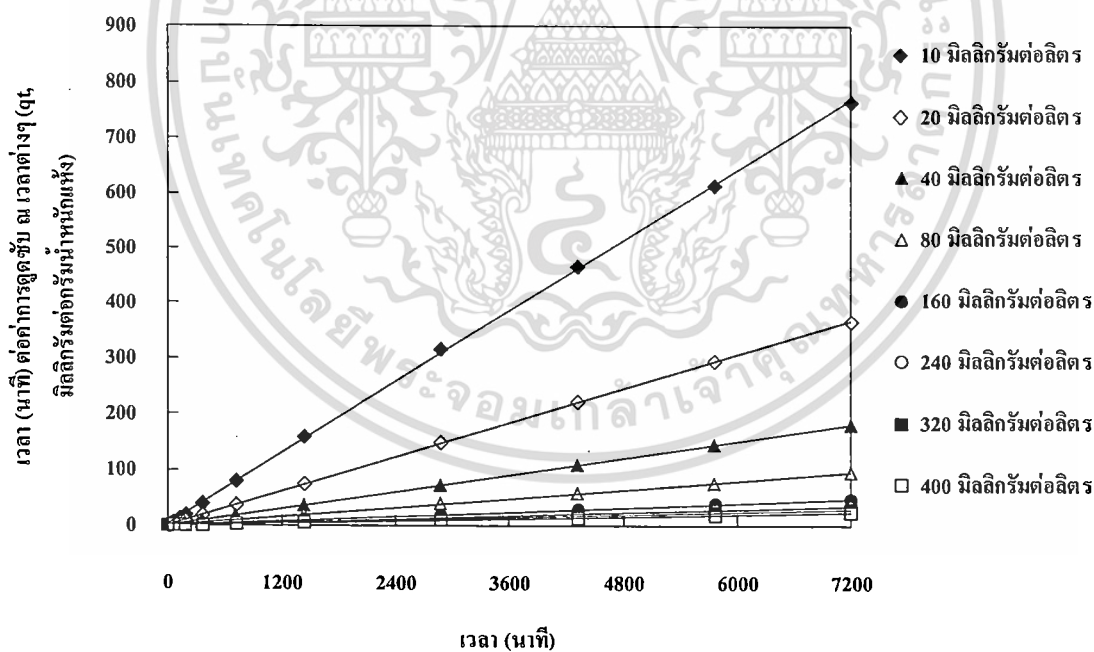
ตารางที่ 4.40 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีเขียวเบนเฟิครด โดย *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k (x10 ⁻⁴ ลิตร ต่อนาที)	-r	k (x10 ⁻⁴ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	r
10	5.5272	0.568	52.9018	0.9995
20	5.9878	0.7243	15.8798	0.9994
40	10.3635	0.7889	11.2239	1
80	10.5938	0.805	4.7311	0.9999
160	8.0605	0.746	1.6375	0.9998
240	8.0605	0.6961	1.2105	0.9999
320	7.5999	0.7013	1.1582	0.9998
400	8.7514	0.6595	1.1857	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

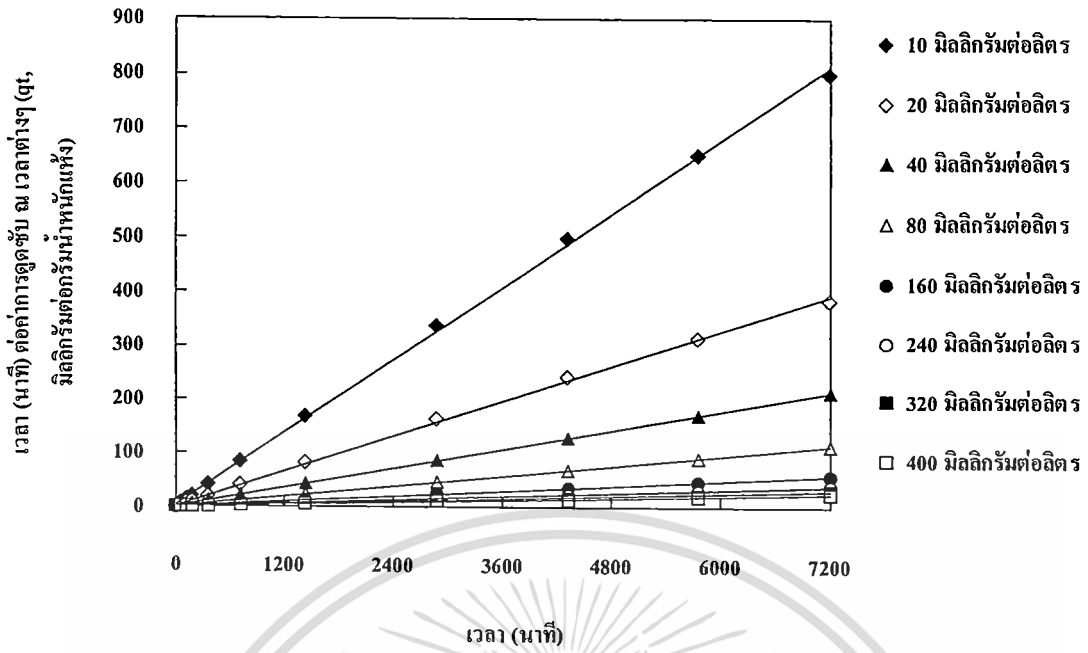
ตารางที่ 4.41 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีย้อมเบนเฟคเรด โดย *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นของ สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อ นาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อ นาที)	r
10	5.5272	0.3889	216.9914	1
20	6.909	0.3494	131.1899	1
40	7.3696	0.6136	41.1475	1
80	8.5211	0.6526	25.1646	1
160	9.4423	0.6298	9.3326	1
240	9.6726	0.7968	2.6750	0.9999
320	8.9817	0.7124	2.7405	1
400	9.9029	0.7356	1.6333	1

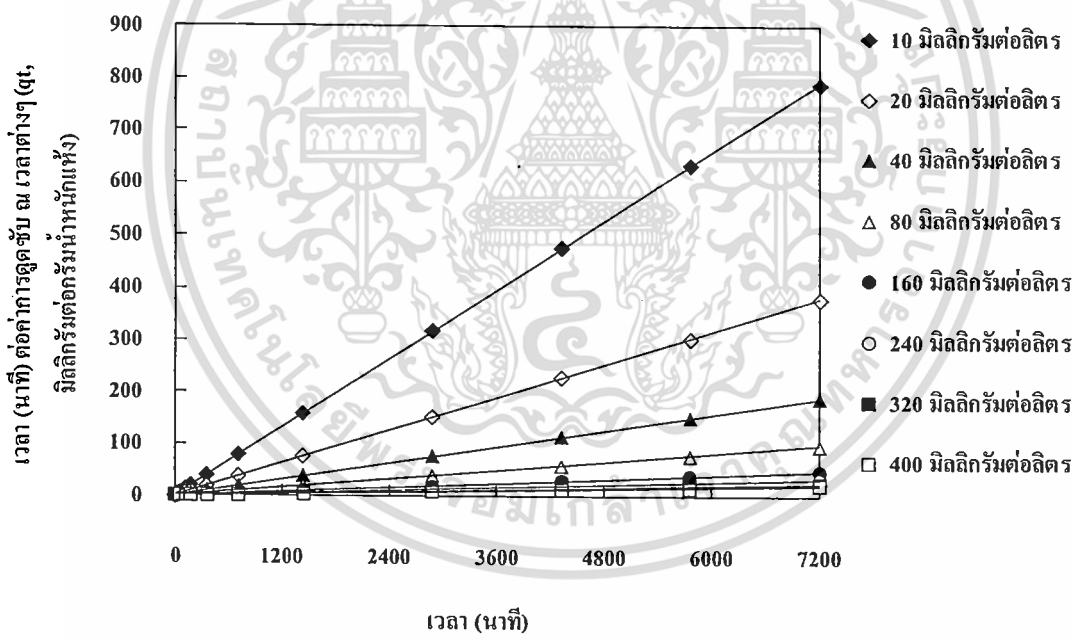


ภาพที่ 4.37 ปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีย้อมเบนเฟคเรด โดย *Arthrospira platensis*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.38 ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิแคเรด โดย *Caulerpa lentillifera*



ภาพที่ 4.39 ปฏิกริยาอันดับที่สองเสมือนของการดูดซับสีเขียวอมเบเนฟิแคเรด โดย *Gracilaria fisheri*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.42 ความเข้มข้นของสีย้อมเบนเฟนิกเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Arthrospira platensis*

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม		การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	
10	0.0672	1.7339	0.6661	
20	0.0354	3.5682	2.2921	
40	0.0291	6.9547	1.4247	
80	0.0187	9.1532	1.9148	
160	0.0216	13.6005	8.6580	
240	0.0168	17.8758	11.3900	
320	0.0169	18.2201	13.8173	
400	0.0155	20.3107	23.1696	

ตารางที่ 4.43 ความเข้มข้นของสีย้อมเบนเฟนิกเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera*

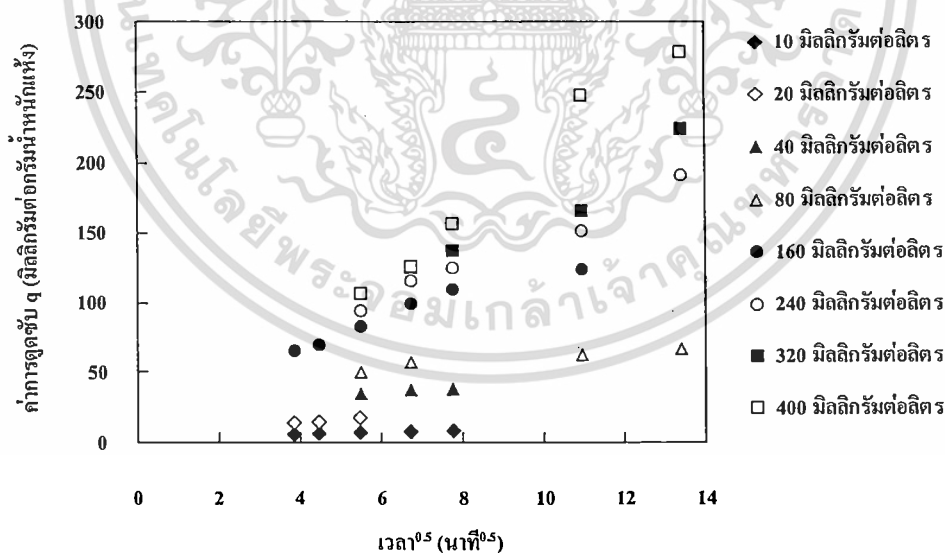
ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม		การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	
10	0.0778	2.2426	1.0057	
20	0.0498	2.7149	1.4433	
40	0.0226	2.1698	2.2867	
80	0.0148	3.8444	3.9840	
160	0.0143	7.1836	5.6414	
240	0.0131	6.4991	13.1668	
320	0.0173	13.5157	22.0181	
400	0.0177	23.0273	29.3678	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

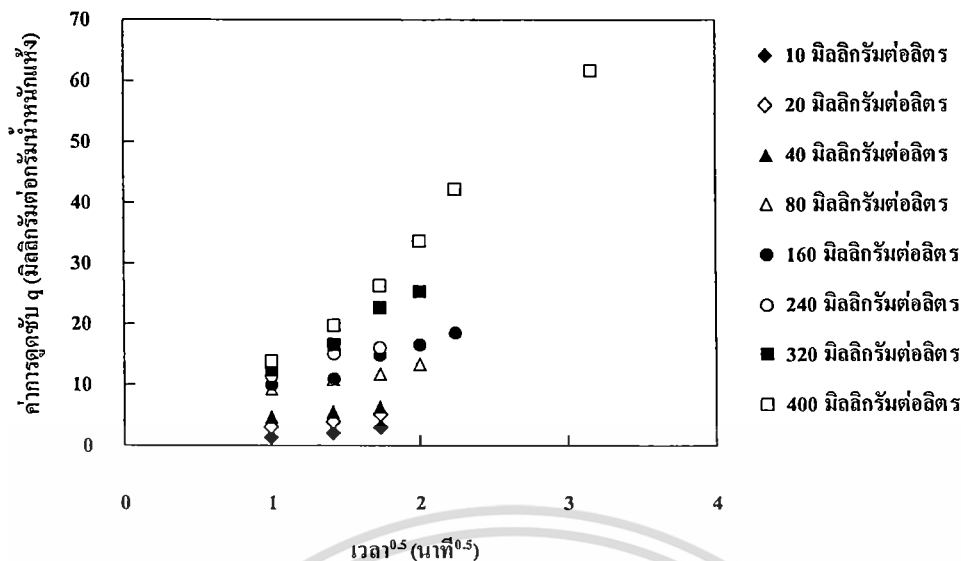
ตารางที่ 4.44 ความเข้มข้นของสีย้อมเบนเฟิลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})
10	0.0699	2.1401	0.4680
20	0.0567	3.5918	2.8110
40	0.0566	7.1188	0.5683
80	0.0296	5.6975	2.5890
160	0.0300	12.2549	6.2967
240	0.0214	16.2238	12.2192
320	0.0383	26.5152	9.5777
400	0.0310	26.7156	16.4660

