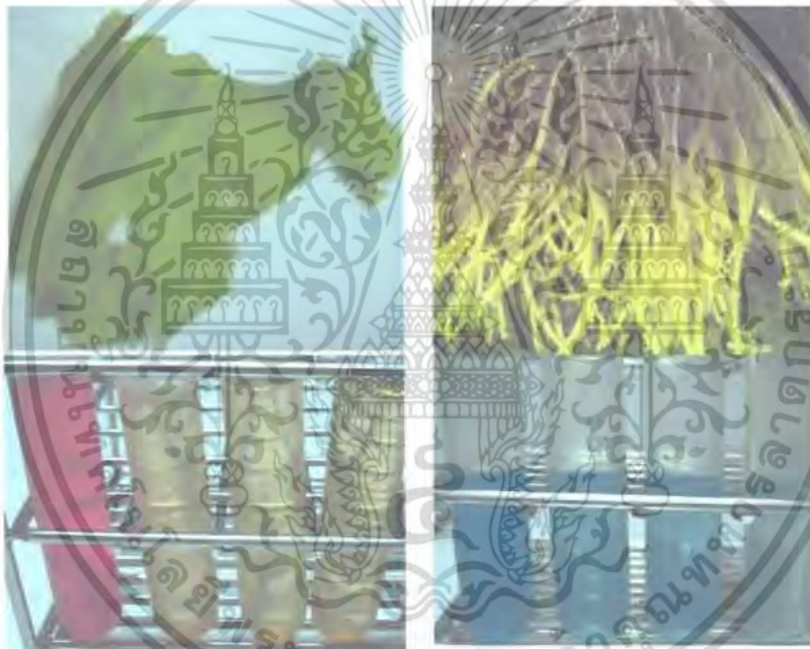




รายงานการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554

การกำจัดสีข้อมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

Bioremoval of dyes from wastewater by using algae as biosorbent



อ. ศุภิต เอื้ออำนวย

รศ. ดร. สุณีรัตน์ เรืองสมบุญ

ผศ.ดร. จันทิมา ชั่งสิริพร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2554

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554

การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

Bioremoval of dyes from wastewater by using algae as biosorbent



RC14

TD

452.5

C65

0464

อ. ดุสิต เอื้ออำนวย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....120248
วัน, เดือน, ปี.....13 ก.พ. 2555

รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
ผศ.ดร. จันทิมา ชังสิริพร

b. 12/369834
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2554

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

Bioremoval of dyes from wastewater by using algae as biosorbent



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2554

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การกำจัดสีข้อมจากน้ำเสีย โดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

Bioremoval of dyes from wastewater by using algae as biosorbent

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงิน 240,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัย อ. คุสิต เอื้ออำนวย

รศ. ดร. สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์

ผศ.ดร. จันทิมา ชั่งศิริพร

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร. 02-326-4099



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

การศึกษาการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาโคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด โดยสาหร่ายแห้ง 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. พบว่าสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดได้สูงคือ *G. fisheri* ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) เท่ากับ 483.46 ± 9.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมมาลาโคท์กรีนได้สูงคือ *Padina* sp. ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 288.80 ± 9.30 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรดได้สูงคือ *G. fisheri* ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 293.19 ± 8.76 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

จากการนำสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงจากขั้นต้นมาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาโคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด 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 สีย้อมมาลาโคท์กรีนอยู่ระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส และสี 55 ย้อมเบนเนฟิเคเรดที่ 50 องศาเซลเซียส โดยพบว่าค่าเอนทัลปี (ΔH) ของการดูดซับสีย้อมทุกประเภทโดยสาหร่ายมีค่าเป็นบวก

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาโคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด โดยสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir จลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* การดูดซับของสีย้อมมาลาโคท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. การดูดซับของสีย้อมเบนเนฟิเคเรด โดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และมีอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สองเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ยกเว้น *C. lentillifera* มีอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิเคเรดขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรกเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าสาหร่าย *G. fisheri*, *Padina* sp. และ *A. platensis* มีความสามารถในการบำบัดสีย้อมเบนเนวอลเรด มาลาโคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรดได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 31.40 ± 0.54 , 3.27 ± 0.01 และ 50.89 ± 1 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

คำสำคัญ : สีย้อม การกำจัดสีย้อม สาหร่าย การดูดซับชีวภาพ การบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ผู้ใช้ควรดูเงื่อนไขการใช้งานฉบับเต็มก่อนการนำข้อมูลไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. *G. fisheri* showed high benewol red removal ability (Q_{max}) of 483.46 ± 9.53 mg/g dry wt. *Padina* sp. showed high malachite green removal ability of 288.80 ± 9.30 mg/g dry wt. *G. fisheri* showed high benefix red removal ability of 293.19 ± 8.76 mg/g dry wt.

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. The enthalpy (ΔH) of all dye removal by all algae were positive value.

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.

Key words: dyes, dye removal, algae, biosorption, wastewater treatment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	4
สารบัญ	6
สารบัญตาราง	7
สารบัญภาพ	10
บทนำ	11
ตรวจเอกสาร	14
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
สรุป	101
เอกสารอ้างอิง	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)	33
2 การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)	38
3 การดูดซับสีย้อมเบนเฟิครีด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)	40
4 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ	44
5 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ	45
6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครีดที่จุดสมดุล โดยสาหร่ายชนิดต่างๆ	46
7 ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลของตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีย้อม	48
8 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด	49
9 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน	50
10 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมเบนเฟิครีด	51
11 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของตัวดูดซับต่างๆ ในการดูดซับสีย้อม	54
12 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน	58
13 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน	59
14 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเฟิครีด โดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน	60
15 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน	64
16 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน	65
17 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนเฟิครีด โดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)	หน้า
ตารางที่	
18 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	70
19 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ ของการดูดซับสีของเบนเนวอลเรด	71
20 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	72
21 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีของมาลาไคท์กรีน	73
22 ค่าการดูดซับสีของเบนเนฟิคโดย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	73
23 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีของเบนเนฟิคเรด	73
24 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย <i>Caulerpa lentillifera</i> , <i>Rhizoclonium</i> sp. และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน	78
25 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย <i>Padina</i> sp., <i>Turbinaria</i> sp. และ <i>Sargassum</i> sp. ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน	79
26 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของเบนเนฟิคเรดโดยสาหร่าย <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracilaria fisheri</i> ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน	80
27 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดย <i>Caulerpa lentillifera</i>	82
28 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดย <i>Rhizoclonium</i> sp.	83
29 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดย <i>Gracilaria fisheri</i>	84
30 ความเข้มข้นของสีของเบนเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i>	84
31 ความเข้มข้นของสีของเบนเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Rhizoclonium</i> sp.	85
32 ความเข้มข้นของสีของเบนเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i>	85
33 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของมาลาไคท์กรีนโดย <i>Padina</i> sp.	86
34 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของมาลาไคท์กรีนโดย <i>Turbinaria</i> sp.	87
35 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีของมาลาไคท์กรีนโดย <i>Sargassum</i> sp.	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
36 ความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Padina</i> sp.	88
37 ความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Turbinaria</i> sp.	88
38 ความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Sargassum</i> sp.	89
39 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเกรดโดย <i>Arthrospira platensis</i>	90
40 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเกรดโดย <i>Caulerpa lentillifera</i>	90
41 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเกรดโดย <i>Gracilaria fisheri</i>	91
42 ความเข้มข้นของสีข้อมเบนเนฟิเกรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Arthrospira platensis</i>	91
43 ความเข้มข้นของสีข้อมเบนเนฟิเกรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Caulerpa lentillifera</i>	92
44 ความเข้มข้นของสีข้อมเบนเนฟิเกรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ <i>Gracilaria fisheri</i>	92
45 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเกรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม	97
46 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม	98
47 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเกรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การดูดซับสีข้อมเบนเวลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอช เหมาะสม (พีเอช 3) (ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)	34
2 การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอช เหมาะสม (ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)	35
3 การดูดซับสีข้อมเบนเฟ็คเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอช เหมาะสม (พีเอช 2) (ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดสีข้อมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

บทนำ

สีข้อม (Dyes) เป็นสีสังเคราะห์ มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ข้อมผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ ฟอกหนัง ข้อมสีกระดาษ เคลือบกล่องกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อาหาร เครื่องสำอาง และมีปริมาณการใช้สีข้อมเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มผลผลิตของโรงงาน อุตสาหกรรม การผลิตสีข้อมทั่วโลกมีมากถึงเจ็ดแสนตันต่อปี โดยมีสีข้อมที่แตกต่างกันถึงหนึ่งหมื่นชนิด ซึ่งประมาณ 10-แหล่งน้ำโดยเปอร์เซ็นต์ ของสีข้อมที่ผลิตขึ้นทั้งหมดนี้ถูกปล่อยลงสู่ 15 ไม่มีการกำจัดออกจากร้าน้ำทิ้งก่อน (Aksu and Tezer, 2005; Mishra and Tripathy, 1993)

การทิ้งน้ำที่มีสีข้อมปนเปื้อนลงแหล่งน้ำ ทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ และทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงตามมา โดยสีข้อมเมื่อเข้าสู่แหล่งน้ำจะมีความคงตัว อยู่ในแหล่งน้ำ ไม่ย่อยสลายด้วยวิธีการทางธรรมชาติ ทำให้มีปริมาณ BOD, COD ในน้ำสูงขึ้น ทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี บดบังแสงในแหล่งน้ำ ยับยั้งการพัฒนาของพืชและสัตว์น้ำ สีข้อมบางชนิดมีความเป็นพิษ โดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง (El-Sheekh et al., 2009) สีข้อมชนิด (Malachite Green) มีการแพร่เข้าไปสะสมและตกค้างในตัวสัตว์น้ำ เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์น้ำจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง ซึ่งขณะนี้ในประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา สหภาพยุโรป ได้ออกกฎระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ตกค้างในสัตว์น้ำที่จำหน่ายเพื่อการบริโภค สีข้อมบางชนิดเมื่อมนุษย์ได้รับพิษเข้าไปจะมีอาการหายใจผิดปกติ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง (Bhattacharyya and Sharma, 2005) ดังนั้นจึงควรมีการลดปริมาณสีข้อมด้วยวิธีที่เหมาะสมออกจากร้าน้ำเสีย ก่อนที่จะปล่อยน้ำเหล่านั้นลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมปนเปื้อน เช่นการใช้โอโซน ทุ่นลอยน้ำไฟฟ้า การกรองด้วยเยื่อกรอง การฉายรังสี การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวอร์สออสโมซิส และการตกตะกอน (Mittal et al., 2005) ซึ่งพบว่าวิธีดังกล่าวบางครั้งยังมีประสิทธิภาพต่ำ ราคาแพง นอกจากนี้ยังมีการสร้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป

ปัจจุบันวิธีการกำจัดสีข้อมด้วยวิธีการดูดซับ (adsorption) เป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยม เพราะมีประสิทธิภาพ โดยตัวดูดซับที่ใช้คือคาร์บอนกัมมันต์ ที่มีค่าการดูดซับสีข้อมหลายประเภท ได้ค่อนข้างสูง (Robinson et al., 2001) แต่มีปัญหาคือยังมีต้นทุนสูง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาตัวดูดซับที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เช่นการใช้เปลือกส้ม กากผลปาล์ม ถ่าน เปลือกไม้ เศษผ้า แกลบ ชานอ้อย แฉจากชานอ้อย แฉจากไม้ และสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่มีปริมาณมากในธรรมชาติและหลายชนิดไม่มีการนำไปใช้เพื่อเพิ่มมูลค่า โดยมีรายงานว่าสาหร่ายบางชนิดมีความสามารถกำจัดสีข้อมได้ดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์ และสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดมีความสามารถในการทำลายสีข้อมได้สูง โดยการพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ในการกำจัดสีข้อม (Pandey et al., 2007)

จากการทดลองกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี แต่เมื่อสีมีความเข้มข้นต่ำ จะทำให้มีค่าใช้จ่ายของสารเคมีสูง ซึ่งสมควรหาตัวดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้กำจัดสีข้อมเป็นขั้นตอนต่อไป (จันทิมา, 2552)

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อคัดเลือกชนิดของสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมได้สูง ราคาถูก หาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการดูดซับและศึกษากลไกในการกำจัดสีข้อมของสาหร่ายชนิดนั้น ๆ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกล่องกระดาษ (หรือโรงงานที่ใช้สีข้อม) ที่ใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ และนำไปใช้ในการกำจัดสีข้อมต่อจากขั้นตอนการตกตะกอนต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1 คัดเลือกหาชนิดสาหร่ายที่มีความสามารถในการดูดซับสีช้อมได้มีประสิทธิภาพสูง และมีต้นทุนต่ำ
- 2 หาสภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ในการดูดซับสีช้อมของสาหร่ายแต่ละชนิด เพื่อให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีช้อมได้สูงสุด ศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับสีช้อม (adsorption kinetics) ของสาหร่าย เพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีช้อมปนเปื้อน
- 3 ศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายในการกำจัดสีช้อมจากน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรม (โรงงานผลิตกล่องกระดาษ) เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ
- 4 ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีช้อมปนเปื้อน โดยใช้วิธีตกจมในขั้นต้น และต่อด้วยวิธีดูดซับทางชีวภาพด้วยสาหร่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจเอกสาร