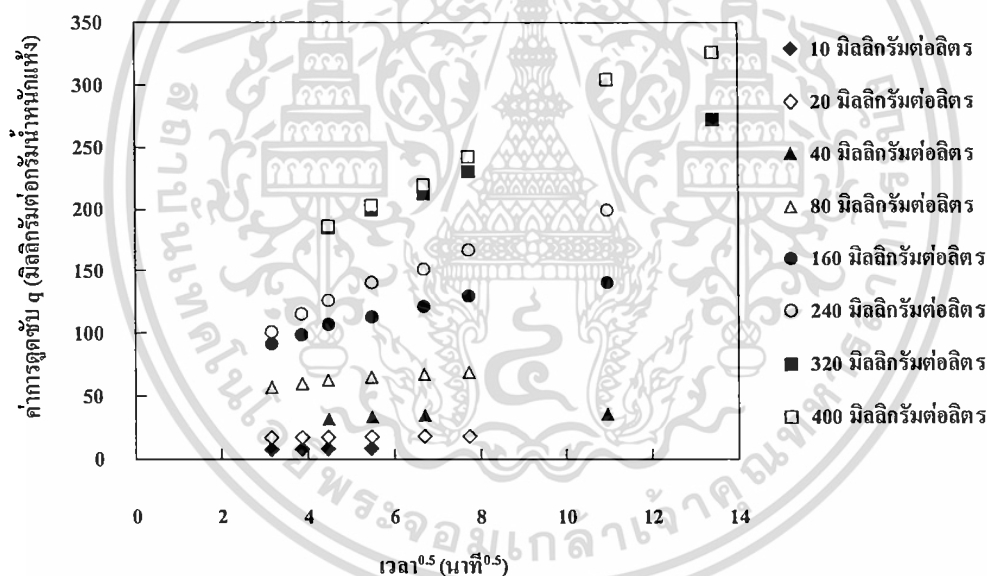


ภาพที่ 4.40 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Arthrospira platensis* ของการดูดซับสีย้อมเบนเฟิลเรดช่วงที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.41 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera* ของการดูดซับสี่ข้อมบนเฟล็คเรด ช่วงแรก



ภาพที่ 4.42 การแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri* ของการดูดซับสี่ข้อมบนเฟล็คเรดช่วงที่สอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสี่ข้อมบนเวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* (ภาพที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 และ ตารางที่ 4.27, 4.28 และ 4.29) สี่ข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. (ภาพที่ 4.31, 4.32 และ 4.33 และ ตารางที่ 4.33, 4.34 และ 4.35) และสี่ข้อมบนเฟล็คเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* (ภาพที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 และ ตารางที่ 4.39, 4.40 และ 4.41) พบว่า

มีปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน โดยพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r) ของ

เอกรงค์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีความสัมพันธ์สูงกว่าอันดับหนึ่งเสมือน คืออัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นปฏิกากับกำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเข้าสู่ระบบหนึ่งเท่าจะดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของตัวดูดซับตั้งต้น จากการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาคั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาของการใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเบสิกมาลาไลท์กรีน (Bekci *et al.* 2009) และดูดซับสีเบสิกเมทิลีนบลู (Cengiz and Cavas. 2008) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. (Tsai and Chen. 2010) และสาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* (Kannan *et al.* 2010) ดูดซับสีมาลาไลท์กรีน การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* การดูดซับสีแอสตราซอลบลู FGRL (Astrazon Blue FGRL) (Marungrueng and Pavasant. 2006) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟริมาซอลเรด RR (Remazol Red RR) และรีมาซอลโกลเดนเยลโล RNL (Remazol Golden Yellow RNL) (Aksu and Tezer. 2005) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 324 (Acid Blue 324) และแอซิดบลู 290 (Acid Blue 290) (Ozer *et al.* 2006b) นอกจากนี้การใช้พืชน้ำ *Azolla filiculoides* ดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 88 (Acid Red 88) แอซิดกรีน 3 (Acid green 3) และแอซิดออเรนจ์ 7 (Acid Orange 7) (Padmesh *et al.* 2005) ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมมักเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

C. lentillifera, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนซอลเรดเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ภาพที่ 4.28, 4.29 และ 4.30 และ ตารางที่ 4.30, 4.31 และ 4.32) *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมมาลาไลท์กรีนเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ภาพที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 และ ตารางที่ 4.36, 4.37 และ 4.38) และ *C. lentillifera* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเรดเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรก (ภาพที่ 4.41 และ ตารางที่ 4.40) *A. platensis*, และ *G. fisheri* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ภาพที่ 4.40 และ 4.42 และ ตารางที่ 4.42 และ 4.44) ตามลำดับ ซึ่งเป็นขั้นที่มีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ โดยสาหร่ายทุกชนิดกับสีย้อมทุกประเภทมีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาค ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับคือขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับทั้งหมด จากกลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ จะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน คือ 1) bulk transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ จากสารละลาย ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ 2) film transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ 3) intraparticle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับและ 4) adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับซึ่งเกิดขึ้นเร็วมาก (Agrawal, 1990)

เมื่อพิจารณาจากผลของอัตราเร็วของการดูดซับ (ภาพที่ 4.28, 4.29, 4.30, 4.35, 4.36, 4.34, 4.40 และ 4.42 และตารางที่ 4.33, 4.34, 4.35, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 และ 4.44) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความเร็วในขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นทำให้มีแรงผลัก ไอออนของสีย้อมเข้าไปภายในตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้อัตราเร็วของการดูดซับของสาหร่ายทุกชนิดในช่วงแรกสูงกว่าช่วงที่สอง แสดงว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับคือ ขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของช่วงที่สองของการดูดซับ ยกเว้น *C. lentillifera* ที่มีอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรดขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรกต่ำกว่าช่วงที่สอง (ภาพที่ 4.41 และ ตารางที่ 4.43) แสดงว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรดของ *C. lentillifera* คือ ขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของช่วงแรกของการดูดซับ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าขั้นการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาสอดคล้องกับการศึกษาการใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ในการดูดซับสีแอซิดบลู 324 (Acid Blue 324) และแอซิดบลู 290 (Acid Blue 290) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ozer *et al.*, 2006b) การดูดซับสีรีแอคทีฟแอสตราซอลบลู FGRL (Astrazon Blue FGRL) โดยใช้สาหร่าย *C. lentillifera* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ถึง 1280 มิลลิกรัมต่อลิตร (Marungrueng and Pavasant, 2006) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเบติงมาลาไลท์กรีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ถึง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร (Bekci *et al.* 2009) และการใช้พืชน้ำ *Posidonia oceanica* ดูดซับสีแอซิดเยลโล 59 (Acid Yellow 59) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Guezgues *et al.*, 2009) เมื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาคพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วในการแพร่ภายในอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วย

4.4 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

4.4.1 การบำบัดสีย้อมเบนวอลในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงาน

อุตสาหกรรม

น้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกล่องกระดาษจะผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยวิธีการบำบัดทางเคมีเนื่องจากในขั้นต้นสีย้อมมีความเข้มข้นสูงหลังจากผ่านการตกตะกอน สีย้อมที่เหลือในน้ำเสียจะผ่านขบวนการบำบัดขั้นต่อไป เช่น แลกเปลี่ยนไอออนหรือตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ ได้นำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนขั้นต้นมาทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดสีย้อมที่คงเหลือในน้ำเสียด้วยการใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวได้เตรียมขึ้นที่ห้องปฏิบัติการโดยมีวิธีการเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งทำโดยนำสีย้อมเบนซอลเรดละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นบำบัดขั้นต้นโดยตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีย้อมปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีย้อมส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.6 มาบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใส่สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสีย้อมเบนซอลเรดสูงสุดเท่ากับ 31.05 ± 0.35 และ 31.40 ± 0.54 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ 48-96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 91.96 ± 0.38 และ 92.96 ± 0.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.45) ส่วน *Rhizoclonium* sp. ที่ 120 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสีย้อมเบนซอลเรดสูงสุดเท่ากับ 30.05 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ 96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 88.98 ± 0.79 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.45 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของเบเนวอลเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

เวลา (ชั่วโมง)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0	0.00±0.00 ^b	0±0.00 ^h	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ⁱ
1	0.18±0.02 ^b	0.53±0.04 ^{gh}	20.23±0.31 ^c	59.91±0.51 ^b	20.75±0.43 ^b	61.44±0.70 ^h	23.44±0.28 ^f	69.43±0.84 ^h
2	0.23±0.04 ^{ef}	0.67±0.12 ^{gh}	23.06±0.72 ^d	68.27±1.53 ^f	22.14±0.59 ^{fb}	65.52±0.91 ^b	25.10±0.51 ^c	74.30±0.52 ^b
3	0.31±0.04 ^{ef}	0.92±0.13 ^{fgh}	24.27±0.53 ^d	71.84±0.50 ^c	23.13±0.51 ^{ef}	68.47±0.79 ^f	26.99±0.35 ^d	79.91±0.45 ^f
6	0.47±0.07 ^{cde}	1.39±0.19 ^{efg}	25.88±0.30 ^c	76.64±0.45 ^d	24.10±0.48 ^{de}	71.37±0.86 ^c	28.63±0.60 ^c	84.76±0.87 ^e
12	0.68±0.13 ^{cd}	2.01±0.36 ^{cde}	27.77±85 ^b	82.18±1.30 ^c	25.20±0.56 ^{cd}	74.59±0.93 ^d	29.02±0.44 ^c	85.93±0.48 ^{cd}
24	0.81±0.19 ^c	2.40±0.54 ^{cd}	28.30±0.68 ^b	83.79±0.90 ^c	25.72±0.79 ^c	76.11±1.22 ^{cd}	29.49±0.45 ^{bc}	87.33±0.72 ^c
48	0.94±0.22 ^c	2.78±0.60 ^c	29.83±0.38 ^a	88.34±0.22 ^b	26.35±0.65 ^{bc}	78.01±0.90 ^c	30.71±0.43 ^{ab}	90.94±0.24 ^b
72	1.42±0.12 ^b	4.19±0.36 ^b	30.11±0.36 ^a	89.16±0.30 ^b	27.54±0.34 ^b	81.55±0.44 ^b	30.79±0.41 ^{ab}	91.19±0.28 ^{ab}
96	1.71±0.28 ^{ab}	5.04±0.75 ^{ab}	30.48±0.31 ^a	90.28±0.66 ^{ab}	29.22±0.23 ^a	86.53±1.12 ^a	30.89±0.45 ^a	91.47±0.12 ^{ab}
120	2.07±0.24 ^a	6.10±0.61 ^a	31.05±0.35 ^a	91.96±0.38 ^a	30.05±0.33 ^a	88.98±0.79 ^a	31.40±0.54 ^a	92.96±0.33 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.4.2 การบำบัดสีเขียวมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงาน

อุตสาหกรรม

นำสีเขียวมมาลาไคท์กรีนละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีเขียวปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีเขียวส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5.8 บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *Padina* sp. และ *Sargassum* sp. มีค่าการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนสูงสุด เท่ากับ 3.27 ± 0.01 และ 3.11 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ 96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 76.98 ± 0.62 และ 73.12 ± 0.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.46) ส่วน *Turbinaria* sp. ที่ 120 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสีเขียวมมาลาไคท์กรีนสูงสุด เท่ากับ 3.23 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ 72-96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 75.96 ± 0.40 เปอร์เซ็นต์