ลักษณะของสีย้อม

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

สีย้อมเป็นสารเคมีจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวสามารถเปลี่ยนให้เป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใยและกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป สีย้อมจะยึดติดกับเส้นใยด้วยอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond), แรงแวนเดอวัลส์ (Van der Waals' force), แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) แรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การยึดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อมให้มองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอม

การจำแนกประเภทสีย้อมตามประจุเมื่อแตกตัวในการละลายแบ่งได้เป็นสีย้อมที่มีประจุเป็นบวก (Basic dye) หรือ ลบ (Acidic dye)

1. สีเอซิก (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิกบางชนิดสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิกไม่ทนการซัก ประกอบด้วยหมู่ sulphonates (SO_3^-), carboxylates (CO_2^-) หรือ sulphates (SO_4^-) (Ozer et al., 2006a)

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

3. สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เพราะสีรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ ทำให้สีรีแอค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่พติดอกอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทนทานต่อการซักล้าง ด้วยจุดเด่นข้อนี้ทำให้ความนิยมในการใช้สีรีแอคทีฟจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (ภาวี, 2542)

อันตรายและปัญหาที่เกิดจากสีย้อม

อันตรายจากสีย้อม

สีย้อมเป็นสาเหตุทำให้เกิดมนุษย์เกิดอาการแพ้ ระบายท้อง เป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในมนุษย์ (Bhattacharyya and Sharma, 2004; <http://europa.eu.int>) และมีพิษทำให้สัตว์น้ำตาย สีย้อมชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษรุนแรงคือ Malachite Green (MG) ซึ่งนิยมใช้ในการป้องกันหรือรักษาโรคที่เกิดจากเชื้อราและปรสิตเซลล์เดียวในสัตว์น้ำ มีฤทธิ์ต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์สำหรับ Leucomalachite Green (LMG) เป็นสารที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี (metabolite) ของ Malachite Green สามารถตกค้างในสัตว์ได้ยาวนานกว่า MG ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งทั้งในสัตว์และในมนุษย์ ดังนั้นจึงถือเป็นสารต้องห้าม ไม่ให้มีตกค้างในสัตว์น้ำ ซึ่งประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ ได้ออกกฏระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค (www.nfi.or.th)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดจากสีย้อม

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

น้ำทิ้งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสีย้อมปนเปื้อนในความเข้มข้นที่สูง เมื่อลงสู่แหล่งน้ำ จะทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี (Mohan et al., 2002) สีย้อมเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้น้ำมีสีเขียวขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน (Gupta et al., 2004a) โดยสีจะบดบังการส่องแสงลงในแหล่งน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และสีย้อมยังเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยตรง เพราะมีโลหะต่าง ๆ และคลอไรด์ ฯลฯ ปะปนอยู่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการกำจัดสีข้อมจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก

การบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมปนเปื้อน

การกำจัดสีข้อมโดยทั่วไป

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมปนเปื้อนที่ใช้อยู่มีหลายวิธี อาจมีการใช้วิธีทางชีวภาพร่วมกับวิธีทางเคมีและกายภาพ เพื่อให้สามารถลดปริมาณสีข้อมได้มากที่สุด เช่นการใช้สารเคมี การใช้โอโซน การใช้แสงให้เกิดการออกซิเดชัน การใช้ไฟฟ้า การใช้รังสี ใช้รีเวอร์ส ออสโมซิส ใช้การแลกเปลี่ยนไอออน การกรองด้วยเยื่อกรอง และการทำให้รวมกลุ่มตกตะกอน (Daneshvar et al., 2004a, b; Gupta et al., 2004a, b; Jain et al., 2003; Mittal et al., 2005; Robinson et al., 2001) แต่พบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมแบบดั้งเดิมไม่สามารถกำจัดสีข้อมได้ หรือกำจัดได้มีประสิทธิผลต่ำ มีราคาแพง มีข้อจำกัดในการใช้ และขี้ส้างของเสียที่เป็นพิษ (sludge) หลังจากการบำบัดปริมาณมาก ซึ่งขากในการนำไปกำจัดต่อไป (Kumar et al., 2006)

การกำจัดสีข้อมโดยใช้ปฏิกิริยาเฟ้นต้นร่วมกับการตกตะกอน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของสีข้อมในน้ำเสียมีปริมาณน้อย (แต่ยังเป็นค่าที่เป็นอันตรายต่อแหล่งน้ำ) การใช้สารเคมีจะมีต้นทุนสูง ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณมาก ๆ ซึ่งการใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพในการกำจัดสีข้อมจากน้ำเสียค่อนข้างขั้นตอนการตกตะกอนด้วยสารเคมีจะมีความเหมาะสมมากกว่า (จันทิมา, 2552)

การกำจัดสีข้อมโดยวิธีชีวภาพ

วิธีที่นิยมในปัจจุบันในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม คือใช้วิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี และส่วนใหญ่ในอดีตตัวดูดซับที่นิยมคือคาร์บอนกัมมันต์ ที่มีค่าการดูดซับสีข้อมหลายประเภทได้ค่อนข้างสูง (Choy et al., 1999; Robinson et al., 2001) แต่ปัญหาคือราคาของคาร์บอนกัมมันต์ยังมีราคาสูง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาวิธีบำบัดที่มีค่าใช้จ่ายลดลง เช่นการหาประเภทตัวดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เช่นการใช้เปลือกส้ม (Namasivayam et al., 1996) กากผลปาล์ม (Nassar and Magdy, 1997) ถ่าน (Ho and McKay, 1998) เปลือกไม้ เศษผ้า แกลบ (McKay et al., 1999) ชานอ้อย (Khattri and Singh, 1999) เถ้าจากชานอ้อย (Gupta et al., 2000) เถ้าจากไม้ (McKay et al., 2003) และสาหร่าย (Marungrueng and Pavasant, 2007; Bekci et al., 2009; Hoffmann and Bauknecht, 1999; Ozer et al., 2006a, b; El-Sheekh et al., 2009)

สาหร่ายเป็นตัวดูดซับชีวภาพที่มีปริมาณมากในธรรมชาติ หลายชนิดไม่มีการนำไปใช้เพื่อเพิ่มมูลค่า และยิ่งกว่านั้นยังพบมีรายงานว่าสาหร่ายบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมได้ดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์ (Marungrueng and Pavasant, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายและความเหมาะสมในการนำมาดูดซับสีย้อม

ความเหมาะสมในด้านปริมาณของสาหร่าย

สาหร่ายมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เนื่องจากสาหร่ายมีอยู่มากมายในธรรมชาติ โดยมีหลักฐานพบว่า การสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนโลกนั้น เกิดจากสาหร่ายถึง 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเก็บสาหร่ายจากธรรมชาติมาเป็นอาหารหรือนำมาสกัดผลผลิตต่าง ๆ มีมากถึง 3 ล้านตันต่อปี โดยพบว่าผลผลิตที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีปริมาณให้เก็บเกี่ยวได้ สำหรับสาหร่ายสีแดงมีประมาณ 2.6 ล้านตัน และ สาหร่ายสีน้ำตาลมีสูงถึงประมาณ 16 ล้านตัน (Schiewer and Volesky, 2000)

สาหร่ายหลายชนิดมีต้นทุนในการเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวต่ำ โดยสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดสามารถเก็บจากธรรมชาติและนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องทำการเพาะเลี้ยงเอง เช่น สาหร่ายกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* ซึ่งเป็นชนิดที่พบว่ามีกระบวนการในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม หรือในแหล่งน้ำธรรมชาติได้บ่อยและมีปริมาณมาก สามารถใช้กรองหรือฝากรองขนาดช่องตาไม่เกิน 60 ไมครอนเก็บได้ นอกจากนี้ยังมีสาหร่ายสีเขียวเช่น *Spirogyra*, *Cladophora* และ *Microspora* ที่พบได้ตามแหล่งน้ำ แม่น้ำธรรมชาติ มีขนาดใหญ่สามารถใช้มือเก็บได้ ซึ่งสาหร่ายที่เก็บได้เองจากธรรมชาติย่อมมีต้นทุนต่ำ มีเฉพาะค่าเดินทางในการเก็บและการนำกลับมาตากแห้ง เพื่อเก็บไว้ใช้ต่อไป

สำหรับสาหร่ายขนาดใหญ่จะพบในทะเลปริมาณมาก โดยเฉพาะกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาล เช่น *Sargassum*, *Padina* สาหร่ายสีแดง *Gracilaria* สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa* ซึ่งสาหร่ายเหล่านี้จะถูกพัดพาขึ้นมาโดยคลื่นมาติดบริเวณชายหาดเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะเมื่อถึงฤดูกาลที่สาหร่ายเหล่านี้เจริญเติบโตสูงสุด โดยพบว่าในบางสถานที่ โดยเฉพาะแหล่งท่องเที่ยว สาหร่ายเหล่านี้บดบังทัศนียภาพทั้งดงามที่ชายหาด จนต้องมีการกำจัดทิ้ง ต้องเสียค่าแรงงานในการเก็บ ค่าใช้จ่ายในการกำจัด เช่น การกำจัดสาหร่าย *Gracilaria* ออกจากชายหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี เป็นต้น ซึ่งสาหร่ายเหล่านี้สามารถเก็บมาใช้ประโยชน์ได้

นอกจากนี้สาหร่ายขนาดใหญ่ยังได้มีการเพาะเลี้ยงไว้ในบ่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสัตว์น้ำเพื่อช่วยในการบำบัดน้ำ ซึ่งไม่มีต้นทุนเรื่องสารเคมีเพราะใช้ธาตุอาหารจากน้ำที่ระบายออกมาจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น สาหร่ายสีเขียว *Ulva*, *Caulerpa*, *Chaetomorpha*, *Rhizoclonium*, *Cladophora*, *Enteromorpha* สาหร่ายสีแดง *Acanthophora*, *Gracilaria* เป็นต้น โดยสาหร่ายเหล่านี้เมื่อใช้บำบัดน้ำเสียผ่านไปสักระยะหนึ่งจะมีผลผลิตเพิ่มขึ้นมีปริมาณมากจนเกินความต้องการ เพราะสารอาหารที่มากทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดี จนหนาแน่นเกินไป เกิดการบังแสงแดดที่ส่องลงพื้นท้องน้ำ และบดบังแสงแดดระหว่างกันเอง ซึ่งจะทำให้สาหร่ายบางส่วนตายและเน่าเสียในบ่อได้ ดังนั้นเมื่อสาหร่ายมีมากเกินไปจะต้องทำการกำจัดจากบ่อบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงนำสาหร่ายเหล่านี้มาใช้ได้ต่อไป โดยไม่ต้องมีต้นทุนในการเพาะเลี้ยง

ความเหมาะสมในด้านคุณภาพของสาหร่ายในการกำจัดสีข้อม

การดูดซับทางชีวภาพในสาหร่ายส่วนใหญ่เกิดที่ผนังเซลล์เป็นหลัก ผนังเซลล์เป็นส่วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง เมื่อสัมผัสกับสารละลายสีข้อม ไอออนของสีข้อมจะจับกับผนังเซลล์หรือกับเยื่อหุ้มเซลล์ของสาหร่าย (Rothstein, 1959) โดยที่ผิวนอกสุดของเซลล์สาหร่าย ทั้งกลุ่มโปรคาริโอตและยูคาริโอตประกอบด้วยโปรตีน ไบมัน และคาร์โบไฮเดรต (พอลิแซ็กคาไรด์) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะจับกับประจุที่มีอยู่ในสีข้อม (Marungrueng and Pavasant., 2006)

หมู่ฟังก์ชันที่พบที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายที่ทำหน้าที่จับสีข้อมคือหมู่คาร์บอนิล (C=O) กลุ่ม -COOH, SO_4^{2-} , $-\text{NH}_2$, OH และ -SH (Volesky, 1990; Percival, 1967; Eccles, 1999) หมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และซัลโฟนิล สามารถแตกตัวได้และกลายเป็นประจุลบ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถไปจับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นโครงสร้างของสีข้อมเบสิก เช่น โครงสร้างจตุรภูมิของแอมโมเนียมไอออน (NR_4^+) และ ไนโตรเนียมไอออน (NO_2^+) ซึ่งทำให้สามารถกำจัดสีข้อมออกจากราน้ำเสียได้ (Marungrueng and Pavasant, 2007)

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

สาหร่ายหลายชนิดแสดงศักยภาพในการลดปริมาณสีข้อมและทำให้สีจางลงได้ เช่น *Oscillatoria* sp., *Chlorella pyrenoidosa* และ *C. vulgaris* สามารถกำจัดสีข้อมกลุ่ม azo dye ได้ดี (สีข้อมที่มี -N=N- เป็นองค์ประกอบ) (Acuner and Dilck, 2004) สาหร่ายขนาดเล็กในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย และสาหร่ายสีเขียว สามารถกำจัดสีข้อมจากสารละลายโดยการสะสมไว้ในเซลล์ หรือการเปลี่ยนรูปให้ไม่เป็นพิษ แต่ความสามารถในการกำจัดขึ้นกับชนิดของสาหร่ายขนาดเล็กเหล่านั้น (Lei et al., 2002)

และพบรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถในการทำลายสีข้อมได้สูง โดยการพัฒนาระบบเอนไซม์เพื่อใช้ในการลดสี (decolorisation) และลดปริมาณแร่ธาตุ ไอออนต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในสีข้อม (mineralization) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แน่นอน (Dandey et al., 2007) และมีข้อดีอีกคือขนาดของสาหร่ายจะมีขนาดใหญ่สามารถกำจัดได้ง่ายกว่าการใช้กลุ่มแบคทีเรียหรือฟังไจเป็นตัวดูดซับสีข้อม

ข้อดีของการใช้สาหร่ายในการดูดซับสีข้อม

สาหร่ายทั้งสาหร่ายขนาดเล็กและสาหร่ายขนาดใหญ่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพ (Hu, 1998; Volesky, 1990; Van-Hille et al, 1999) ซึ่งข้อดีของสาหร่ายขนาดเล็กคือสามารถเพาะเลี้ยงเพื่อขยายให้มีปริมาณมากได้เร็ว ไม่ต้องรอกับเกี่ยวจากธรรมชาติเหมือนสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นเป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันการศึกษานี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ซึ่งผลผลิตจะขึ้นกับฤดูกาล แต่มีต้นทุนในการเพาะเลี้ยง (Lee, 2001) ข้อดีของสาหร่ายขนาดใหญ่คือมีอยู่มากในธรรมชาติ สามารถเก็บมาตากแห้งและนำมาใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพได้ ก้กำจัดออกจากระบบบำบัดได้ง่ายกว่าสาหร่ายขนาดเล็ก

สาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสี้อมได้อย่างเฉพาะเจาะจงคือสามารถเลือกดูดสี้อมบางชนิดได้ และสาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการกำจัดสี้อมหลาย ๆ ชนิดได้พร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังสามารถล้าง (desorption) สี้อมออกมาจากเซลล์สาหร่ายได้ ซึ่งการที่สามารถล้างสี้อมออกมาได้ทำให้สามารถนำสี้อมเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่ และตัวดูดซับหรือสาหร่ายก็สามารถนำกลับไปใช้ดูดซับสี้อมใหม่ได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี้อม โดยสาหร่าย

ประสิทธิภาพการดูดซับ ไอออนสี้อมของสาหร่ายนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสี้อม ปริมาณตัวดูดซับเป็นต้น (Akhtar et al., 2003) โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลกระทาต่อการดูดซับสี้อม โดยสาหร่ายมีดังนี้

พีเอช

ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี้อม โดยสาหร่าย เพราะค่าพีเอชมีความเกี่ยวข้องกับการละลายของสี้อมในน้ำ และการทำงานของหมู่ฟังก์ชันหรือตำแหน่งยึดจับที่อยู่บนผิวเซลล์ของสาหร่าย หมู่ฟังก์ชันแต่ละประเภทมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid dissociation constant- pKa) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำงานหรือจะสามารถยึดจับกับไอออนของสี้อม ได้ก็ต่อเมื่อมีค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมคือเท่ากับหรือสูงกว่าค่า pKa นั้นเอง โดยมีรายงานถึงค่า pKa ของหมู่ carboxyl, phosphate และ hydroxyl ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะทำหน้าที่ในการจับ ไอออน ได้ดีที่พีเอชในช่วง 2-5, 5-9 และ 9-12 ตามลำดับ (Cho et al., 1994)

พีเอชยังมีผลต่อการละลายของสี้อม โดยสี้อมแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายได้แตกต่างกันไป ซึ่งสาหร่ายจะกำจัดสี้อมได้ดีเมื่อสี้อมอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่เป็นไอออน แต่อย่างไรก็ตาม แม้พีเอชค่าจะทำให้สี้อมละลายซึ่งทำให้สาหร่ายสามารถจับหรือกำจัดสี้อมเหล่านี้ได้ดี แต่พีเอชค่ามีข้อเสียคือมีปริมาณ H สูง ซึ่งสามารถไปแข่งขันกับประจุบวกของสี้อม ในการจับกับตำแหน่งยึดจับที่ผิวเซลล์สาหร่ายได้ ดังนั้นพีเอชที่ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมของสาหร่ายลดลงได้เช่นกัน (Ahner et al., 1994; Matheickal et al., 1999) แต่ยกเว้นในกรณีทีสี้อมบางชนิดมีค่าเป็นประจุลบที่พีเอชค่า พบว่าการดูดซับที่พีเอชค่าเกิดได้ดี เป็นเพราะประจุลบของสี้อม จับกับประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์สาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพบว่าเมื่อนำสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* มาดูดซับสี acid dyes ซึ่งเป็นสีข้อมที่มีไอออนลบ ที่พีเอชของสารละลายสีข้อมเท่ากับ 2-6 พบว่าสาหร่ายดูดซับสีข้อมได้ดีที่พีเอช 2-3 (Ozer et al., 2005) ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของเซลล์สาหร่ายและไอออนที่มีประจุลบของสีข้อม เมื่อ pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประจุลบที่อยู่บนผิวหน้าของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นและประจุบวกลดลง ผิวหน้าที่มีประจุลบจะไม่ส่งผลให้ดูดซับสีข้อมที่มีไอออนลบ โดยทั่วไปการดูดซับสีข้อมที่เป็นกรดจะดูดซับได้มากในสถานะสารละลายที่เป็นกรดมากกว่าที่เป็นกลางและด่าง (Ozer et al., 2006a)

โดยมีรายงานการศึกษาว่า การใช้สาหร่าย *Enteromorpha* ดูดซับ methylene blue พบว่ามีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6-10 (Ncibi et al., 2009), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสี reactive dye มีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 3 (Khalaf, 2008), การใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสี acid red มีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 3 (Ozer et al., 2006b), การใช้สาหร่าย *Cosmarium* ดูดซับสีข้อม malachite green มีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 9 (Daneshvar et al., 2007a), การใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ดูดซับสี reactive dye มีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 2 (Aksu and Tezer, 2005), การใช้สาหร่าย *Caulepa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีข้อม malachite green มีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6 (Bekci et al., 2009)

อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการดูดซับสีข้อม เพราะความเร็วของปฏิกิริยา (rate of chemical reaction) ขึ้นกับอุณหภูมิ หรือความเร็วในการที่หมู่ฟังก์ชันบนเซลล์สาหร่ายจะจับกับไอออนของสีข้อมในสาหร่ายบางชนิดจะขึ้นกับอุณหภูมิ และพบว่าผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสีข้อมโดยสาหร่ายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิอาจมีผลช่วยให้ความสามารถในการดูดซับสีข้อมเพิ่มขึ้น หรืออาจไม่มีผลต่อการดูดซับก็ได้

สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ดูดซับสีข้อม พบว่าค่าสูงสุดที่ดูดซับสีข้อม acid dyes ได้คือที่อุณหภูมิ 30°C (ทดลองที่ 20, 25, 30, 35, 40 และ 50 °C) โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C จะทำให้บริเวณค่าการดูดซับลดลง บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับสีข้อมนี้มีการปลดปล่อยความร้อนออกมาในธรรมชาติ (Ozer et al., 2005)

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีข้อม acide red โดย *Spirogyra rhizopus* โดยศึกษาในช่วง (20, 30, 40, 50°C) อุณหภูมิที่ดูดซับเหมาะสมที่สุดคือ 20-30°C และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการดูดซับลดลง บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับคือ exothermic (คายความร้อน) ในธรรมชาติ (Ozer et al., 2006a)

โดยมีรายงานการศึกษาว่า การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentilifera* ดูดซับสีข้อม basic dye (astrazon blue) มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50 °C (Marungrueng and Pavasant, 2006), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสีข้อม reactive dye (synozol) มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 °C (Khalaf, 2008), การใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสีข้อม acid red มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30

°C (Ozer et al., 2006b), การใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* คูดซ์บีสีย้อม reactive dye มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25, 35 °C (Aksu and Tezer, 2005), การใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* คูดซ์บีสีย้อม acid blue มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25, 30 °C (Ozer et al., 2006a)

ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวคูดซ์บีสีย้อม

ปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกคูดซ์บีสีย้อม โดยสาหร่ายขึ้นกับระยะเวลาในการที่สาหร่ายนั้นสัมผัสกับสารละลาย หรือระยะเวลาที่ตำแหน่งยึดจับสัมผัสกับไอออนของสีที่ย้อมในสารละลายนั่นเอง โดยเมื่อสาหร่ายเริ่มสัมผัสกับไอออนของสีที่ย้อมจะเกิดการคูดซ์บีสีย้อมที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งยึดจับพื้นที่ผิวเซลล์ของสาหร่ายนั้นว่างอยู่และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งตำแหน่งยึดจับที่ผิวของสาหร่ายคูดซ์บีสีย้อมไว้เต็มแล้วทำให้ปริมาณที่ถูกคูดซ์บีสีย้อมไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ณ จุดนี้คือจุดสมดุลของการคูดซ์บีสีย้อม (equilibrium)

ซึ่งการเข้าสู่จุดสมดุลของสาหร่ายในการคูดซ์บีสีย้อมขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและชนิดของสีที่ย้อมที่แตกต่างกันด้วย เพราะชนิดสาหร่ายที่แตกต่างกันทำให้รูปร่างเซลล์หรือกลุ่มเซลล์สาหร่ายแตกต่างกันมีผลต่อพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชัน ตำแหน่งของตัวยึดจับหรือจำนวนตัวยึดจับบนผิวสาหร่ายแต่ละชนิดนั้น ๆ ที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีความสามารถในการคูดซ์บีสีย้อมได้ช้า เร็ว ต่างกัน

โดยมีรายงานการศึกษาว่า การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentilifera* คูดซ์บีสีย้อม basic dye (astrazon blue) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 60 นาที (Marungrueng and Pavasant, 2006), การใช้สาหร่าย *Enteromorpha* คูดซ์บีสีย้อม basic dye (methylene blue) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 90 นาที (Ncibi et al., 2009), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* คูดซ์บีสีย้อม reactive dye (synazol) มีระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมคือ 18 ชั่วโมง (Khalaf, 2008)

ความเข้มข้นของสีที่ย้อม

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่ย้อมมีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดสีที่ย้อมโดยสาหร่าย ความเข้มข้นสีที่ย้อมที่สูงในสารละลายจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับระหว่างผนังเซลล์ของสาหร่าย จึงทำให้มีแรงผลักดันของประจุสูง ทำให้การขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายเกิดได้แรงและเร็ว ทำให้กำจัดสีที่ย้อมได้เร็วและได้มาก ความเข้มข้นเริ่มต้นมีความสำคัญในการเป็นแรงผลักดันให้ชนะแรงต้านของมวลการขนถ่ายของโมเลกุลระหว่างน้ำและของแข็ง

Ozer et al. (2006b) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีที่ย้อมเริ่มต้นต่อการคูดซ์บีสีย้อมของ AR 274 โดยสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ความเข้มข้นของสีที่ย้อมเริ่มต้นที่ 25-3600 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ความเข้มข้นของสีข้อมเริ่มต้นต่ำ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อความเข้มข้นตั้งต้นของสีข้อมเพิ่มขึ้นปริมาณสีข้อมจะถูกดูดเพิ่มขึ้นแบบ linear

ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ

ปริมาณหรือความหนาแน่นของสาหร่าย (ตัวดูดซับ) ในสารละลายสีข้อม (biomass concentration/ density of biosorbent) แสดงถึงปริมาณของตำแหน่งยึดจับ เมื่อจำนวนสาหร่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (Carr et al., 1998) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับถึงแม้จะเพิ่มปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับหรือถูกกำจัด แต่เป็นผลทำให้ปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักสาหร่ายลดลง (Franklin et al., 2001) ซึ่งเป็นเพราะว่าที่ตัวดูดซับจำนวนมากจะเกิดการเกาะกลุ่มกันของตัวดูดซับในระหว่างการดูดซับ หรือเป็นการลดระยะห่างระหว่างตัวดูดซับลง ทำให้จำนวนตำแหน่งยึดจับสำหรับจับกับสีข้อมลดลง หรือทำให้พื้นที่ผิวสำหรับจับสีข้อมลดลง เพราะตัวดูดซับเกาะติดกันเอง (Ahuja et al. 1999a; Donmez et al. 1999) ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณตัวดูดซับที่สูงสามารถชักนำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับ

โดยมีรายงานการศึกษาว่า การใช้สาหร่าย *Enteromorpha* ปริมาณ 0.1, 0.2, 1, 2, 5, 10, 20 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีข้อม basic dye (methylene blue) พบว่า สาหร่าย 5 กรัมต่อลิตร เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ (Ncibi et al., 2009), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ปริมาณ 5, 10, 20 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีข้อม reactive yellow พบว่า สาหร่าย 5 กรัมต่อลิตร เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ (Mohan et al., 2002), การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ปริมาณ 4, 8, 12 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีข้อม reactive dye (synazol) พบว่า สาหร่าย 8 กรัมต่อลิตร เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ (Khalaf, 2008), การใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ปริมาณ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีข้อม acid red พบว่า สาหร่าย 0.5 กรัมต่อลิตร เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ (Ozer et al., 2006b)

กลไกของสาหร่ายในการดูดซับสีข้อม

จลนศาสตร์การดูดซับ

เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining/rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marungrueng and Pavasant (2007) รายงานว่าโดยทั่วไปกระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้โดย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มต้นด้วยการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มซึ่งเป็นชั้นน้ำ การแพร่เข้าสู่ภายใน และการดูดซับของสารละลายผ่านเข้าสู่ภายในผิวหน้าของรูพรุน และช่อง capillaries ของตัวดูดซับระหว่าง 3 ขั้นตอนนี้ ขั้นตอนสุดท้ายมีความสัมพันธ์กับความเร็ว และไม่สามารถพิจารณาอัตราของขั้นต้น การดูดซับสี่ข้อมถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และแพร่เข้าสู่อนุภาค โดยที่ Marungrueng and Pavasant (2007) ศึกษารูปแบบการแพร่เข้าของอนุภาคที่เข้าสู่จุดสมมูล *Caulerpa lentillifera* พบว่าขั้นการแพร่บริเวณรูพรุนเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา Aravindhan et al., (2007) ศึกษารูปแบบการแพร่เข้าของอนุภาคที่เข้าสู่จุดสมมูล *Caulerpa scalpelliformis* พบว่าขั้นการแพร่บริเวณพื้นที่ผิวเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา

และมีรายงานการศึกษาว่า อันดับของปฏิกิริยาในการใช้สาหร่าย *Pithophora* ดูดซับ malachite green เป็นปฏิกิริยา first order (Kumar et al., 2006). อันดับของปฏิกิริยาในการใช้สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ดูดซับ basic dye เป็นปฏิกิริยา pseudo second order (Marungrueng and Pavasant, 2006). อันดับของปฏิกิริยาในการใช้สาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* ดูดซับ basic dye เป็นปฏิกิริยา pseudo second order (Aravindhan et al., 2007). อันดับของปฏิกิริยาในการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ดูดซับ reactive dye เป็นปฏิกิริยา pseudo second order (Aksu and Tezer, 2005). อันดับของปฏิกิริยาในการใช้สาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับ malachite green และการใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ดูดซับ acid blue เป็นปฏิกิริยา pseudo second order (Bekci et al, 2009; Ozer et al. 2006a)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การใช้สาหร่ายดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนมีศักยภาพการดูดซับสูงสุด (maximum capacity) จนอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับเรียกว่าเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วย ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_c) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลย์ (C_c) ณ อุณหภูมิคงที่ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต้องทำที่จุดสมมูลของการดูดซับและภายใต้อุณหภูมิคงที่

การดูดซับสี่ข้อมโดยสาหร่ายนั้น ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm โดยในแต่ละการทดลองจะมีการนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสี่ข้อมโดยที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir แสดงว่ามีผิวหน้าของตัวดูดซับแบบ homogenous มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอนและไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich แสดงว่าตัวดูดซับ

ประกอบด้วยผิวหน้าที่เป็น heterogeneous ซึ่งมีความแตกต่างของชั้นซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่งยึดจับของการดูดซับ

โดยมีรายงานการศึกษาว่า การดูดซับ malachite green โดย *Pithophora* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Freundlich (Kumar et al., 2006), การดูดซับ basic dye (astrazon blue) โดย *Caulerpa lentilifera* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich (Marungrueng and Pavasant, 2006), การดูดซับ methylene blue โดย *Enteromorpha* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Langmuir (Ncibi et al., 2009), การดูดซับ basic dye โดย *Caulerpa scalpelliformis* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Freundlich (Aravindhana et al., 2007), การดูดซับ acid red โดย *Spirogyra* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ linear isotherm model (Ozer et al., 2006b), การดูดซับ malachite green โดย *Cosmarium* สอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Michaelis-Menten kinetics (Daneshvar et al., 2007a)

พลังงานในการดูดซับ

การหาค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ในการดูดซับ หากเป็นการทดลองที่ผันแปรอุณหภูมิในการดูดซับ จะสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปี (ΔH) และเอนโทรปี (ΔS) ในการดูดซับได้ Marungrueng and Pavasant (2007) ศึกษาค่า enthalpy สำหรับการดูดซับของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* พบว่ามีค่าเท่ากับ 14.87 กิโลจูลต่อโมล มีค่าเอนทัลปีเป็นบวก คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น Aravindhana et al., 2007 ศึกษาค่า enthalpy สำหรับการดูดซับของสาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* พบว่าค่าเอนทัลปี (ΔH) เท่ากับ -3.306 กิโลจูลต่อโมล มีค่าเอนทัลปีเป็นลบ คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์และวิธีการ

สาหร่าย

1 สาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย

- 1.1 *Arthrospira platensis*
- 1.2 *Phormidium angustissimum*

2 สาหร่ายสีเขียว

- 2.1 *Ulva intestinalis*
- 2.2 *Ulva rigida*
- 2.3 *Caulerpa lentillifera*
- 2.4 *Caulerpa sertularioides*
- 2.5 *Rhizoclonium* sp.
- 2.6 *Chaetomorpha* sp.

3 สาหร่ายสีน้ำตาล

- 3.1 *Padina* sp.
- 3.2 *Turbinaria* sp.
- 3.3 *Dictyota* sp.
- 3.4 *Sargassum* sp.

4 สาหร่ายสีแดง

- 4.1 *Acanthophora* sp.
- 4.2 *Gracilaria fisheri*
- 4.3 *Solieria* sp.

อุปกรณ์

เครื่องกรองลดความดัน

เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง

ตู้ปลอดเชื้อ (Microminar flow, ABS 1200 A, UK)

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

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

อ่างทำความร้อน (Water bath) WNE, Germany)

เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

เครื่องผสมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกวนสาร

ตะแกรงร่อน

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

ไมโครปิเปต (micro pipette) (socorex, Switzerland)

เครื่องวัดพีเอช (pH meter) Ecoscan, Netherlands)

โถดูดความชื้น

เครื่องเขย่า

กระบอกตวง

เพลท

ขวดน้ำเกลือ

สายออกซิเจน

ทิป (tip)

หลอดทดลอง

เครื่องแก้วต่างๆ

ภาชนะพลาสติก (polypropylene) ต่างๆ

ผ้ากรองเพลงกัตอน

กระดาษกรอง

ช้อนตักสาร

Rack

วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลองเก็บข้อมูล

1. การเตรียมสาหร่าย

เก็บสาหร่ายทะเลขนาดใหญ่จากธรรมชาติและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ *Caulerpa lentillifera*, *Caulerpa sertularioides* และ *Acanthophora* sp. จากบรณจฟาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา เดือนพฤษภาคม *Rhizoclonium* sp., *Chaetomorpha* sp., *Ulva rigida* และ *Ulva intestinalis* จากสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดตราด เดือนพฤษภาคม *Sargassum* sp., *Dictyota* sp. และ *Turbinaria* sp. เก็บมาจากชายหาดจังหวัดชลบุรีเดือนมีนาคม *Padina* sp. เก็บจากชายหาดจังหวัดตราดเดือนมีนาคม และ *Gracilaria fisheri* และ *Solieria* sp. เก็บมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล จังหวัดสมุทรสงครามเดือนเมษายน โดยครอบคลุมในกลุ่มของสาหร่ายคือ สาหร่ายสีแดง (*Acanthophora* sp., *G. fisheri* และ *Solieria* sp.) สาหร่ายสีน้ำตาล (*Padina* sp., *Turbinaria* sp., *Dictyota* sp. และ *Sargassum* sp.) สาหร่ายสีเขียว (*C. lentillifera*, *C. sertularioides*, *Rhizoclonium* sp., *U. rigida*, *U. intestinalis* และ *Chaetomorpha* sp.) นำสาหร่ายมาล้างทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยาดเห็นแจ้งขออนุญาตในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะอาดจัดเศษสาหร่ายขนาดเล็กหรือเศษหอย เปรียง จัดสิ่งปนเปื้อนเช่น โปรโตซัว เศษดิน หินทราย จากนั้นนำไปผึ่งแดดจนแห้งและบดให้ละเอียด ร้อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 0.5 และ 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ขนาดสาหร่ายที่อยู่ในช่วง 0.5-1 เก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำและนำไปใช้ทดสอบการดูดซับสีข้อม

เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย (*Arthrospira platensis* และ *Phormidium angustissimum*) โดยเลี้ยง *A. platensis* ในอาหารสูตร Zartouk' s และ *P. angustissimum* ในอาหารสูตร BG-11 ภายใต้อสงสีขาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง 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 ก่อนทำการทดลองนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและใส่โถดูดความชื้นเพื่อไล่ความชื้น โดยสาหร่ายที่ใช้เป็นสายพันธุ์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการและนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ปริมาณมากเพื่อนำมาทดสอบการดูดซับสีข้อม โดยสาหร่ายส่วนใหญ่ที่เลือกมาศึกษาเป็นสาหร่ายที่เกาะกันเป็นกลุ่มมีขนาดใหญ่หรือเส้นสาขยาว ซึ่งจะป้องกันการดูดตันของระบบบำบัดน้ำเสียได้ หากเก็บสาหร่ายขนาดเล็กจากธรรมชาติมาใช้โดยตรง อาจมีการปนเปื้อนสิ่งต่างๆ เพราะขนาดของสาหร่ายจะทำให้แยกออกจากกันได้ยาก จะทำให้ไม่ทราบประสิทธิภาพที่แท้จริงของสาหร่ายชนิดนั้นๆ ในการดูดซับสีข้อม

สีข้อมที่ใช้ในการทดลอง

สีแดง (acid dye) OT 60304 A Benewol Red RS[®] นิยมใช้ข้อมเส้นใยโปรตีน (Protein) ใช้ในอุตสาหกรรมข้อมผ้าไหม หม่อนและขนสัตว์

สีเขียว (basic dye) OT 70701 A Malachite Green Crystal[®] ใช้ในอุตสาหกรรมข้อมเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic) เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอนและอะคริลิก (ข้อมผ้าใยสังเคราะห์ เชือกไนลอน)

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

การหาความยาวคลื่นในการวัดค่าดูดกลืนแสงที่เหมาะสมของสีข้อมแต่ละประเภท โดยนำสีข้อมแต่ละประเภทมาข้มและละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยโวลูมเมตริกฟลักซ์ขนาด 100 มิลลิลิตรและทำการผันแปรความเข้มข้นหลายระดับที่สามารถนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer แล้วไม่ให้เกินค่ามาตรฐาน (ไม่เกิน 1) โดยสารสีแต่ละชนิดจะสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร โดยเครื่องจะทำการสแกนความยาวความคลื่นที่เหมาะสม โดยดูจาก peak ที่สูงสุด (ภาคผนวก ข) หลังจากนั้นนำสีข้อมแต่ละประเภทมาข้มและละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยโวลูมเมตริกฟลักซ์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการผันแปรความเข้มข้นหลายระดับเพื่อหาความ

เข้มข้นที่เหมาะสมโดยเมื่อนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer แล้วให้มีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้ 1 ที่สุด ความเข้มข้นสี่ข้อมระดับนี้จะนำมาเป็นค่าความเข้มข้นมาตรฐานตัวสุดท้ายในกราฟมาตรฐาน และทำการเจือจางอีก 4 ระดับ เป็นกราฟมาตรฐานที่สมบูรณ์

2. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสี่ข้อมโดยสาหร่าย

2.1 การหาระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

นำสาหร่ายขนาดใหญ่ และขนาดเล็กที่เตรียม ไว้ใส่ในสารละลายสี่ข้อมที่มีระดับพีเอชแตกต่างกัน คือ พีเอชเริ่มต้นที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 โดยปรับระดับพีเอชของสารละลายสี่ข้อม โดยใช้ HNO_3 0.1 โมลต่อลิตร และ NaOH 0.1 โมลต่อลิตร แล้วใส่สาหร่ายที่เตรียมไว้ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลายสี่ข้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสี่ข้อมสูงสุดที่สามารถวัดได้โดยเครื่อง spectrophotometer ของแต่ละสี โดยสี่ข้อมแอซิดเบเนวอลเรดและรีแอคทีฟเบเนฟิคเรดที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร สี่ข้อมเบสิคมาลาไคท์กรีนวัดที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยทดลองระดับพีเอชละ 3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับจุดควบคุม (คือสี่ข้อมไม่ใส่สาหร่าย) เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองสาหร่ายออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมครอน และวัดปริมาณสี่ข้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี

คั่งสมการ

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

สมการที่ 1

โดย V คือ ปริมาตรของสารละลายสี่ข้อม (มิลลิลิตร)

C_0 คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของสี่ข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{eq} คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสี่ข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

M คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย (กรัม)

2.2 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสี่ข้อม

เตรียมสารละลายสี่ข้อมที่พีเอชเหมาะสม และใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ต่อสารละลายสี่ข้อมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสี่ข้อมเบเนวอลเรด อาร์เอส 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสี่ข้อม เบเนฟิคเรด 5 บี และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสี่ข้อมมาลาไคท์กรีน คริสตัล เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และวัดปริมาณสี่ข้อมที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่างๆ กันคือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 360 นาที, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ชั่วโมง และหาจุดสมดุล

ในการดูดซับโดยการสร้างกราฟระหว่างระยะเวลากับการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ โดยการหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich

3 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้สาหร่ายในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคัดเลือกสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูงในแต่ละชนิดสีจากขั้นต้น 3 ชนิด ได้แก่ *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ในการดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรด *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ในการดูดซับสีข้อมมาลาโคทกรีน และ *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ในการดูดซับสีข้อมเบเนฟิคเรด

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 และวัดปริมาณสีข้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

3.2 ความเข้มข้นของสีข้อมตั้งต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีข้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายขนาด 0.25-0.49 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร โดยผันแปรความเข้มข้นของสีข้อม 10, 20, 40, 80, 100, 150, 200, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนเข้าสู่จุดสมดุล และวัดปริมาณสีข้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี และคำนวณตามสมการที่ 10

3.3 อุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีข้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายขนาด 0.25-0.49 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสีข้อมตามข้อ 7.2.1 ในหลอดทดลองขนาด 12 มิลลิลิตร โดยผันแปรอุณหภูมิที่ 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส บนอ่างทำความร้อน (water bath) จนเข้าสู่จุดสมดุล และวัดปริมาณสีข้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี นำไปคำนวณตามสมการที่ 10 เพื่อหาความสมารถในการดูดซับ และคำนวณตามสมการเพื่อหาพลังงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีเขียวที่พิเศษเหมาะสมใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรน้ำ 10 มิลลิเมตร ที่ความเข้มข้นของสีเขียวตามข้อ 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 วัดปริมาณสีเขียวที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี

4 การศึกษาจลพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลพลศาสตร์โดยใส่สาหร่ายในสารละลายสีเขียวที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80, 160, 240, 320 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีเขียวเบนเนฟิเคอเรด อาร์เอส และเบนเนฟิเคอเรด 5 บี และที่ความเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีเขียวมาลาโคทิกกรีน 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) โดยสร้างกราฟระหว่างเวลาที่สองของเวลา (นาที) กับค่าการดูดซับ เพื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาค และสร้างกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับสารละลายที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ คอสารละลายสีเขียวเริ่มต้น เพื่อหาอัตราเร็วของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

5 การทดลองบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

นำน้ำประปาละลายสีเขียวเบนเนฟิเคอเรด อาร์เอส ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สีเขียว เบนเนฟิเคอเรด 5 บี ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีเขียวมาลาโคทิกกรีน คริสตัล ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่ปรับพีเอช นำน้ำเสียส่วนบนเหนือตะกอน มาบำบัดโดยใส่สาหร่ายปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตรสารละลาย 200 มิลลิตร วัดปริมาณสีเขียวที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่างๆ กันคือ 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และวัดปริมาณสีเขียวที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ตามความยาวคลื่นของแต่ละสี

6 การวัดปริมาณสีเขียวและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปริมาณสีเขียว 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานที่ทำการทดลอง สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
และ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ม. สงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112
และ โรงงานผลิตกล่องกระดาษ สงขลา .จ (สยามบรรจุกัมพ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1 การคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีข้อม

การคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีข้อม โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) โดยทำนายจากค่าไอโซเทอร์มการดูดซับซึ่งการศึกษาค่าการดูดซับสูงสุดต้องศึกษาที่จุดสมดุลย์และระดับพีเอชเหมาะสม จึงทำการศึกษาพีเอชและเวลาที่เข้าสู่สมดุลย์เพื่อนำไปศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับต่อไป

1.1 ระดับพีเอชของสารละลาย

ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด มาลาไลท์กรีน และเบนเนฟิครีด 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.

1.1.1 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด

ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย 13 สกุลพบว่าสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรดได้สูงที่สุดในสารละลายที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 3 (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1) โดย *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 33.68 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ *C. lentillifera* ซึ่งมีค่าการดูดซับสีข้อมเท่ากับ 33.41 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) โดย *Solieria* sp. มีค่าการดูดซับต่ำสุด

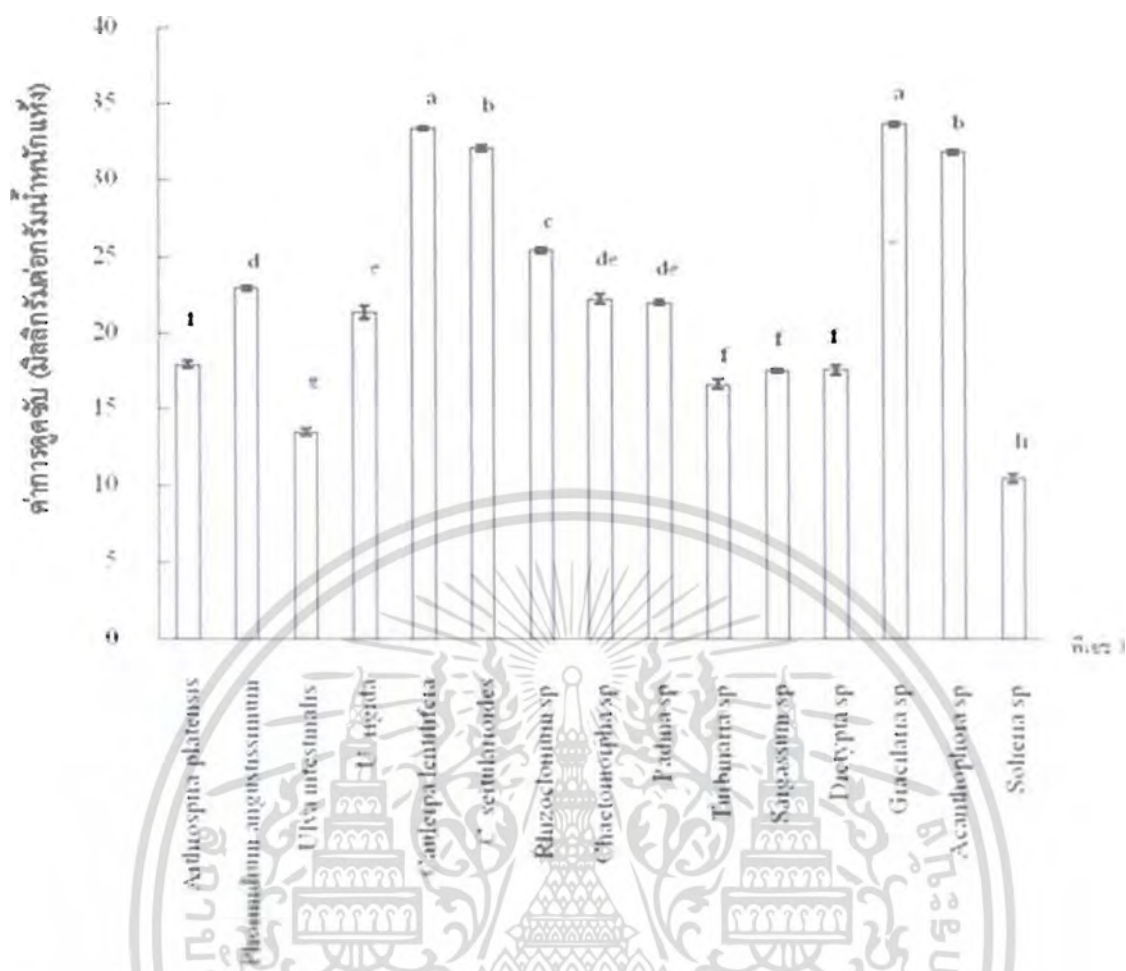
พีเอชไม่เพียงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพแต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสีข้อม โดยที่สีแอสิดเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนลบของตัวสีแก่น้ำ หมู่ฟังก์ชันของสีข้อมที่แสดงประจุลบ (Anionic group) เช่น หมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) หมู่คาร์บอกซิลเลต (CO_3^-) ฯลฯ ซึ่งมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด (pK_a) เท่ากับ 1.3 และ 1.7-4.7 ตามลำดับ โดยที่หมู่ซัลโฟเนตนั้นจะให้ความเป็นกรดที่แก่กว่าหมู่คาร์บอกซิลเลต ดังนั้นค่าพีเอชในสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดซับ โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลมากกว่าพีเอชสุดท้าย (Ozer *et al.* 2005b) ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารละลายสีข้อมประจุลบ และพบว่าเมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวกของโปรตอน (H^+) และ hydronium ions (H_3O^+) ที่บริเวณผิวเซลล์ของสาหร่ายและเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีข้อมแอสิดได้มาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้สาหร่ายเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำ (Ozer *et al.* 2006a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 การดูดซับสีของเบบเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีของเริ่มต้น 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 ^{sd}	20.34±0.45 ^{bc}	16.14±0.38 ^{cc}	12.59±1.15 ^{dd}	11.15±0.29 ^{dc}	9.038±0.51 ^{cd}
<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 ^{cg}	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 ^{bcD}	16.94±0.69 ^{cdC}	14.90±0.19 ^{deC}	13.51±0.10 ^{cb}	10.45±0.15 ^{rc}
<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 ^{cb}	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 ^{ca}	8.81±0.32 ^{id}
<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 ^{od}	7.66±0.12 ^{ee}
<i>Padina sp.</i>	14.65±0.18 ^{ch}	21.99±0.15 ^{abE}	18.18±0.21 ^{bDE}	12.92±0.24 ^{bd}	7.83±0.38 ^{el}	7.92±0.06 ^{ed}	7.38±0.21 ^{ef}
<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 ^{ll}	7.86±0.21 ^{ce}
<i>Sargassum sp.</i>	14.11±0.21 ^{hhi}	17.51±0.12 ^{af}	11.77±0.62 ^{ei}	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 ^{fi}	7.38±0.15 ^{fi}
<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 ^{gf}
<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 ^{bc}
<i>Solieria sp.</i>	6.34±0.09 ^{cl}	10.45±0.26 ^{ai}	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}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 1 การดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชเหมาะสม (พีเอช 3) (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันเนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน (functional group) บริเวณพื้นผิวของสาหร่ายแต่ละชนิดต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชันเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและการจับกันระหว่างประจุของพื้นผิวสาหร่ายกับประจุของสีย้อม สาหร่ายมีโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว หมู่ฟังก์ชันมักเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของโมเลกุลที่มีพวกมันเป็นส่วนประกอบ สารชีวโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชันหลายอย่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้นมีกลุ่มของกรดที่ทำหน้าที่ดูดซับเป็นหลัก 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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่คาร์บอกซิลที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลักในการดูดซับพบได้มากในสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นเพราะมี alginate 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 ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ปลายสายของกรดอะมิโน และยังมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่กรดอะมิโนต่างๆ เช่น asparagines, lysine, cysteine หรือ aspartic acid และมีส่วน lipopolysaccharide และ lipoprotein อยู่ที่ด้านนอกของผนังเซลล์ (outer membrane) ซึ่งจะมีกลุ่ม phosphonate ทำหน้าที่สร้างประจุลบที่ผิววนอกทำให้เกิดการจับกับประจุบวกได้ (Schiewer and Volesky, 2000)

ปริมาณการดูดซับในการศึกษานี้ที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 3 อยู่ในช่วงที่มีการดูดซับสูงสุด 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 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีน

ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีน โดยสาหร่าย (ตารางที่ 2 และภาพที่ 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 ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่าค่าปริมาณการดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีน โดยสาหร่ายทุกชนิดสูงสุดที่พีเอชเริ่มต้นในช่วง 5-7 (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากสีข้อมมาลาโคท์กรีนซึ่งเป็นสีข้อมเบสิกเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกของสีแก่น้ำ หมูฟังก์ชันของสีข้อมที่แสดงประจุบวก (cationic group) เช่น แอมโมเนียมไอออน (NR_4^+) และ ไนโตรเนียมไอออน (NO_2^+) ซึ่งแตกตัวให้ประจุค่อนข้างกลางถึงค่าในสารละลาย (Marungrueng and Pavasant, 2007) โดยทั่วไปพบว่าที่พีเอช 3 ความเป็นประจุที่ผิวหน้าสาหร่ายกับสีข้อมชนิดเบสิกที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นกลุ่มของอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบของสีจะมีค่าเป็นศูนย์ (zero point charge) (Kumar *et al.* 2006; Daneshvar *et al.* 2007) ที่ระดับพีเอชที่สูงกว่าระดับประจุที่เป็นศูนย์นี้ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของสาหร่ายเริ่มปรากฏของประจุลบ ซึ่งความเป็นประจุบวกของสีข้อมมาลาโคท์กรีนจึงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงกันข้ามระหว่างประจุบวกของสีข้อมและประจุลบของผิวเซลล์สาหร่าย และที่ระดับพีเอชต่ำกว่าระดับประจุที่เป็นศูนย์นี้จะทำให้ผิวเซลล์สาหร่ายเพิ่มปริมาณประจุบวกของโปรตอน (H^+) ซึ่งเป็นประจุชนิดเดียวกันกับประจุของสีข้อมมาลาโคท์กรีนจึงเกิดการผลักกันทำให้การดูดซับสีข้อมลดลง (Kumar *et al.* 2006; Daneshvar *et al.* 2007; Tsai and Chen, 2010)