ตารางที่ 4.46 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

เวลา (ชั่วโมง)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^j	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^j	0.00±0.00 ^j	0.00±0.00 ^k
1	0.10±0.01 ^{gh}	2.25±0.31 ^g	1.53±0.03 ^h	36.11±0.76 ⁱ	1.32±0.08 ^h	31.11±1.56 ⁱ	1.32±0.02 ⁱ	31.00±0.47 ^j
2	0.16±0.02 ^{fg}	3.70±0.46 ^{fg}	1.90±0.05 ^g	44.71±0.87 ^h	1.73±0.03 ^g	40.68±0.28 ^h	1.81±0.03 ^h	42.61±0.37 ⁱ
3	0.22±0.03 ^{ef}	5.27±0.65 ^{ef}	2.11±0.02 ^f	49.72±0.17 ^g	2.12±0.04 ^f	49.93±0.69 ^g	2.02±0.03 ^g	47.50±0.17 ^h
6	0.29±0.02 ^{de}	6.82±0.33 ^{de}	2.55±0.07 ^e	60.06±0.96 ^f	2.29±0.04 ^e	54.00±0.56 ^f	2.17±0.02 ^f	51.12±0.21 ^g
12	0.33±0.03 ^{cde}	7.74±0.62 ^{cd}	2.81±0.02 ^d	66.19±0.38 ^e	2.61±0.07 ^d	61.42±0.91 ^e	2.47±0.03 ^c	58.18±0.33 ^f
24	0.37±0.04 ^{bcd}	8.63±0.85 ^{bcd}	2.99±0.01 ^c	70.41±0.40 ^d	2.80±0.08 ^c	65.80±1.19 ^d	2.77±0.02 ^d	65.20±0.91 ^c
48	0.42±0.05 ^{abc}	9.98±1.12 ^{abc}	3.07±0.02 ^c	72.33±0.30 ^c	2.97±0.06 ^b	69.96±0.76 ^c	2.92±0.02 ^c	68.76±0.48 ^d
72	0.46±0.05 ^{ab}	10.69±1.09 ^{ab}	3.17±0.02 ^b	74.73±0.49 ^b	3.11±0.07 ^{ab}	73.28±0.78 ^b	2.99±0.02 ^b	70.37±0.45 ^c
96	0.48±0.05 ^{ab}	11.23±1.13 ^a	3.24±0.02 ^{ab}	76.34±0.49 ^{ab}	3.16±0.07 ^a	74.49±0.80 ^{ab}	3.05±0.02 ^{ab}	71.73±0.49 ^b
120	0.50±0.04 ^a	11.70±0.87 ^a	3.27±0.01 ^a	76.98±0.62 ^a	3.23±0.05 ^a	75.96±0.40 ^a	3.11±0.02 ^a	73.12±0.43 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.4.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

นำสีย้อมเบนเฟิครดละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีย้อมปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีย้อมส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 4.1 บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *A. platensis* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครดสูงสุด เท่ากับ 50.89 ± 1.16 และ 50.27 ± 0.70 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ 96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 71.67 ± 1.06 และ 70.81 ± 0.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.47) ส่วน *C. lentillifera* ที่ 120 ชั่วโมง มีค่าการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครดสูงสุด เท่ากับ 45.46 ± 0.73 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 64.03 ± 0.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ตารางที่ 4.47 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของเบนเนฟิเคเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

เวลา (ชั่วโมง)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
0	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ^j	0.00±0.00 ^k	0.00±0.00 ^k	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^k
1	0.33±0.07 ^{fg}	0.46±0.09 ^{gh}	20.26±0.09 ^b	28.54±0.15 ⁱ	6.34±1.25 ^j	8.91±0.95 ^j	6.37±0.25 ^h	8.98±0.32 ^j
2	0.91±0.12 ^{efg}	1.28±0.17 ^{fgh}	27.51±0.98 ^f	38.74±1.07 ^h	11.74±1.49 ⁱ	16.51±1.14 ⁱ	10.28±0.18 ^g	14.48±0.25 ⁱ
3	1.20±0.14 ^{efg}	1.69±0.19 ^{fgh}	30.89±0.50 ^e	43.51±0.48 ^g	16.06±0.88 ^h	22.61±0.77 ^h	12.13±0.23 ^{fg}	17.09±0.31 ^h
6	1.76±0.06 ^{cde}	2.47±0.06 ^{efg}	35.44±0.72 ^d	49.92±0.66 ^f	19.18±1.76 ^g	27.00±1.11 ^g	13.88±0.44 ^f	19.56±0.66 ^g
12	2.21±0.26 ^{cd}	3.11±0.34 ^{def}	39.77±0.85 ^c	56.01±0.80 ^e	22.70±1.49 ^f	31.95±1.25 ^f	18.21±0.65 ^e	25.65±0.82 ^f
24	2.83±0.49 ^{bc}	3.97±0.66 ^{cde}	41.43±0.84 ^c	58.35±0.68 ^d	28.32±2.83 ^e	39.87±1.08 ^e	29.95±0.54 ^d	42.18±0.47 ^c
48	3.28±0.61 ^{bc}	4.61±0.81 ^{bcd}	44.19±0.61 ^b	62.25±0.37 ^c	32.68±1.07 ^d	46.01±1.07 ^d	40.22±1.53 ^c	56.63±1.67 ^d
72	3.93±0.77 ^{ab}	5.53±1.03 ^{abc}	46.40±0.85 ^b	65.36±0.73 ^b	37.52±0.65 ^c	52.85±0.77 ^c	45.62±0.66 ^b	64.26±0.62 ^c
96	4.36±0.78 ^{ab}	6.12±1.04 ^{ab}	49.91±1.04 ^a	70.30±1.05 ^a	42.11±0.74 ^b	59.31±0.87 ^b	48.42±1.00 ^a	68.19±0.80 ^b
120	5.11±0.81 ^a	7.17±1.07 ^a	50.89±1.16 ^a	71.67±1.06 ^a	45.46±0.73 ^a	64.03±0.83 ^a	50.27±0.70 ^a	70.81±0.51 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิครีดจากในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงาน อุตสาหกรรมได้ดีจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ถึงแม้ในน้ำเสียที่ไม่มีสาหร่ายจะมีการตกตะกอน จากไอออนต่างๆ ของน้ำประปาที่ตามแต่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อมในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นใน ผลการทดลองข้อ 4.4 นี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับสีย้อมโดยไม่ตกตะกอนด้วยสารเคมีในการ ทดลองข้อ 4.2.2 ที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน พบว่าการดูดซับสีย้อมโดยไม่ตกตะกอนด้วยสารเคมี มีประสิทธิภาพสูงกว่าใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อมในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นที่มีการ ตกตะกอนด้วยสารเคมี อาจเนื่องมาจากการไม่ปรับพีเอชของน้ำที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นที่มี การตกตะกอนด้วยสารเคมี เพราะน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับ โรงงาน อุตสาหกรรมในเบื้องต้นจะตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ยังไม่รวมถึงการปรับพีเอชในสารละลายให้ เหมาะสมจึงทำให้การดูดซับนี้มีสภาวะที่พีเอชในสารละลายยังไม่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้เกิดการ แทนที่ของไอออนอื่นๆ กับผิวหน้าสาหร่ายแทนที่จะเป็นโมเลกุลของสีย้อมเนื่องจากน้ำประปามี ไอออนอื่นๆ ด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของผิวหน้าสาหร่ายไม่ได้จับกับโมเลกุลของสีย้อมได้ อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตามในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมย่อมมีไอออนอื่นๆ เลือปน

มีการใช้สาหร่ายในการบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียของ โรงงานอุตสาหกรรม เช่น มีในรายงาน การศึกษาการดูดซับสีย้อมของ Khalaf (2008) ได้ทำการทดลอง โดยใช้สาหร่าย *Spirogyra* sp. บำบัด สีย้อมรีแอคทีฟ Synazol จากน้ำเสียของ โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำสาหร่ายมาทำการ pre-treatment โดยการนำไปผ่านหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อก่อนการนำไปดูดซับ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ในการบำบัดสีย้อมได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาในการสัมผัสสีย้อม 18 ชั่วโมง

นอกจากนี้ Lim *et al.* (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* เป็นตัว ดูดซับทางชีวภาพจากน้ำเสียที่มีสีอะโซรีแอคทีฟ (Azo reactive) Supranol Red 3 BW ปนเปื้อนจาก โรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยใช้เซลล์มีชีวิตซึ่งปริมาณเซลล์มีคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ ในช่วง 0.17 ถึง 2.26 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 41.8 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* UMACC 001 มาบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมฟอก ย้อมที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมอะโซรีแอคทีฟ (Azo reactive) Lanaset red 2GA โดยใช้เซลล์ สาหร่ายที่ตรึงกับอัลจินเนต (alginate) 2 เปอร์เซ็นต์ ที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 7.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 44 เปอร์เซ็นต์ (Chu *et al.* 2009)

ในการศึกษาความสามารถในการนำสาหร่ายดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัด ขั้นต้นเช่นเดียวกับ โรงงานอุตสาหกรรมในครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นไปได้ในการนำ สาหร่ายเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้น้ำเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิครีดโดยสาหร่าย 13 สกุล ได้แก่ ไชยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, *Phormidium angustissimum*, สาหร่ายสีเขียว *Ulva intestinalis*, *Ulva rigida*, *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Sargassum* sp., *Dictyota* sp., สาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, *Acanthophora* sp. และ *Solieria* sp.

5.1 สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเบนเนวอลเรดได้สูงคือ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสีย้อมมาลาไคท์กรีนได้สูงคือ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเบนเนฟิครีดได้สูงคือ *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri*

5.2 ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมสำหรับสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิครีด คือ พีเอช 3, 6 และ 2 ระยะเวลาในการสัมผัสสีย้อมไม่เกิน 12, 6 และ 6 ชั่วโมง สำหรับสีย้อมทั้ง 3 ประเภท ตามลำดับ ปริมาณและขนาดเซลล์สาหร่ายที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสีย้อมที่ลดลงมีผลทำให้การดูดซับสีทุกประเภทต่อสาหร่าย 1 กรัม ลดลง สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดอยู่ระหว่าง 40-50 องศาเซลเซียส สีย้อมมาลาไคท์กรีนอยู่ระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส และสีย้อมเบนเนฟิครีดที่ 50 องศาเซลเซียส ยกเว้น *C. lentillifera* อยู่ระหว่าง 35-40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยพบว่าค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีย้อมทุกประเภทโดยสาหร่ายมีค่าเป็นบวก ยกเว้นการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีดโดยสาหร่าย *C. lentillifera* ที่มีค่าเป็นลบ

5.3 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิครีดโดยสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir จลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* การดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. การดูดซับของสีย้อมเบนเนฟิครีดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และมีอัตราเร็วขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สองเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ยกเว้น *C. lentillifera* มีอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีดขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรกเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในการบำบัดสีย้อมเบนเนอลเรด มาลาโคทีกรีน และเบนเฟิครีด สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีแต่ละประเภท ได้แก่ *G. fisheri*, *Padina* sp. และ *A. platensis* ตามลำดับ

จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้สูง จึงสามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรมประมง. 2548. มาลาไคท์ กรีน (Malachite Green; MG). ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพสัตว์
น้ำ และผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำสมุทรสาคร. กรมประมง. สมุทรสาคร.
- กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย. 2553. “เจ้าพระยาปนเปื้อนสารเคมีอันตราย”.
[online]. Available; <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=7&ID=522>
- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2542. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ
ติดสียรีแอคทีฟ (reactive dyes). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) .พิมพ์ ครั้งที่ 1 .
กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- จันทิมา ชั่งสิริพร ฌรงค์พล ทองสังข์ วุฒิกไร วงษ์มะยูรา และจรรยา อินทมณี. 2552. “การกำจัด
CODและสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน”. ในการประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
สงขลา
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8. 2537. “เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใน
แหล่งน้ำผิวดิน”. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง. 24 กุมภาพันธ์ 2537
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. 2539. “เรื่อง กำหนดมาตรฐาน
ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม
อุตสาหกรรม”. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13. 13 กุมภาพันธ์ 2539
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549. การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มปป. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม . กรมโรงงาน
อุตสาหกรรม.
- Adamson, A.W. 1990. **Physical Chemistry of Surfaces**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
777 p.
- Ahuja, P., R. Gupta and R.K. Saxena. 1997. “*Oscillatoria angustissima*: a promising Cu²⁺
biosorbent”. **Current Microbiol.** 35 : 151-154.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Aksu, Z., Sag, Y. and Kutsal, T. 1992. "The biosorption of copper(II) by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*." **Environment Technology**. 13:579-586.
- Aksu, Z. and Tezer, S. 2005. "Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*" **Process Biochemistry**. 40 : 1347-1361.
- Agrawal, G.L. 1990. Basic Chemical Kinetics. McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi. 214 p.
- 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., Cserháti, 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 oceanic*, a non-Conventional biosorbent : comparison wuth activated carbons". **Industrial crops and products**. 29 : 197-204

Hii, 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 of *Aspergillus niger* and *Spirogyra sp.*" **Bioresource Technology**. 99 : 6631-6634.