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่ากลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ รองลงมาคือกลุ่มสาหร่ายสีเขียว กลุ่มสาหร่ายสีแดงและกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลมีหมูฟังก์ชันที่แตกตัวให้ประจุลบได้มากกว่ากว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ที่พีเอชสูงกว่า 3 และสามารถจับกับโมเลกุลของสีเบสิกมาลาโคท์กรีนที่แตกตัวให้ประจุบวกได้ดีที่พีเอชสูงกว่า 3 เช่นกัน

ในการศึกษาอื่นๆ บางครั้งพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีนมีค่าค่อนข้างสูง (พีเอช 8-10) เช่น การดูดซับสีเบสิกมาลาโคท์กรีนโดยสาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* sp. ที่พีเอชของสารละลายสีข้อมแตกต่างกันคือ 2-11 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 9 ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 2.05 มิลลิกรัมต่อ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Daneshvar *et al.* 2007) ในสาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* ดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีนที่พีเอชของสารละลายสีข้อมแตกต่างกันคือ

2-10 พบว่าดูดซับสีข้อมได้สูงที่สุดที่พีเอช 8 ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 42 มิลลิกรัมต่อกรัม (Kannan เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไวสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปไซประโยชนดานการคำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

et al. 2010) อย่างไรก็ตามในหลายการศึกษาแม้ว่าพีเอชค่อนข้างสูง (8-10) แต่พบว่าส่วนใหญ่ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกันตั้งแต่พีเอช 6 เป็นต้นไป เช่น การดูดซับสีเบสิกเมทิลีนบลูโดยสาหร่ายสีเขียว *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 ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับสีข้อมเบสิกมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายน้ำจืด *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) และการศึกษาครั้งนี้ใกล้เคียงกับการดูดซับสีข้อมเบสิกมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายสีเขียว *Cladophora* sp. ที่พีเอชแตกต่างกัน 1.5-8.5 พบว่าที่พีเอช 7.5 มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัม (Khataee *et al.* 2010)

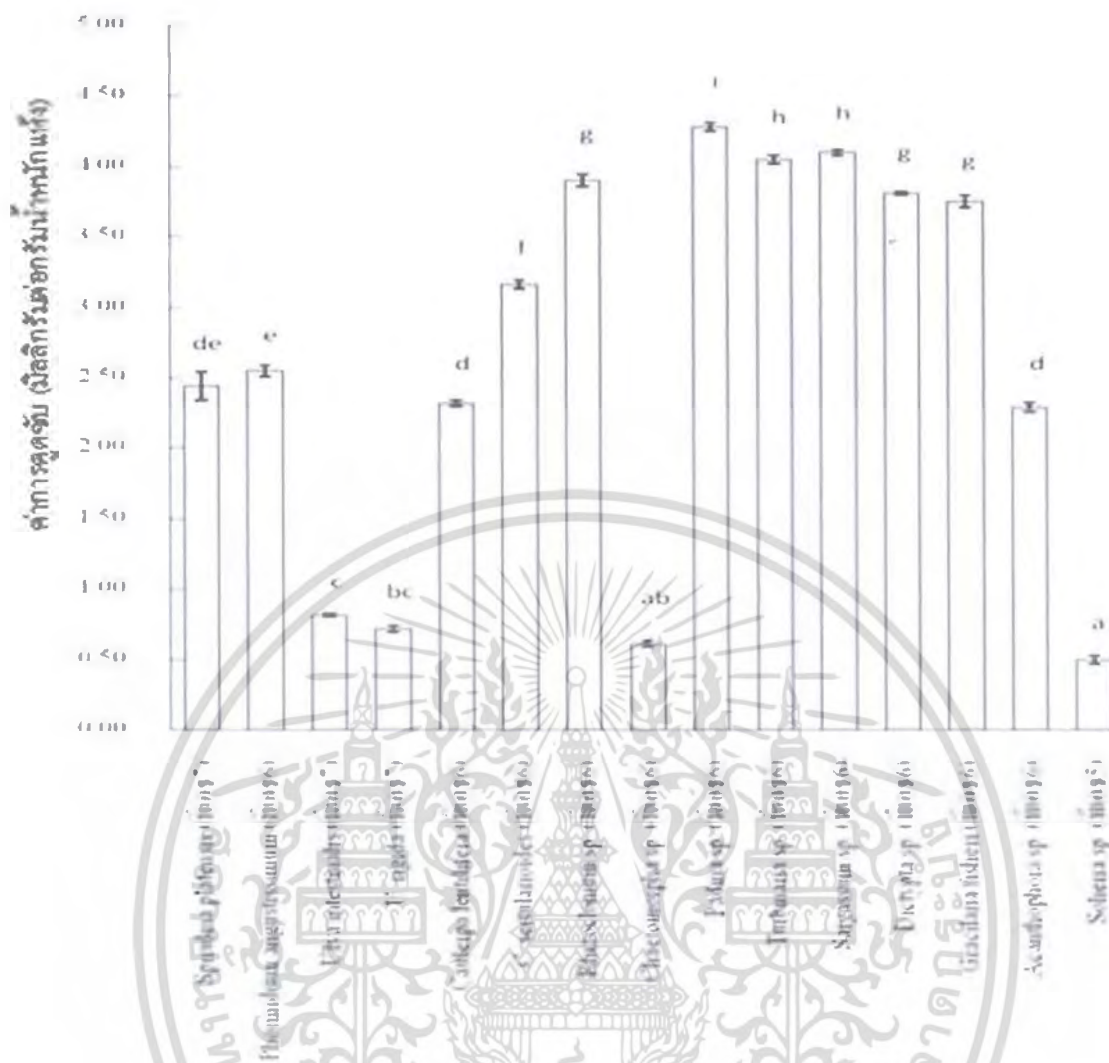


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 การดูดซับสีของมาลาไลก์กรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Algae	pH							
	2	3	4	5	6	7	8	
<i>Arthrospira platensis</i>	0.56±0.01 ^{dA}	0.83±0.04 ^{cA}	1.40±0.16 ^{cB}	1.48±0.01 ^{cB}	2.00±0.14 ^{dC}	2.44±0.10 ^{dD}	2.41±0.16 ^{dD}	
<i>Phormidium angustissimum</i>	0.41±0.05 ^{cA}	0.90±0.02 ^{cB}	1.07±0.03 ^{dC}	1.39±0.03 ^{dD}	2.55±0.04 ^{fF}	2.21±0.01 ^{cE}	0.23±0.02 ^{dE}	
<i>Ulva intestinalis</i>	0.16±0.04 ^{ubA}	0.51±0.06 ^{hA}	0.73±0.02 ^{cB}	0.75±0.02 ^{cB}	0.78±0.01 ^{cE}	0.82±0.01 ^{bc}	0.75±0.03 ^{bc}	
<i>Ulva rigida</i>	0.1±0.02 ^{aA}	0.34±0.02 ^{ah}	0.47±0.01 ^{abC}	0.47±0.01 ^{aC}	0.72±0.07 ^{bcD}	0.72±0.02 ^{bc}	0.71±0.01 ^{bc}	
<i>Caulerpa lentillifera</i>	0.43±0.03 ^{cA}	0.92±0.01 ^{cB}	2.14±0.02 ^{fE}	2.13±0.01 ^{gC}	2.32±0.02 ^{eE}	2.23±0.00 ^{cD}	2.18±0.03 ^{cdCD}	
<i>Caulerpa sertularioides</i>	1.68±0.04 ^{hA}	1.78±0.07 ^{cA}	2.54±0.03 ^{hB}	2.57±0.01 ^{hB}	3.17±0.03 ^{uD}	2.68±0.01 ^{cC}	2.76±0.02 ^{fC}	
<i>Rhizoclonium sp.</i>	1.54±0.02 ^{uA}	2.35±0.02 ^{uB}	2.66±0.05 ^{hC}	2.71±0.01 ^{hC}	3.90±0.04 ^{hE}	3.58±0.00 ^{hD}	3.53±0.05 ^{hD}	
<i>Chaetomorpha sp.</i>	0.10±0.01 ^{aA}	0.33±0.02 ^{ab}	0.54±0.02 ^{bc}	0.54±0.02 ^{bc}	0.61±0.02 ^{abD}	0.52±0.01 ^{aC}	0.54±0.02 ^{aC}	
<i>Padina sp.</i>	2.15±0.03 ^{IA}	2.30±0.04 ^{fgB}	2.60±0.02 ^{hC}	2.65±0.01 ^{iC}	4.28±0.03 ^{kF}	3.43±0.02 ^{ghD}	3.57±0.02 ^{hiE}	
<i>Turbinaria sp.</i>	2.43±0.05 ^{JA}	2.77±0.04 ^{hB}	3.01±0.02 ^{iC}	3.10±0.02 ^{hC}	4.05±0.03 ^{hE}	3.41±0.02 ^{fgD}	3.49±0.02 ^{hD}	
<i>Sargassum sp.</i>	1.35±0.06 ^{cA}	1.51±0.09 ^{dB}	2.90±0.02 ^{iC}	2.91±0.02 ^{kC}	4.10±0.02 ^{hE}	3.60±0.01 ^{iD}	3.63±0.01 ^{iD}	
<i>Dictyota sp.</i>	2.11±0.01 ^{IA}	2.22±0.01 ^{hB}	2.35±0.01 ^{gC}	3.07±0.03 ^{hD}	3.81±0.01 ^{hF}	3.48±0.02 ^{ghE}	3.48±0.01 ^{hE}	
<i>Gracilaria fisheri</i>	1.45±0.02 ^{fA}	1.67±0.02 ^{cB}	2.69±0.06 ^{hC}	2.71±0.01 ^{hC}	3.75±0.04 ^{hE}	3.32±0.01 ^{iD}	3.25±0.01 ^{hD}	
<i>Acanthophora sp.</i>	0.47±0.01 ^{cA}	0.82±0.02 ^{cB}	1.32±0.02 ^{eC}	1.74±0.01 ^{cd}	2.29±0.03 ^{cf}	2.10±0.01 ^{cE}	2.08±0.02 ^{cE}	
<i>Solieria sp.</i>	0.22±0.03 ^{bA}	0.32±0.05 ^{ubB}	0.39±0.01 ^{abC}	0.50±0.03 ^{abD}	0.49±0.02 ^{ad}	0.47±0.01 ^{uCD}	0.45±0.01 ^{uCD}	

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 2 การดูดซับสีเขียวมาลาโคทกรีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอชเหมาะสม (ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.1.3 ระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับสีเขียวบนเบเนฟิครอด

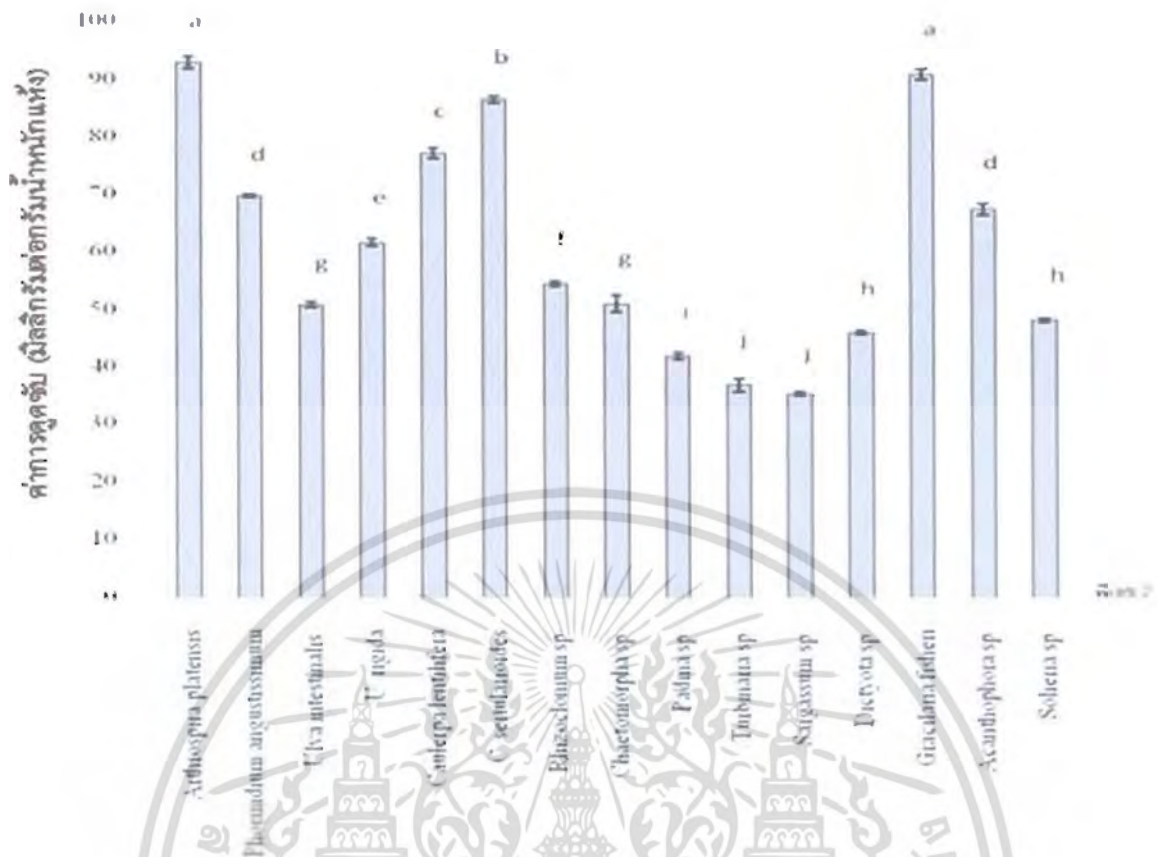
ระดับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับสีเขียวบนเบเนฟิครอด โดยสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีเขียวบนเบเนฟิครอดในสารละลายที่ระดับพีเอชเริ่มต้น 2 สูงสุด (ตารางที่ 3, ภาพที่ 3) โดย *A. platensis* มีค่าการดูดซับสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกับ *G. fisheri* โดยมีค่าการดูดซับสีเขียวเท่ากับ 93.06 ± 1.01 และ 90.96 ± 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 การดูดซับสีของเบนเฟนพิดเรด (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่ายที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน (ความเข้มข้นสีของเริ่มต้น 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 ^{ide}	19.22±0.38 ^{ca}	
<i>Phormidium angustissimum</i>	69.72±0.23 ^{ad}	48.29±0.63 ^{bde}	35.53±0.61 ^{ced}	27.01±0.80 ^{dgh}	16.02±0.65 ^{beifg}	16.02±0.65 ^{if}	16.14±0.82 ^{cd}	
<i>Ulva intestinalis</i>	50.92±0.49 ^{ag}	40.57±0.91 ^{bde}	27.76±0.41 ^{ceij}	17.87±0.63 ^{dgh}	17.05±0.36 ^{defg}	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 ^{decd}	19.27±0.27 ^{cbcd}	16.55±0.30 ^{mbc}	
<i>Caulerpa lentillifera</i>	77.29±0.85 ^{ac}	42.31±0.50 ^{bcd}	36.41±1.06 ^{ca}	28.70±0.83 ^{da}	25.51±0.16 ^{ca}	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 ^{ced}	23.73±0.54 ^{dabc}	19.37±0.26 ^{dcde}	23.30±0.17 ^{ea}	17.40±0.39 ^{fb}	
<i>Rhizoclonium sp.</i>	54.66±0.46 ^{af}	38.83±0.22 ^{be}	37.45±0.30 ^{ba}	22.65±0.64 ^{cdde}	22.46±0.44 ^{cb}	20.67±0.17 ^{db}	17.21±0.92 ^{gbc}	
<i>Chaetomorpha sp.</i>	51.12±1.46 ^{ag}	35.01±0.44 ^{bf}	27.20±0.50 ^{ced}	19.78±0.52 ^{defg}	20.21±0.10 ^{dcd}	16.77±0.60 ^{ide}	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 ^{dcdfe}	15.96±0.44 ^{efe}	12.93±0.17 ^{id}	
<i>Turbinaria sp.</i>	36.87±1.13 ^{aj}	27.99±0.23 ^{bg}	19.56±0.41 ^{cf}	14.37±0.95 ^{ij}	15.22±0.72 ^{jgh}	15.40±0.30 ^{ddefg}	16.58±0.76 ^{dabc}	
<i>Sargassum sp.</i>	35.31±0.34 ^{aj}	19.51±0.57 ^{bl}	18.77±0.35 ^{bf}	15.83±0.39 ^{chi}	14.35±0.46 ^{cl}	14.21±0.22 ^{cfdgh}	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 ^{dief}	18.85±0.27 ^{cddef}	18.11±0.65 ^{acd}	18.31±0.25 ^{cab}	
<i>Gracilaria fisheri</i>	90.96±0.95 ^{aa}	19.77±0.31 ^{bl}	18.77±0.16 ^{cf}	15.55±0.66 ^{dij}	16.78±0.21 ^{difg}	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 ^{dabc}	20.24±0.11 ^{db}	15.45±0.54 ^{ec}	
<i>Solieria sp.</i>	48.25±0.30 ^{ah}	23.47±0.53 ^{bfi}	23.05±0.36 ^{be}	16.82±0.66 ^{difi}	17.99±0.15 ^{cddef}	16.55±0.30 ^{dde}	12.55±0.36 ^{fd}	

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแนวอนและพิมพ์ใหญ่แนวตั้งเดียวกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 3 การดูดซับสีเขียวของแบคทีเรีย (มีลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยสาหร่าย ที่ระดับพีเอชเหมาะสม (พีเอช 2) (ความเข้มข้นสีเขียวเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่าค่าปริมาณการดูดซับสีเขียวของแบคทีเรีย โดยสาหร่ายทุกชนิดสูงสุดที่พีเอชเริ่มต้น 2 (ภาพที่ 3) โดยสีเขียวของแบคทีเรียเป็นประเภทสีเขียวที่เป็นสีที่ละลายน้ำได้ประจุลบ (anionic group) สำหรับการศึกษาครั้งนี้ค่านี้ถึงประจุเมื่อแตกตัวในการละลายซึ่งสัมพันธ์กับประจุผิวหน้าของตัวดูดซับ ดังนั้นสีเขียวของแบคทีเรียคล้ายคลึงกับสีเขียวประเภทแอซิด ดังนั้นเมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวกของโปรตอน (H^+) หรือกลุ่มประจุบวกอื่นๆ ที่บริเวณผิวเซลล์ของสาหร่ายและจับกับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีเขียวแบคทีเรียได้ดี ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้สาหร่ายเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำเช่นเดียวกับสีเขียวประเภทแอซิด ซึ่งสีเขียวประจุลบในสภาวะที่เป็นค่าความสามารถในการดูดซับของสาหร่ายจึงลดลง เนื่องจากที่สภาวะเป็นค่าประจุบวกที่ผิวหน้าของสาหร่ายมีปริมาณลดลง ประจุลบของสีเขียวจึงไม่สามารถจับกับผิวหน้าของสาหร่ายได้ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Mahmoud, 2008) การศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับจากการทดลองการสาหร่ายสีเขียว

Spirögyra sp. นำมาดูดซับสีเขียวแบคทีเรียในสภาวะที่พีเอชเหมาะสมแตกต่างกัน 1-4 พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

นอกจากนี้ความสามารถในการกำจัดสี้อมนั้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับ อย่างไรก็ตามก็พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันจะมีความสามารถและมีสภาพที่เหมาะสมในการกำจัดสี้อมที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพบว่าการศึกษาค้นคว้ากลุ่มสาหร่ายสีแดงสามารถดูดซับสี้อมเอซิดและรีแอกทีฟได้ดี ยกเว้นสาหร่ายบางชนิด (*Solieria* sp.) ที่มีค่าการดูดซับต่ำ และกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลสามารถดูดซับสี้อมเบสิกได้ดี

1.2 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายสี้อม

ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและสารละลายที่มีระดับพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสี้อม พบว่าไซยาโนแบคทีเรีย *A. platensis* ดูดซับสี้อมเบนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบนฟิคเรด (ตารางที่ 4) ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15, 15 และ 30 นาทีแรก เริ่มช้าลงหลังจากผ่านไป 30, 30 นาที และ 1 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 2 โดยสามารถดูดซับสี้อมได้ 22.00 ± 0.44 , 2.73 ± 0.08 และ 90.27 ± 0.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาหร่ายสีเขียว *U. intestinalis* ดูดซับสี้อมเบนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบนฟิคเรด เข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสี้อมได้ 16.31 ± 0.17 , 1.09 ± 0.05 และ 44.45 ± 0.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีเขียว *U. rigida* ดูดซับสี้อมเบนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบนฟิคเรด เข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสี้อมได้ 21.60 ± 0.06 , 0.83 ± 0.01 และ 53.42 ± 0.38 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีเขียว *C. lentillifera* ดูดซับสี้อมเบนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบนฟิคเรด เข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถดูดซับสี้อมได้ 34.23 ± 0.87 , 2.56 ± 0.03 และ 71.34 ± 1.20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีเขียว *C. sertularioides* ดูดซับสี้อมเบนวอลเรด, มาลาไลท์กรีน และเบนฟิคเรด เข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 6 โดยสามารถดูดซับสี้อมได้ 36.37 ± 0.09 ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดเป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.16±0.02 และ 81.10±0.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีเขียว *Rhizoclonium* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 29.15±0.69, 3.93±0.03 และ 42.56±1.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีเขียว *Chaetomorpha* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 23.63±0.25, 0.70±0.02 และ 43.22±0.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 2 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 25.19±0.36, 4.24±0.03 และ 38.08±1.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 17.25±0.13, 4.15±0.03 และ 30.11±1.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีน้ำตาล *Sargassum* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 3 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 21.71±0.24, 4.07±0.03 และ 29.53±1.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีน้ำตาล *Dictyota* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 3 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 21.51±0.18, 3.86±0.07 และ 39.51±0.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาหร่ายสีแดง *G. fisheri* คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 2 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 40.31±0.42, 3.85±0.07 และ 90.49±0.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สาหร่ายสีแดง *Acanthophora* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6, 6 และ 6 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 67.02±1.03, 2.52±0.11 และ 31.52±0.44 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสาหร่ายสีแดง *Solieria* sp. คูคซบีสีย้อมเบนเนวอลเรด, มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิเคเรด เข้าสู่จุดสมมูลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12, 6 และ 6 โดยสามารถคูคซบีสีย้อมได้ 15.35±0.24, 0.71±0.09 และ 44.06±0.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ความสามารถในการดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรดที่จุดสมดุลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมดุล (ชั่วโมง)	ค่าการดูดซับ (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ
<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 ^h	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 ^h
<i>Rhizoclonium</i> sp.	12	29.15±0.69 ^c	60.44±1.25 ^c
<i>Chaetomorpha</i> sp.	6	23.63±0.25 ^e	49.33±1.06 ^e
<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

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ความสามารถในการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนที่จุดสมมูลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมมูล (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 ^e	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 ^e	57.58±0.77 ^c
<i>Caulerpa sertularioides</i>	6	3.16±0.02 ^c	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 ^e
<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 ^e	56.70±1.91 ^d
<i>Soliera</i> sp.	6	0.71±0.09 ⁱ	15.88±1.78 ⁱ

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะของผิวสาหร่ายแต่ละชนิดและสีข้อมแต่ละประเภท จากการทดลองนี้พบว่าการดูดซับสู่จุดสมมูลส่วนใหญ่สาหร่ายที่ดูดซับสีข้อมเบนเฟิเกรดเข้าสู่จุดสมมูลได้รวดเร็วกว่ามาลาไคท์กรีน และเบนเวอลเรด ตามลำดับ ส่วนปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดสาหร่ายและประเภทสีข้อม

ตารางที่ 6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีดที่จุดสมดุลโดยสาหร่ายชนิดต่างๆ

สาหร่าย	เวลาที่จุดสมดุล (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 ^b	48.23±0.61 ^b
<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 ^e	45.68±1.30 ^c
<i>Chaetomorpha</i> sp.	3	43.22±0.78 ^b	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 ^b	47.20±0.87 ^h

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาสภาวะสมดุลในการดูดซับข้างต้น พบว่าการดูดซับสีเบนเนฟิครีดโดยสาหร่ายสีเขียวเข้าสู่จุดสมดุลช้ากว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ในขณะที่กลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย สาหร่ายสีแดง และสาหร่ายสีน้ำตาล มีจุดสมดุลที่เร็วกว่า ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคทิกรีน พบว่าสาหร่ายทุกกลุ่มมีจุดสมดุลที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลบางชนิดมีจุดสมดุลค่อนข้างรวดเร็วกว่า

ในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครีด พบว่าสาหร่ายทุกกลุ่มมีจุดสมดุลที่ใกล้เคียงกัน โดยปกติแล้วสาหร่ายที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพมีลักษณะเซลล์ ประเภทเซลล์ที่แตกต่างกัน มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนที่แตกต่างกันหลักๆ ตามกลุ่มของสาหร่ายจึงทำให้ตำแหน่งยึดจับหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประเภทแตกต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้น แม้ตำแหน่งยึดจับจะเป็นหมู่ฟังก์ชันประเภทเดียวกันก็ยังสามารถมีกลไกการจับที่แตกต่างกัน และยังขึ้นอยู่กับโมเลกุลของสีย้อมในการยึดจับ