Khataee, A.R., Dehghan, G., Ebadi, E., Zarei, M. and Pourhassa, M. 2010. "Biological treatment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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., 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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. 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. 2006a. "The removal of Acid Red 274 from wastewater: Combined biosorption and biocoagulation with *Spirogyra rhizopus*." **Dyes and Pigments**. 71 : 83-89.
- 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.
- 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.
- 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 acid blue 15 from synthetic solutions". **Chemical Engineering Journal**. 122 : 55–63
- Pandey A, Singh P, Iyengar L (2007). "Bacterial decolourisation and degradation of azo dyes." **International Biodeterioration Biodegradation**. 59: 73-84.
- 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.
- 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 lentilifera*)." **Journal of Environmental sciences**. 20 : 760-768.
- 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.

Schiewer, S. and Volesky, B. 2000. **Biosorption process for heavy metal removal** *In: Environmental Microbe-Metal Interactions*. ASM Press. Washington.

Sharman, R. 1998 . **Water and Wastewater Technology**, LBCC : Tricking 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.

ภาคผนวก ก

อาหารสูตร BG-11

สูตรอาหารหลัก	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
โซเดียมไนเตรต (NaNO_3)	1.5
ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.04
แมกนีเซียมซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.075
แคลเซียมคลอไรด์ 2-ไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.036
กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)	0.006
เฟอริกแอมโมเนียมซิเตรต (Ferric ammonium citrate)	0.006
โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)	0.02
*Trace Metal Mix A5 + Co	1 มิลลิลิตร
สูตรอาหารรอง	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
*Trace Metal Mix A5 + Co	
กรดบอริก (H_3BO_3)	2.86
แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	1.84
ซิงก์ซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.222
โซเดียมโมลิบเดต 2-ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.39
คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	0.079
โคบอลไนเตรต 6-ไฮเดรต [$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]	0.049

อาหารสูตร Chlorella

โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)	1.25 กรัมต่อลิตร
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	1.25 กรัมต่อลิตร
แมกนีเซียมซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	1.0 กรัมต่อลิตร
แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)	0.084 กรัมต่อลิตร
กรดบอริก (H_3BO_3)	0.114 กรัมต่อลิตร
เฟอร์รัสซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.050 กรัมต่อลิตร

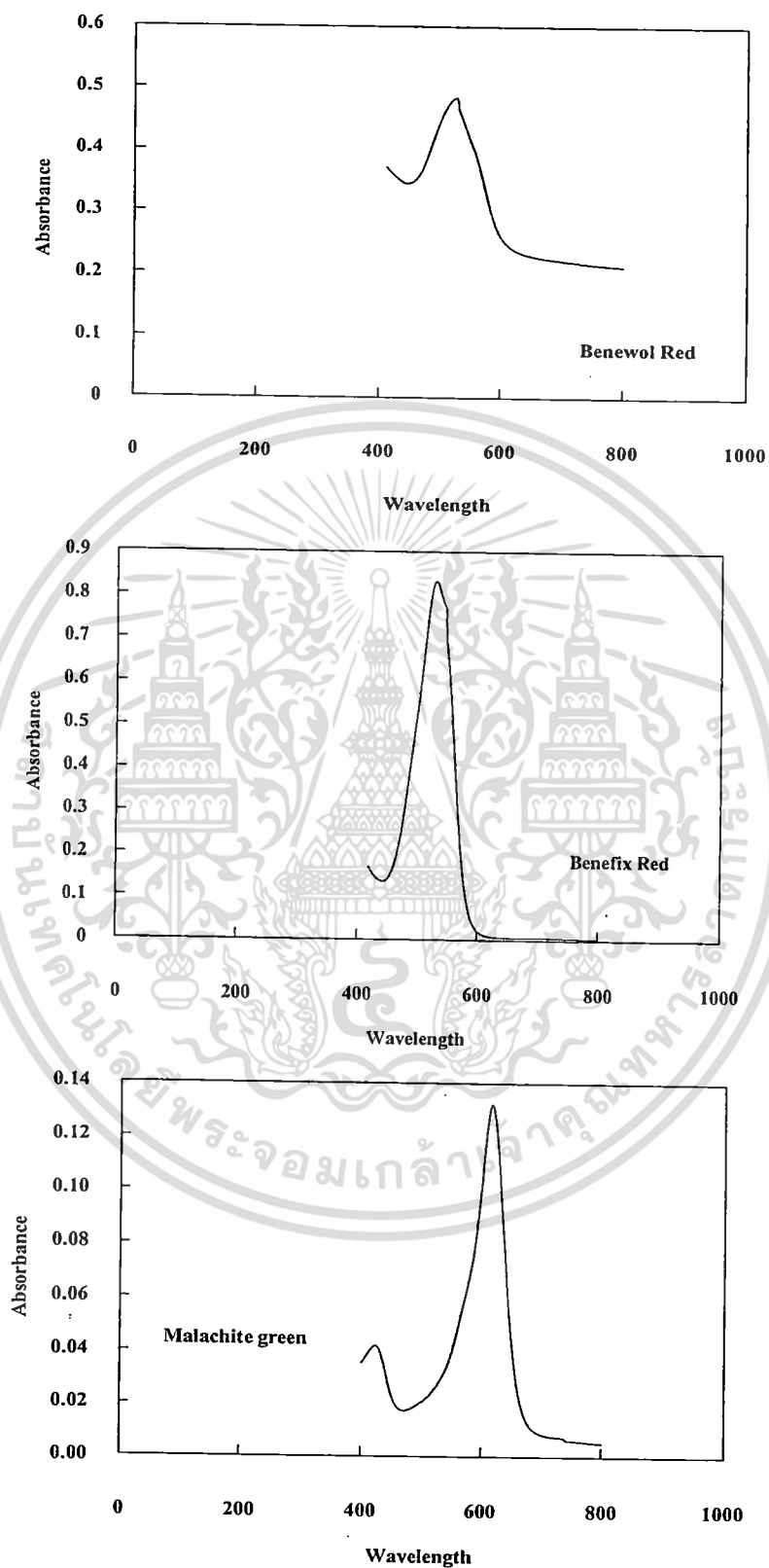
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงก์ซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)	0.088 กรัมต่อลิตร
แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต ($\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$)	0.014 กรัมต่อลิตร
โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3)	0.007 กรัมต่อลิตร
คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$)	0.016 กรัมต่อลิตร
โคบอลไนเตรต 6-ไฮเดรต [$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$]	0.005 กรัมต่อลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

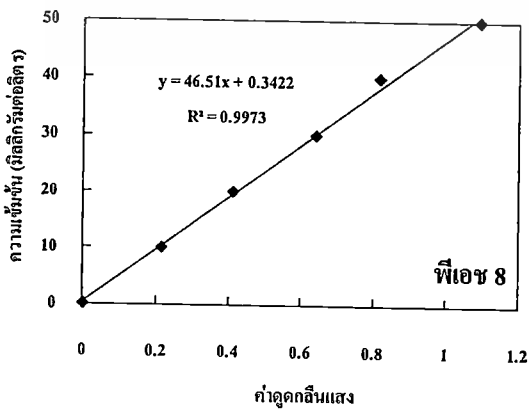
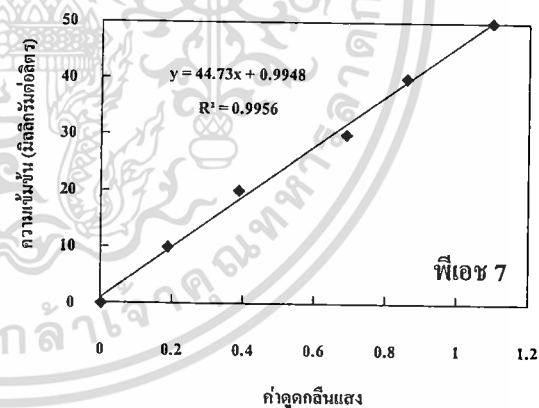
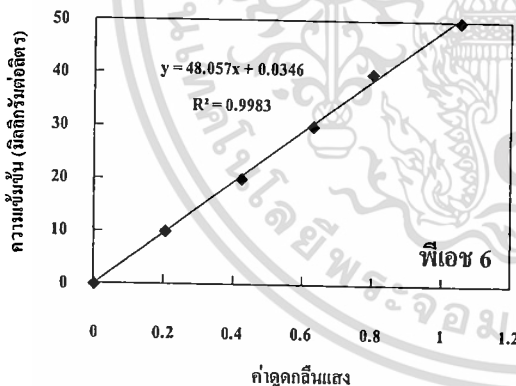
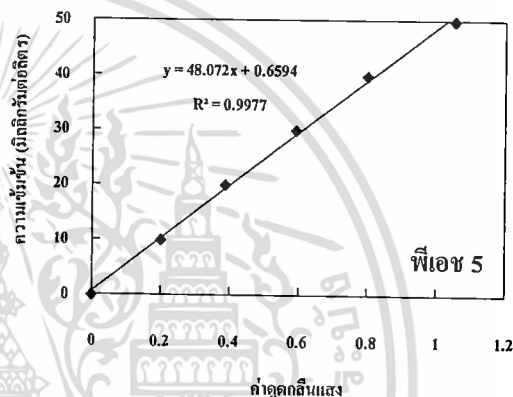
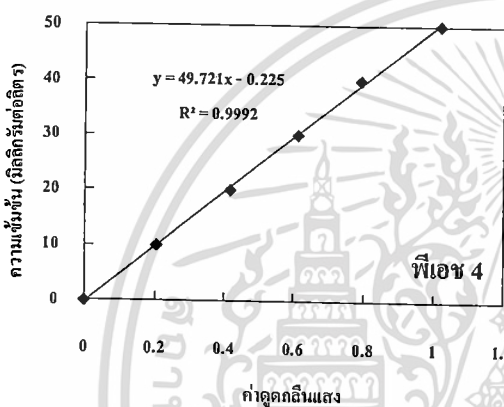
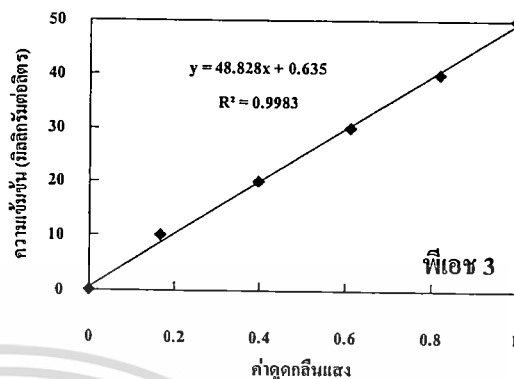
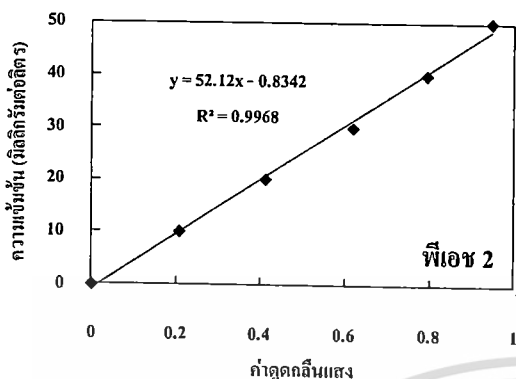


ภาพที่ 1 สเปกตรัมของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นที่แสดง peak

ที่สูงสุดเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดของสีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

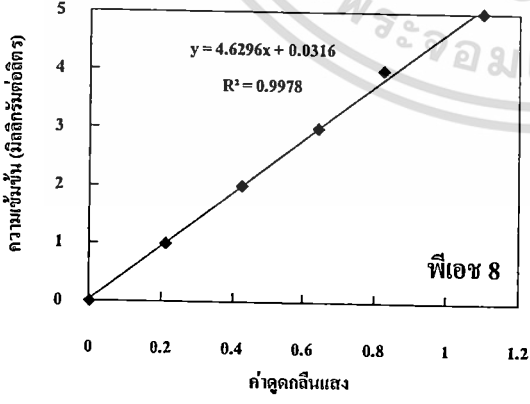
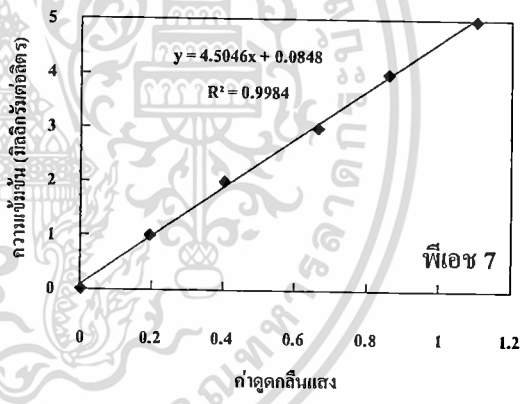
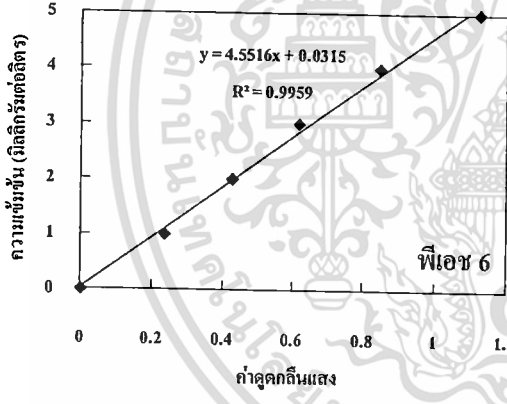
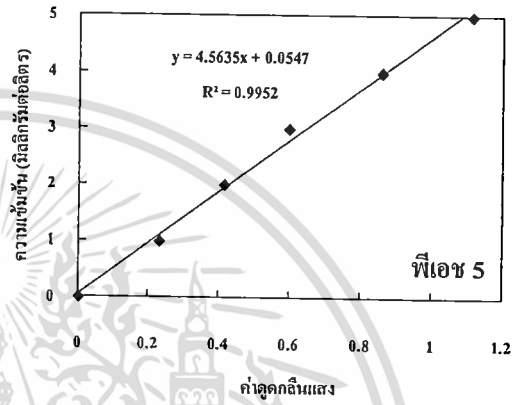
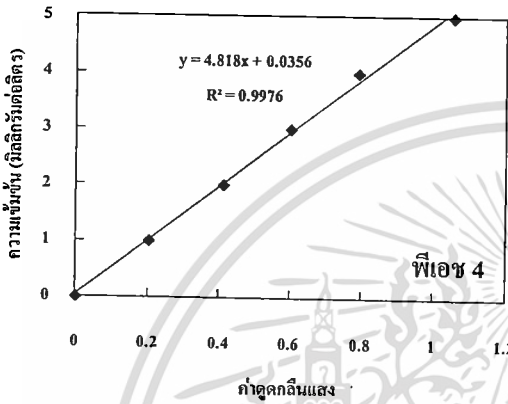
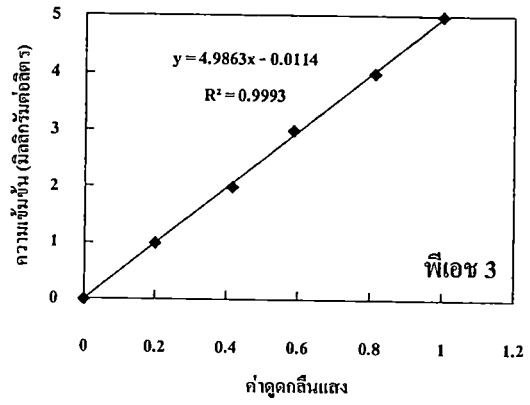
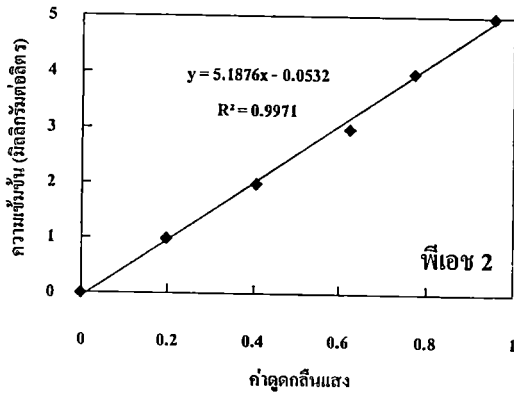
ภาคผนวก ค



ภาพที่ 1 กราฟมาตรฐานของสีย้อมเบนเวลเรดที่ฟเบอร์แตกต่างกัน

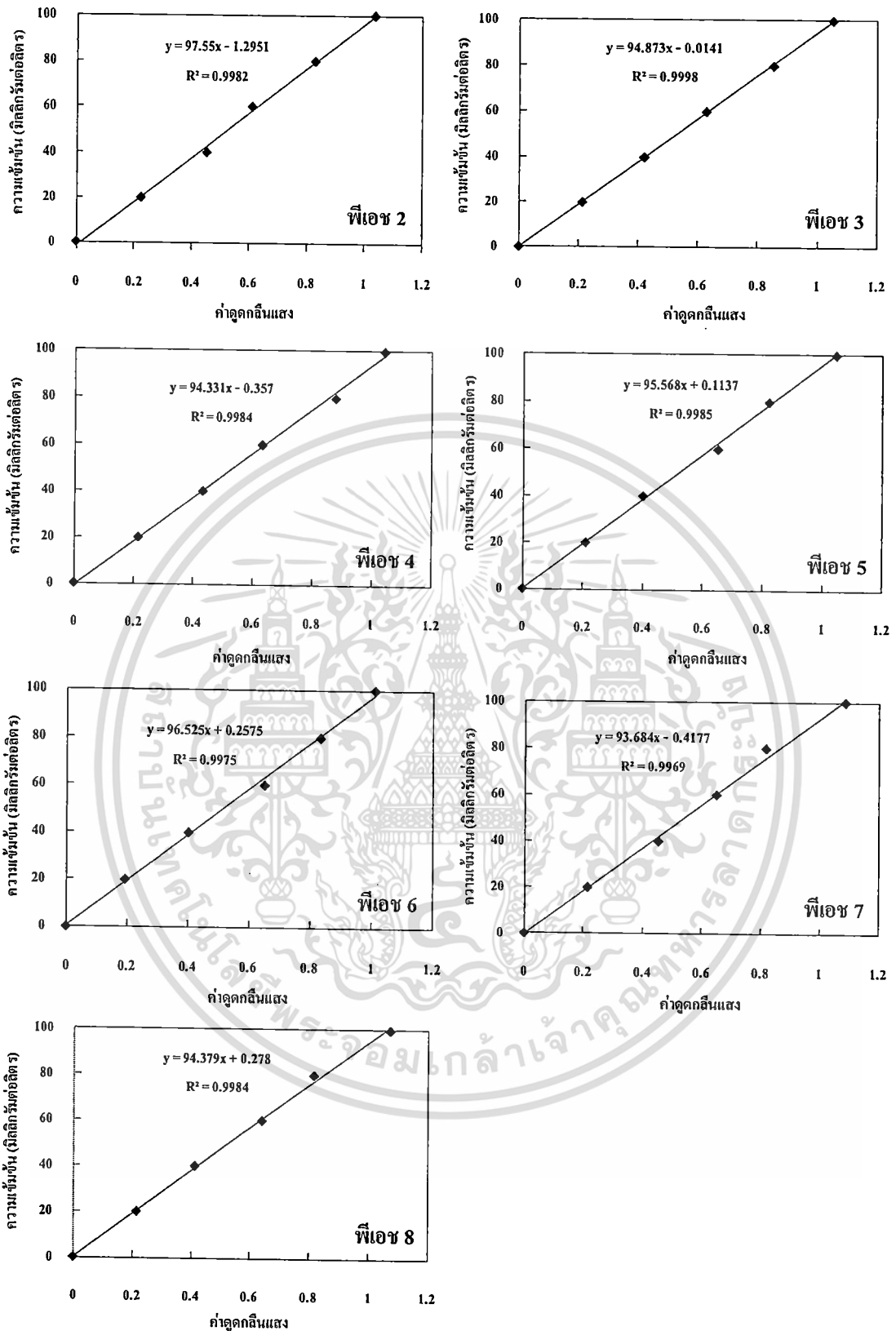
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 กราฟมาตรฐานของสีย้อมมาลาโคทกรีนที่พีเอชแตกต่างกัน

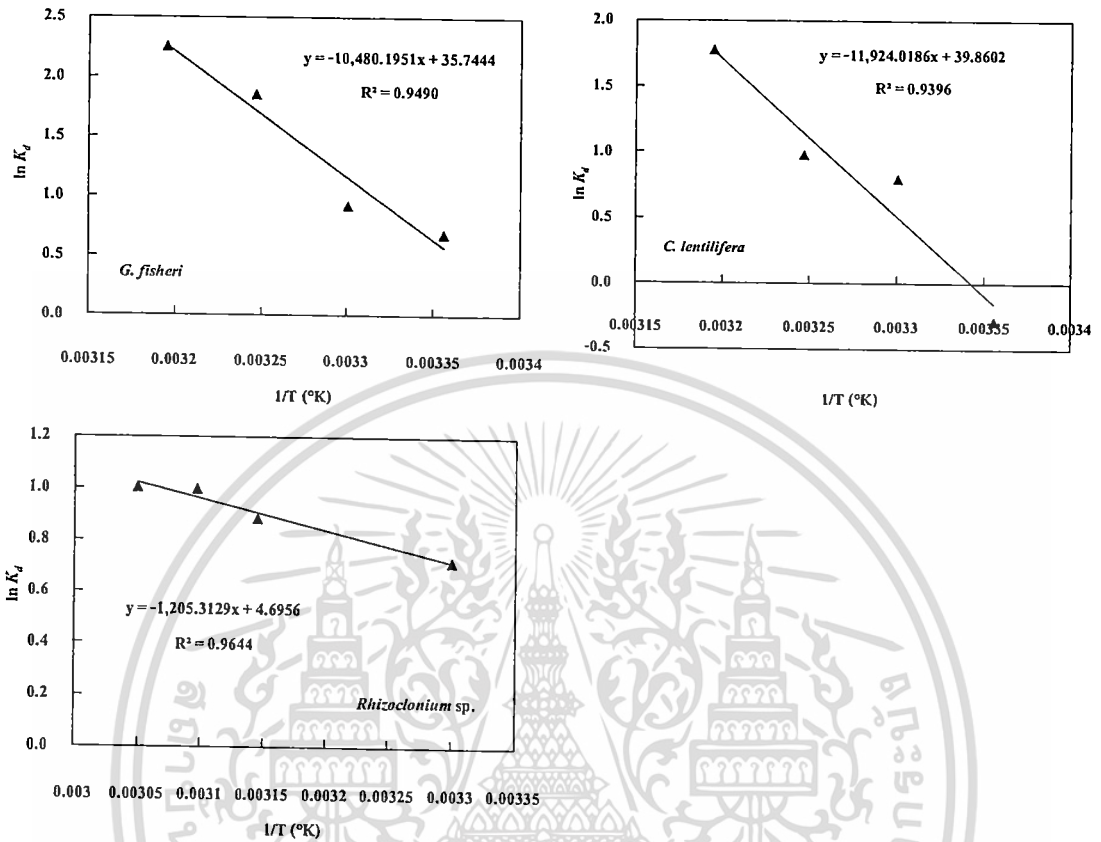
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3 กราฟมาตรฐานของสีย้อมเบนพิดเรดที่ฟิเอชแตกต่างกัน

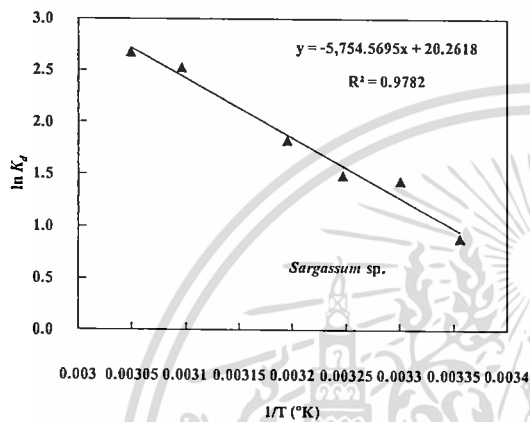
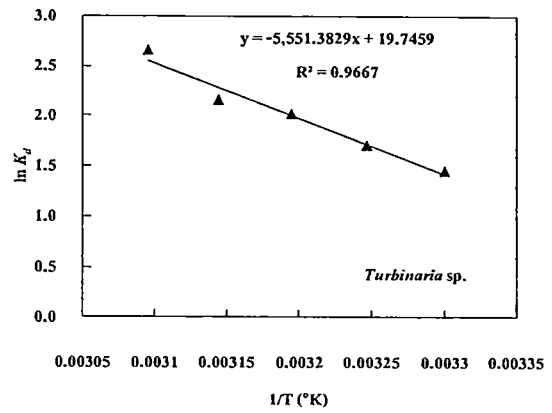
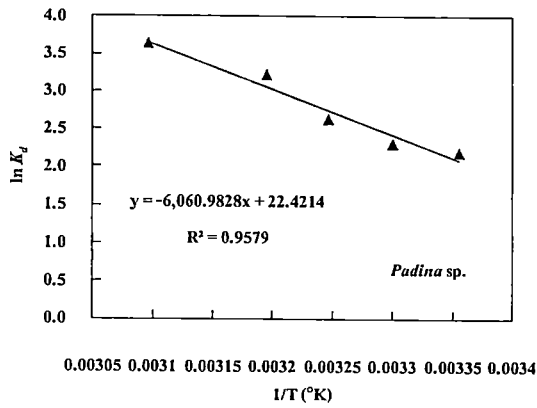
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



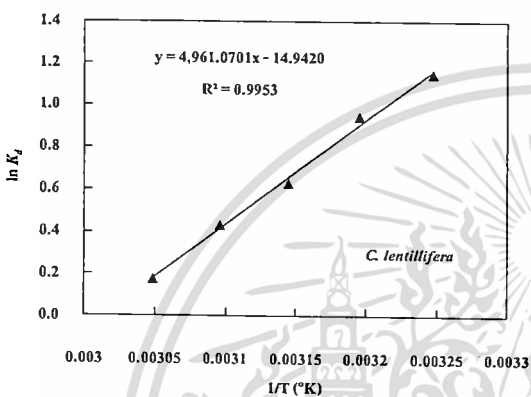
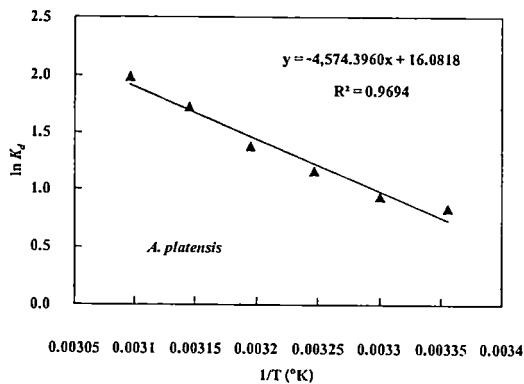
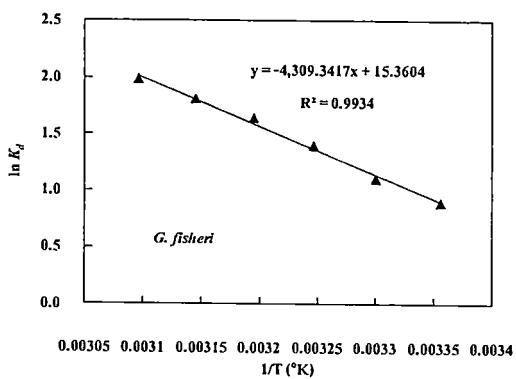
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ และ $1/T$ ($^{\circ}\text{K}$) ในการดูดซับสีย้อมเบนอะลเรดโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ และ $1/T$ ($^{\circ}K$) ในการดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

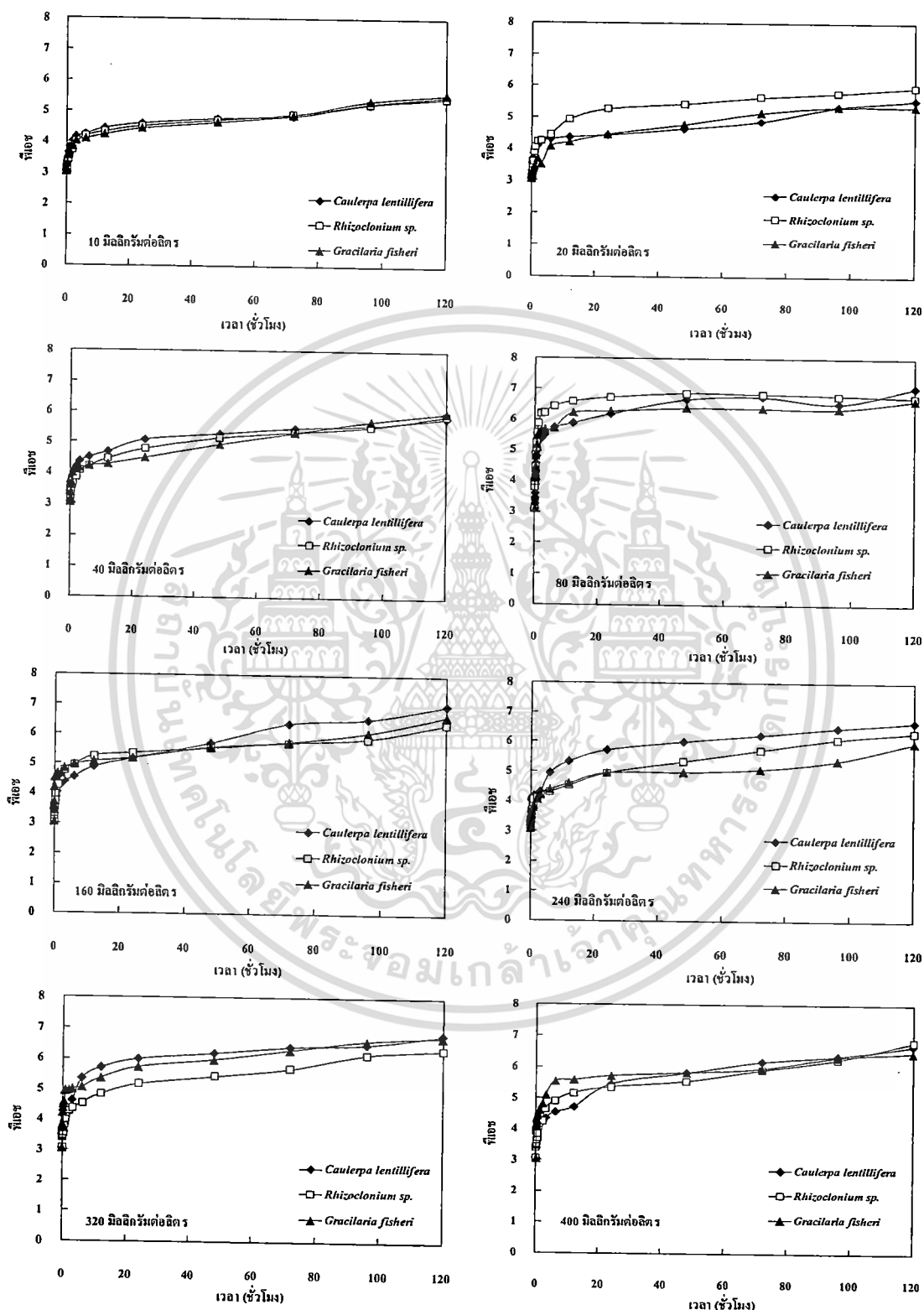
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ และ $1/T$ (°K) ในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครดโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

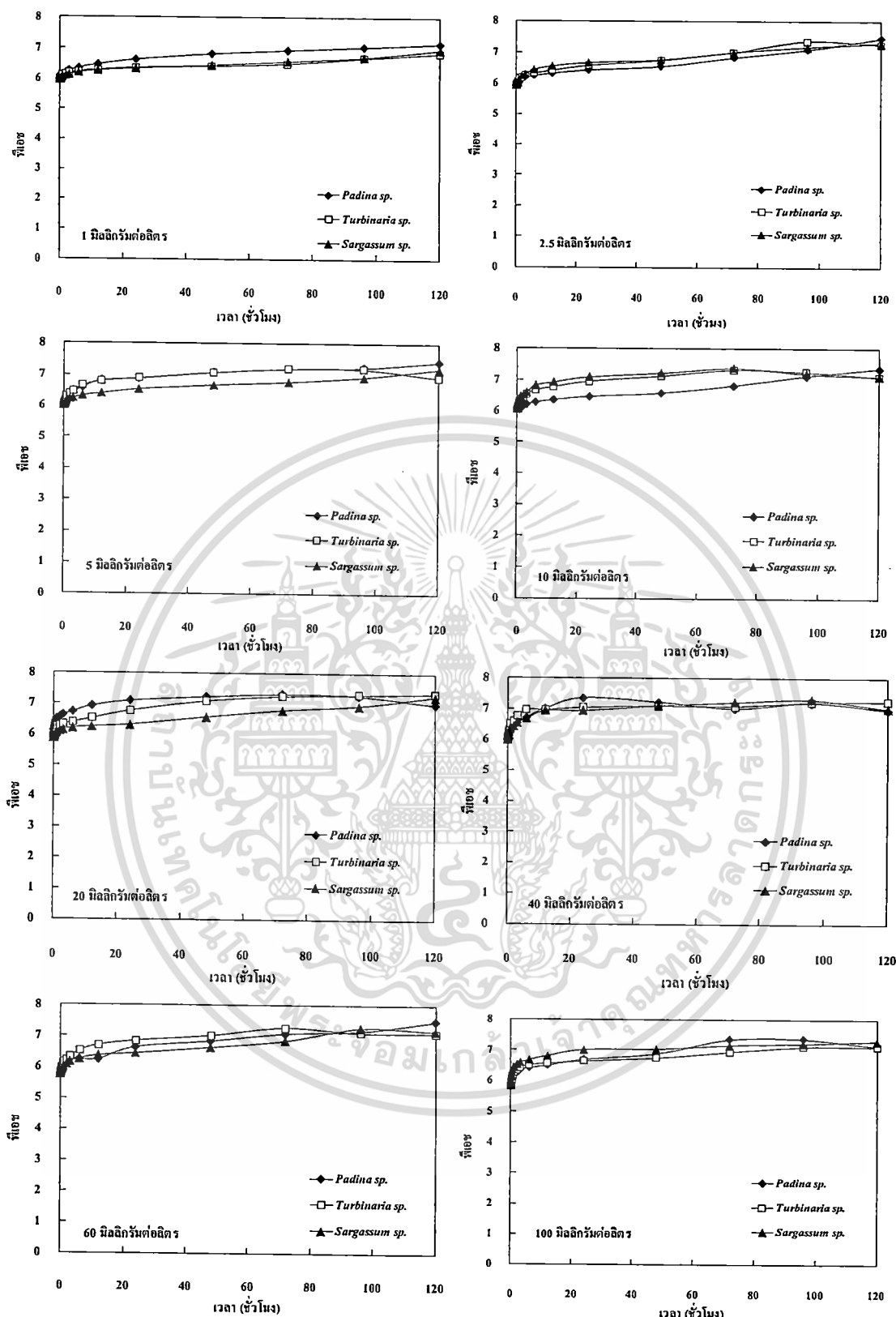
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ



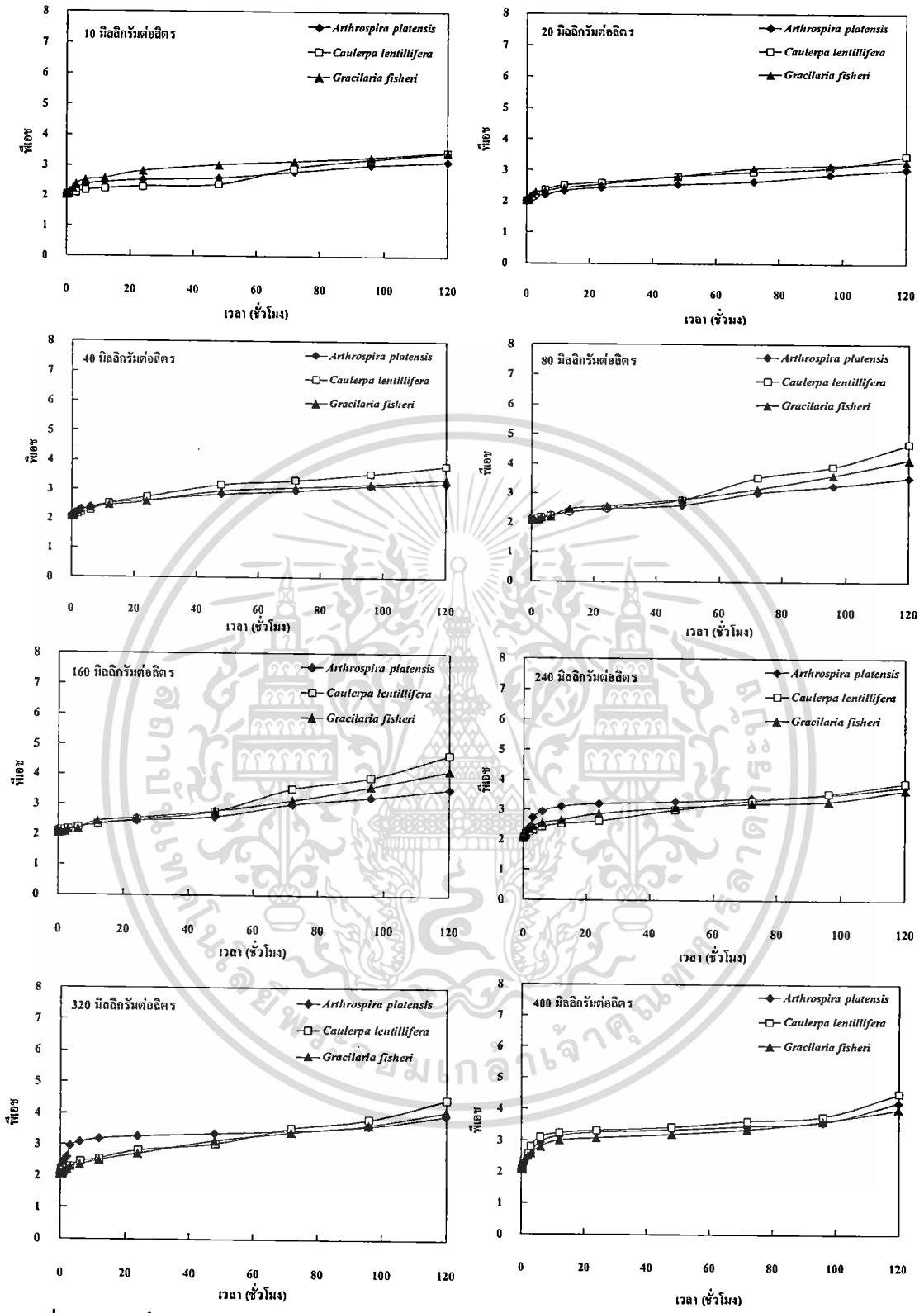
ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงฟิโชนในระบบการดูดซับสีย้อมเบนเนอลเรดโดยสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ฟิโชนเริ่มต้น 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงพีเอชในระบบการควบคุมสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (พีเอชเริ่มต้น 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงฟิวเจอร์ในระบบการดูดซับสีย้อมเบนเฟนฟิคเรด โดยสาย่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ฟิวเจอร์เริ่มต้น 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีเขียวบนแนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสีเขียว เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
10	3.04±0.01	3.07±0.01	3.04±0.01	4.22±0.05	3.04±0.01	4.55±0.14	3.04±0.01	4.11±0.05
20	3.05±0.01	3.09±0.01	3.05±0.01	4.26±0.05	3.05±0.01	4.61±0.11	3.05±0.01	4.17±0.05
40	3.04±0.01	3.08±0.01	3.04±0.01	4.30±0.07	3.04±0.01	4.62±0.12	3.04±0.01	4.22±0.06
80	3.04±0.01	3.08±0.01	3.04±0.01	4.32±0.07	3.04±0.01	4.64±0.13	3.04±0.01	4.22±0.07
100	3.07±0.01	3.09±0.01	3.07±0.01	4.33±0.06	3.07±0.01	4.65±0.12	3.07±0.01	4.30±0.03
150	3.06±0.01	3.08±0.01	3.06±0.01	4.36±0.05	3.06±0.01	4.66±0.11	3.06±0.01	4.37±0.04
200	3.07±0.01	3.10±0.01	3.07±0.01	4.46±0.03	3.07±0.01	4.78±0.11	3.07±0.01	5.29±0.04
250	3.06±0.01	3.11±0.01	3.06±0.01	4.48±0.03	3.06±0.01	4.78±0.12	3.06±0.01	5.40±0.06
500	3.05±0.01	3.09±0.01	3.05±0.01	4.50±0.03	3.05±0.01	4.77±0.11	3.05±0.01	5.46±0.09
750	3.08±0.01	3.12±0.01	3.08±0.01	4.52±0.04	3.08±0.01	4.77±0.13	3.08±0.01	5.53±0.11
1000	3.08±0.01	3.11±0.01	3.08±0.01	4.54±0.07	3.08±0.01	4.77±0.09	3.08±0.01	5.62±0.13

ตารางที่ 2 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นของสีย้อม เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
10	5.92±0.01	5.98±0.01	5.92±0.01	5.95±0.04	5.92±0.01	6.08±0.04	5.92±0.01	6.34±0.03
20	5.89±0.01	5.93±0.01	5.89±0.01	6.10±0.03	5.89±0.01	6.45±0.03	5.89±0.01	6.59±0.02
40	5.80±0.01	5.80±0.01	5.80±0.01	6.23±0.07	5.80±0.01	6.13±0.04	5.80±0.01	6.21±0.11
80	5.84±0.01	5.91±0.01	5.84±0.01	6.17±0.04	5.84±0.01	6.35±0.06	5.84±0.01	6.56±0.12
100	5.90±0.01	5.98±0.01	5.90±0.01	6.16±0.03	5.90±0.01	6.38±0.05	5.90±0.01	6.61±0.03
150	5.84±0.01	5.89±0.01	5.84±0.01	6.29±0.01	5.84±0.01	6.48±0.07	5.84±0.01	6.66±0.03
200	6.24±0.01	6.29±0.01	6.24±0.01	6.18±0.04	6.24±0.01	6.19±0.02	6.24±0.01	6.23±0.11
250	6.19±0.01	6.21±0.01	6.19±0.01	6.00±0.09	6.19±0.01	6.28±0.03	6.19±0.01	6.16±0.03
500	6.09±0.01	6.15±0.01	6.09±0.01	5.96±0.04	6.09±0.01	5.90±0.04	6.09±0.01	6.01±0.09
750	6.09±0.01	6.11±0.01	6.09±0.01	5.94±0.06	6.09±0.01	5.53±0.03	6.09±0.01	5.83±0.08
1000	5.99±0.01	6.02±0.01	5.99±0.01	5.98±0.05	5.99±0.01	5.74±0.05	5.99±0.01	5.71±0.08

ตารางที่ 3 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีเขียวบนเฟลทโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
10	2.03±0.01	2.04±0.01	2.03±0.01	2.20±0.01	2.03±0.01	2.12±0.02	2.03±0.01	2.24±0.04
20	2.01±0.01	2.04±0.01	2.01±0.01	2.22±0.01	2.01±0.01	2.35±0.05	2.01±0.01	2.18±0.01
40	2.03±0.01	2.06±0.01	2.03±0.01	2.20±0.01	2.03±0.01	2.26±0.05	2.03±0.01	2.19±0.01
80	2.01±0.01	2.06±0.02	2.01±0.01	2.20±0.01	2.01±0.01	2.17±0.02	2.01±0.01	2.26±0.05
100	2.03±0.01	2.06±0.02	2.03±0.01	2.20±0.01	2.03±0.01	2.29±0.02	2.03±0.01	2.17±0.01
150	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.22±0.01	2.05±0.01	2.24±0.02	2.05±0.01	2.29±0.04
200	2.02±0.01	2.04±0.01	2.02±0.01	2.20±0.01	2.02±0.01	2.07±0.04	2.02±0.01	2.22±0.03
250	2.05±0.01	2.07±0.02	2.05±0.01	2.20±0.02	2.05±0.01	2.11±0.02	2.05±0.01	2.17±0.02
500	2.03±0.01	2.04±0.01	2.03±0.01	2.21±0.02	2.03±0.01	2.24±0.01	2.03±0.01	2.12±0.03
750	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.22±0.01	2.05±0.01	2.21±0.03	2.05±0.01	2.16±0.01
1000	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.21±0.01	2.05±0.01	2.17±0.02	2.05±0.01	2.15±0.02

ตารางที่ 4 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีเขียวบนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
0.5	3.01±0.01	3.05±0.01	3.01±0.01	3.98±0.02	3.01±0.01	3.21±0.01	3.01±0.01	3.45±0.03
1	3.01±0.01	3.06±0.01	3.01±0.01	4.59±0.02	3.01±0.01	3.33±0.04	3.01±0.01	4.14±0.01
1.5	3.01±0.01	3.08±0.01	3.01±0.01	4.70±0.04	3.01±0.01	3.58±0.04	3.01±0.01	4.64±0.07
2	3.01±0.01	3.09±0.01	3.01±0.01	4.73±0.04	3.01±0.01	3.68±0.03	3.01±0.01	5.48±0.04
2.5	3.01±0.01	3.06±0.01	3.01±0.01	4.89±0.04	3.01±0.01	4.31±0.06	3.01±0.01	5.54±0.03
3	3.01±0.01	3.07±0.01	3.01±0.01	5.47±0.03	3.01±0.01	4.47±0.06	3.01±0.01	5.83±0.02
6	3.01±0.01	3.07±0.01	3.01±0.01	6.19±0.03	3.01±0.01	5.66±0.08	3.01±0.01	6.20±0.09

ตารางที่ 5 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีเขียวมมาลาไลท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
0.5	5.92±0.01	5.99±0.01	5.92±0.01	6.16±0.01	5.92±0.01	6.27±0.03	5.92±0.01	6.12±0.02
1	5.92±0.01	5.97±0.01	5.92±0.01	6.18±0.03	5.92±0.01	6.29±0.03	5.92±0.01	6.11±0.03
1.5	5.92±0.01	5.95±0.01	5.92±0.01	6.15±0.02	5.92±0.01	6.35±0.02	5.92±0.01	6.13±0.02
2	5.92±0.01	5.95±0.01	5.92±0.01	6.13±0.04	5.92±0.01	6.39±0.02	5.92±0.01	6.17±0.02
2.5	5.92±0.01	5.95±0.01	5.92±0.01	6.16±0.04	5.92±0.01	6.20±0.04	5.92±0.01	6.20±0.04
3	5.92±0.01	5.97±0.01	5.92±0.01	5.81±0.04	5.92±0.01	5.78±0.03	5.92±0.01	5.81±0.05
6	5.92±0.01	5.95±0.01	5.92±0.01	5.56±0.04	5.92±0.01	5.44±0.03	5.92±0.01	5.41±0.03

ตารางที่ 6 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเกรด โดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
0.5	2.03±0.01	2.04±0.01	2.03±0.01	2.16±0.01	2.03±0.01	2.09±0.01	2.03±0.01	2.17±0.02
1	2.03±0.01	2.04±0.01	2.03±0.01	2.15±0.01	2.03±0.01	2.14±0.01	2.03±0.01	2.17±0.01
1.5	2.03±0.01	2.05±0.01	2.03±0.01	2.17±0.01	2.03±0.01	2.16±0.01	2.03±0.01	2.21±0.01
2	2.03±0.01	2.07±0.01	2.03±0.01	2.21±0.01	2.03±0.01	2.23±0.01	2.03±0.01	2.36±0.01
2.5	2.03±0.01	2.05±0.01	2.03±0.01	2.24±0.01	2.03±0.01	2.31±0.02	2.03±0.01	2.52±0.01
3	2.03±0.01	2.06±0.01	2.03±0.01	2.36±0.04	2.03±0.01	2.41±0.01	2.03±0.01	2.72±0.04
6	2.03±0.01	2.05±0.01	2.03±0.01	2.91±0.03	2.03±0.01	2.87±0.02	2.03±0.01	3.32±0.04

ตารางที่ 7 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
25	3.02±0.01	3.07±0.02	3.02±0.01	4.19±0.04	3.02±0.01	3.74±0.02	3.02±0.01	4.31±0.01
30	3.04±0.01	3.08±0.02	3.04±0.01	4.27±0.02	3.04±0.01	3.80±0.02	3.04±0.01	4.47±0.03
35	3.02±0.01	3.07±0.02	3.02±0.01	4.17±0.03	3.02±0.01	3.77±0.04	3.02±0.01	4.51±0.02
40	3.05±0.01	3.07±0.02	3.05±0.01	4.22±0.04	3.05±0.01	3.70±0.04	3.05±0.01	4.51±0.04
45	3.06±0.01	3.09±0.02	3.06±0.01	4.19±0.01	3.06±0.01	3.84±0.04	3.06±0.01	4.35±0.03
50	3.07±0.01	3.11±0.02	3.07±0.01	4.13±0.02	3.07±0.01	3.74±0.03	3.07±0.01	4.42±0.02
55	3.09±0.01	3.13±0.02	3.09±0.01	4.17±0.02	3.09±0.01	3.76±0.02	3.09±0.01	4.28±0.03

ตารางที่ 8 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมมาลโคท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turburina* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turburina</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
25	5.91±0.01	5.95±0.01	5.91±0.01	6.15±0.01	5.91±0.01	6.30±0.01	5.91±0.01	6.19±0.01
30	5.88±0.01	5.91±0.01	5.88±0.01	6.18±0.01	5.88±0.01	6.31±0.01	5.88±0.01	6.30±0.02
35	5.90±0.01	5.93±0.01	5.90±0.01	6.18±0.02	5.90±0.01	6.25±0.02	5.90±0.01	6.16±0.03
40	5.91±0.01	5.95±0.01	5.91±0.01	6.17±0.02	5.91±0.01	6.30±0.03	5.91±0.01	6.28±0.02
45	5.88±0.01	5.92±0.01	5.88±0.01	6.26±0.03	5.88±0.01	6.34±0.04	5.88±0.01	6.22±0.02
50	5.93±0.01	5.95±0.01	5.93±0.01	6.26±0.02	5.93±0.01	6.31±0.04	5.93±0.01	6.19±0.03
55	5.92±0.01	5.97±0.01	5.92±0.01	6.20±0.01	5.92±0.01	6.30±0.04	5.92±0.01	6.18±0.01

ตารางที่ 9 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมเบนเฟนพิกเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
25	2.04±0.01	2.06±0.01	2.04±0.01	2.15±0.01	2.04±0.01	2.19±0.01	2.04±0.01	2.17±0.01
30	2.04±0.01	2.06±0.01	2.04±0.01	2.15±0.01	2.04±0.01	2.19±0.01	2.04±0.01	2.18±0.01
35	2.04±0.01	2.07±0.01	2.04±0.01	2.18±0.01	2.04±0.01	2.16±0.01	2.04±0.01	2.20±0.01
40	2.05±0.01	2.09±0.01	2.05±0.01	2.17±0.01	2.05±0.01	2.15±0.01	2.05±0.01	2.24±0.01
45	2.06±0.01	2.08±0.01	2.06±0.01	2.16±0.01	2.06±0.01	2.15±0.01	2.06±0.01	2.25±0.01
50	2.06±0.01	2.09±0.01	2.06±0.01	2.19±0.01	2.06±0.01	2.14±0.01	2.06±0.01	2.26±0.01
55	2.07±0.01	2.09±0.01	2.07±0.01	2.15±0.01	2.07±0.01	2.15±0.01	2.07±0.01	2.25±0.01

ตารางที่ 10 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

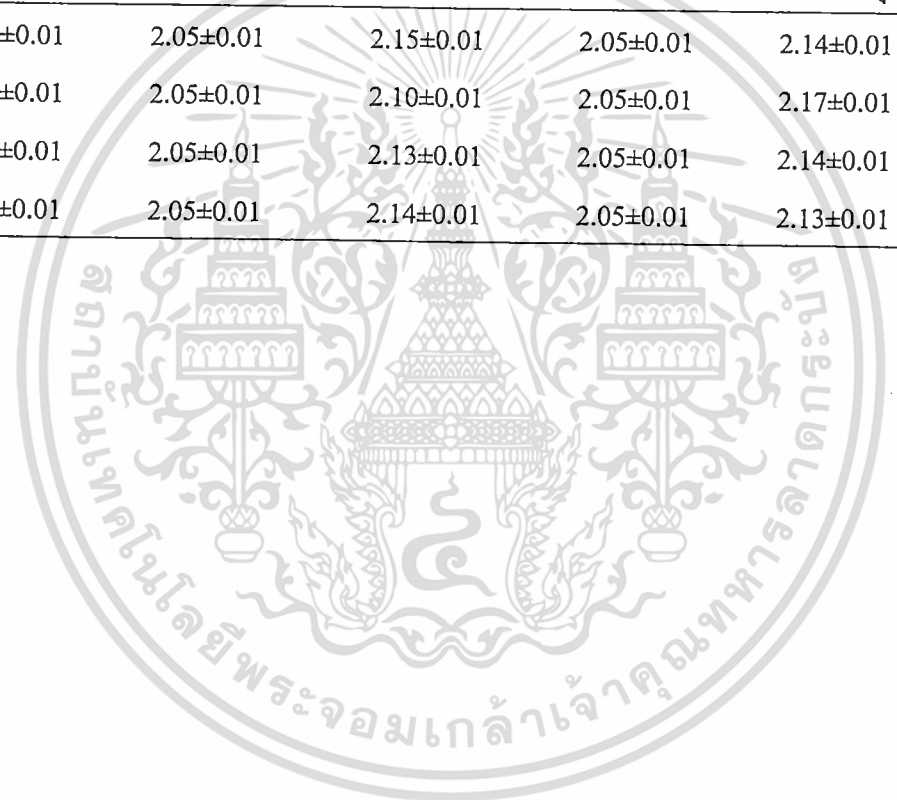
ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Rhizoclonium</i> sp.		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
น้อยกว่า 0.1	3.03±0.01	3.07±0.01	3.03±0.01	4.14±0.04	3.03±0.01	3.78±0.03	3.03±0.01	4.42±0.04
0.1-0.24	3.04±0.01	3.06±0.01	3.04±0.01	4.12±0.04	3.04±0.01	3.73±0.03	3.04±0.01	4.33±0.04
0.25-0.49	3.03±0.01	3.05±0.01	3.03±0.01	4.05±0.03	3.03±0.01	3.76±0.02	3.03±0.01	4.15±0.01
0.5-1	3.05±0.01	3.09±0.01	3.05±0.01	4.33±0.02	3.05±0.01	3.78±0.03	3.05±0.01	4.15±0.02

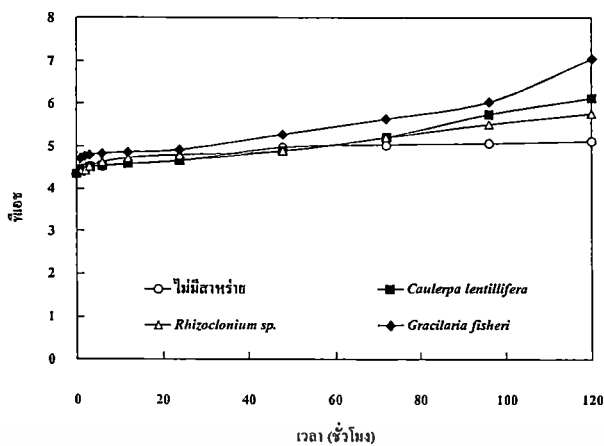
ตารางที่ 11 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
น้อยกว่า 0.1	5.88±0.01	5.91±0.01	5.88±0.01	6.64±0.05	5.88±0.01	6.34±0.06	5.88±0.01	6.37±0.04
0.1-0.24	5.88±0.01	5.93±0.01	5.88±0.01	6.72±0.06	5.88±0.01	6.38±0.07	5.88±0.01	6.35±0.06
0.25-0.49	5.88±0.01	5.93±0.01	5.88±0.01	6.71±0.03	5.88±0.01	6.28±0.02	5.88±0.01	6.25±0.03
0.5-1	5.88±0.01	5.94±0.01	5.88±0.01	6.69±0.04	5.88±0.01	6.28±0.01	5.88±0.01	6.19±0.01

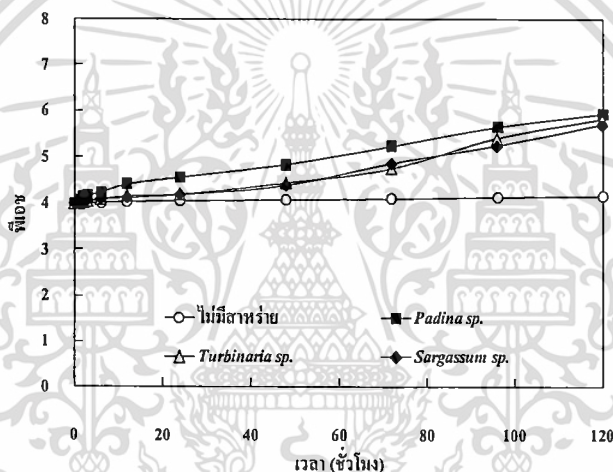
ตารางที่ 12 พีเอชเริ่มต้นและสิ้นสุดในการดูดซับสีข้อมเบเนฟิเคเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม่มีสาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<i>Gracilaria fisheri</i>	
	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสิ้นสุด
น้อยกว่า 0.1	2.05±0.01	2.06±0.01	2.05±0.01	2.15±0.01	2.05±0.01	2.14±0.01	2.05±0.01	2.17±0.01
0.1-0.24	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.10±0.01	2.05±0.01	2.17±0.01	2.05±0.01	2.18±0.01
0.25-0.49	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.13±0.01	2.05±0.01	2.14±0.01	2.05±0.01	2.19±0.02
0.5-1	2.05±0.01	2.07±0.01	2.05±0.01	2.14±0.01	2.05±0.01	2.13±0.01	2.05±0.01	2.17±0.01

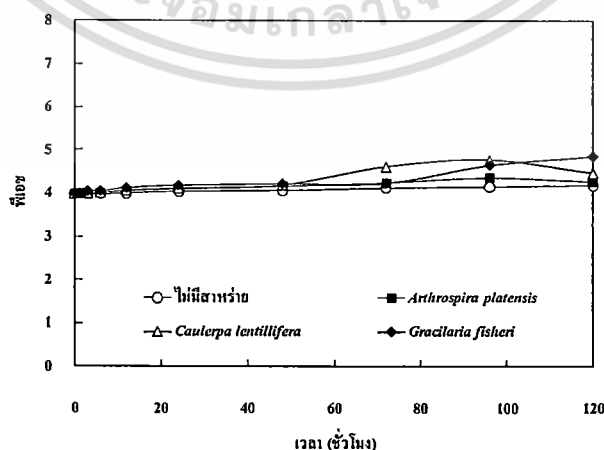




ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงฟิโอสในระบบการดูดซับสีย้อมเบนเวลอลเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงฟิโอสในระบบการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงฟิโอสในระบบการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้