กับหมู่ฟังก์ชันของผิวหน้าสาหร่ายในการจับกันอย่างรวดเร็วหรือช้ามากน้อยเพียงใดด้วย ซึ่งในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จับกันนี้ต้องอาศัยแรงและปฏิกิริยาทางเคมีหลายอย่างประกอบกัน ดังนั้นสี่ข้อที่แตกต่างกันย่อมมีโครงสร้างของโมเลกุลที่จำเพาะแตกต่างกันด้วย ประกอบกับการจับหมู่ฟังก์ชันของสารாயที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้เวลาที่จุดสมมูลในการดูดซับต่างกันด้วย ในการศึกษาครั้งนี้เวลาที่จุดสมมูลในการดูดซับมีความแตกต่างกันตามชนิดของกลุ่มสารாயแล้วและยังแตกต่างที่ประเภทของสีด้วย ดังนั้นในหลายๆ การศึกษาจึงต้องหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมของตัวดูดซับกับสีนั้นๆ เสมอก่อนทำการทดลองปัจจัยอื่นๆ

ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมมูลของตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีข้อมต่างๆ แสดงในตารางที่ 7 และผลของระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมมูลนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_t) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ตัวอย่างเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลของตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีย้อม

สีย้อม	ตัวดูดซับ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาที่จุดสมดุล	เอกสารอ้างอิง
สีย้อมแอนติค				
แอนติคเยลโล 59 (acid yellow 59)	พีชน้ำ <i>Pasidonia ocaenica</i>	100	24 ชั่วโมง	Guczguez <i>et al.</i> (2009)
แอนติคออเรนจ์ 7 (acid orange 7)	พีชน้ำ <i>Azolla rongpong</i>	100	9 ชั่วโมง	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
แอนติคเรด 88 (acid red 88)	พีชน้ำ <i>Azolla rongpong</i>	100	9 ชั่วโมง	Padmesh <i>et al.</i> (2006)
แอนติคบลู 290 (acid blue 290)	สาหร่ายสีเขียว <i>Spirogira rhizopus</i>	100	60 นาที	Ozer <i>et al.</i> (2006b)
สีย้อมเมติก				
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>	100	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	Celckli <i>et al.</i> (2009)

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีเขียวมัลลาไคท์กรีน

สาหร่าย	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir			ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich		
	Q_{max} (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนัก แห้ง)	K_L (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	r^2	K_F (มิลลิกรัมต่อ กรัม)	n	r^2
<i>A. platensis</i>	152.95±1.96 ^{ci}	0.0218±0.0002	0.987	5.04±0.07	1.528±0.007	0.983
<i>P. angustissimum</i>	154.37±1.99 ^{ci}	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. lentilifera</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 ^{dp}	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 ^{ai}	0.0316±0.0013	0.986	7.80±0.03	1.617±0.005	0.971
<i>Dictyota</i> sp.	154.78±2.25 ^{ci}	0.0211±0.0004	0.968	5.04±0.06	1.542±0.003	0.977
<i>G. fisheri</i>	143.96±2.41 ^{is}	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

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกับคอมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.3.3 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีเขียวมัลลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย

การดูดซับสีเขียวมัลลาไคท์กรีนของ *G. fisheri* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ที่คำนวณได้เท่ากับ 293.19±8.76 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครด

สาหร่าย	ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir			ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich		
	Q_{max} (มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนัก แห้ง)	K_L (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	r^2	K_F (มิลลิกรัมต่อ กรัม)	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 ^c	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 ^d	0.0258±0.0011	0.995	16.10±0.31	1.820±0.011	0.963
<i>Rhizoclonium</i> sp.	165.37±3.85 ^c	0.0203±0.0007	0.974	5.28±0.05	1.559±0.006	0.978
<i>Chaetomorpha</i> sp.	171.08±2.03 ^c	0.0160±0.0003	0.985	4.07±0.09	1.441±0.012	0.975
<i>Padina</i> sp.	101.80±4.42 ^b	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 ^d	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 ⁱ	0.0129±0.0006	0.985	1.91±0.01	1.268±0.004	0.981

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การศึกษาการดูดซับสีข้อมโดยสาหร่ายนั้น ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้คือไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยในแต่ละการทดลองจะนำสมการทั้งสองแบบมาใช้กับข้อมูลจากการทดลอง จากนั้นจึงเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อธิบายการดูดซับสีข้อม ซึ่งความสำคัญของการเลือกใช้ไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีข้อมโดยใช้สาหร่ายคือ ทำให้สามารถอธิบายกลไกของสาหร่ายในระบบการบำบัดสีข้อมได้ถูกต้อง การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครด มาลาไคท์กรีนและเบเนฟิครดในครั้งนี้ส่วนใหญ่สาหร่ายมีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Freundlich ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าการดูดซับสีข้อมโดยสาหร่ายที่มีความสัมพันธ์ตามทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir ซึ่งกล่าวไว้ว่าการดูดซับสีข้อมจะเกิดที่ผิวเซลล์เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และเกิดการดูดซับบนตำแหน่งดูดซับซึ่งมีความเหมือนกัน (homogenous binding site) และการดูดซับสีข้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสาหร่ายที่มีความสัมพันธ์ตามทฤษฎีการดูดซับของ Freundlich ซึ่งกล่าวไว้ว่าการดูดซับสี่ข้อม จะเกิดที่ผิวเซลล์เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และเกิดการดูดซับบนตำแหน่งดูดซับซึ่งต่างชนิดกัน (heterogeneous binding site) ใ้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (Masel, 1996) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายส่วนใหญ่สัมพันธ์กับสมการการดูดซับของ Langmuir ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ไปใช้ในการดูดซับสี่ข้อมได้ โดยพิจารณาจากค่า การดูดซับสี่ข้อมสูงสุด (Q_{max})

โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสี่ข้อมสูงสุด (Q_{max}) ของสาหร่ายในการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ ในตารางที่ 11 พบว่าการศึกษาครั้งนี้ค่าการดูดซับสี่ข้อมสูงสุดของสาหร่าย *G. fisheri* ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเบนเนวอลเรดได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำ *Azolla filiculoides* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดกรีน 3 (Padmesh et al. 2005) และแอสิดออเรนจ์ 7 (Padmesh et al. 2006) หน้้าทะเล *Posidonia oceanica* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเฮลโล 59 (Guczguez 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. ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมเบสิคมาลาโคทกรีนได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่าย *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) ดูดซับสี่ข้อมเมทิลีนบลูและมากกว่าสาหร่าย *C. lentillifera* ดูดซับสี่ข้อมแอสตราซอนบลู FGRL (Marungrucng and Pavasant. 2006)

สาหร่าย *G. fisheri* ให้ค่าการดูดซับสี่ข้อมริแอกทีฟได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่าย *Laminaria* sp. ในการดูดซับสี่รีแอกทีฟแบลคบี (Vijayaraghavan et al. 2008) และ *Phormidium* sp. ในการดูดซับสี่รีแอกทีฟแบลคบีและสี่รีมาซอลบลู (Sevgil and Gonul. (2007) แต่น้อยกว่าการใช้สาหร่าย *Spirogira rhizopus* ในการดูดซับสี่รีแอกทีฟเฮลโล 22 (Moham et al. 2002) และมากกว่าการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในการดูดซับสี่รีแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ และริมาซอล โกลเคนท์เฮลโล แต่น้อยกว่าการดูดซับสี่รีแอกทีฟริมาซอลแบลคบี (Aksu and Tezer. 2005)

นอกจากนี้ค่า K_d จากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ยังสามารถบอกค่าคงที่ในการดูดซับสี่ข้อมของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพันธ์ของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า K_d การดูดซับสี่ข้อมของสาหร่าย *G. fisheri* พบว่ามีค่า K_d ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเบนเนวอลเรดสูงกว่าพืชน้ำ *Azolla filiculoides* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดกรีน 3 (Padmesh et al. 2005) แอสิดออเรนจ์ 7 (Padmesh et al. 2006) และสาหร่าย *Spirogira rhizopus* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดบลู 329 และสี่ข้อมแอสิดบลู 290 (Ozer et al. 2006b) แต่ต่ำกว่าหน้้าทะเล *Posidonia oceanica* ในการดูดซับสี่ข้อมแอสิดเฮลโล 59 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Guezguez *et al.* 2009) สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีข้อม แอซีดเรด 337 แอซีดบลู 324 (Ozer *et al.* 2005) และแอซีดเรด 274 (Ozer *et al.* 2005b)

สาหร่าย *Padina* sp. ให้ค่า K_d ในการดูดซับสีข้อมเบสิคมาลาไคท์กรีนสูงกว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่ดูดซับสีข้อมแอสตราซอนบลู FGRL (Marungrueng and Pavasant. 2006) สาหร่าย *Enteromorpha* spp.ดูดซับสีข้อมเมททีลีนบลู (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) ดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน (ตารางที่ 4.11)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของตัวดูดซับต่างๆ ในการดูดซับสีย้อม

สีย้อม	ตัวดูดซับ	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	K_d (มิลลิกรัมต่อ กรัม)	เอกสารอ้างอิง
สีย้อมเอซิด				
เอซิดกรีน 3 (Acid green 3)	พืชน้ำ <i>Azolla filiculoides</i>	137	0.0052	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
เอซิดออเรนจ์ 7 (Acid orange 7)	พืชน้ำ <i>Azolla filiculoides</i>	109.6	0.0043	Padmesh <i>et al.</i> (2005)
เอซิดเคลโล 59 (Acid yellow 59)	หญ้าทะเล <i>Posidonia oceanica</i>	76.9	2.94	Guezguez <i>et al.</i> (2009)
เอซิดเรด 337 (Acid red 337)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	210.87	0.0187	Ozer <i>et al.</i> (2005a)
เอซิดบลู 324 (Acid blue 324)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	160.59	0.00960	Ozer <i>et al.</i> (2005a)
เอซิดเรด 274 (Acid red 274)	สาหร่ายสีเขียว <i>Enteromorpha prolifera</i>	238.1	0.0649	Ozer <i>et al.</i> (2005b)
เอซิดบลู 324 (Acid blue 324)	<i>Spirogira rhizopus</i>	367	0.00332	Ozer <i>et al.</i> (2006b)
เอซิดบลู 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	การศึกษาครั้งนี้
สีย้อมเบสิก				
แอสตราซอนบลู (Astrazon blue FGLR)	<i>C. lentillifera</i>	37.17	0.020	Marungrueng and Pavasant (2006)
มาลาโคทกรีน (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 11 (ต่อ)

สีย้อม	ตัวดูดซับ	Q_{max} (มิลลิกรัมต่อ กรัมน้ำหนักแห้ง)	K_u (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	การศึกษาค้นคว้า
สีย้อมรีแอกทีฟ				
รีแอกทีฟเฮลโล 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)
รีมาซอลโกลเดนเฮลโล (Remazol golden yellow RNL)	สาหร่ายสีเขียว <i>Chlorella vulgaris</i>	71.9	2.099	Aksu and Tezer (2005)
รีแอกทีฟแบลคบี (Reactive black 5)	สาหร่ายสีน้ำตาล <i>Laminaria</i> sp.	101.5	0.012	Vijayaraghavan <i>et al.</i> (2008)
รีแอกทีฟแบลคบี (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)
เบเนฟิแคเรด (Benefix Red)	<i>Gracilaria fisheri</i>	293.19	0.0537	การศึกษาค้นคว้า

- ไม่แสดงข้อมูล

2 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีข้อม โดยทำการคัดเลือกสาหร่ายที่หาง่าย มีปริมาณมากในธรรมชาติ และให้ค่าการดูดซับสีข้อมสูง พบว่าสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูง 3 ชนิด ในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, การดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีน ได้แก่ สาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิครเรด ได้แก่ ไชวาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri* จึงได้นำสาหร่ายนี้มาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้สาหร่ายดูดซับสีข้อม เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ดูดซับสีข้อมจากน้ำเสียจริงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

2.1.1 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด

การดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้ 68.69 ± 0.57 , 63.77 ± 0.61 และ 69.80 ± 0.20 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 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 สามารถดูดซับสีข้อมได้เพียง 6.17 ± 0.02 , 6.08 ± 0.03 และ 6.92 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีข้อมลดลงประมาณ 10 เท่า (ตารางที่ 12)

2.1.2 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีน

การดูดซับสีข้อมมาลาโคท์กรีนโดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ใช้ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีข้อมมาลาโคท์กรีนออกจากสารละลายได้ 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 น้ำหนักแห้ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับลดลงประมาณ 11 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมเบนเฟนเฟครด

การดูดซับสีข้อมเบนเฟนเฟครด โดยสาหร่ายที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกันระหว่าง 0.5-6 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ใช้ 0.5 กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถกำจัดสีข้อมเบนเฟนเฟครดออกจากสารละลายได้ 90.88 ± 0.23 , 68.63 ± 0.44 และ 91.56 ± 0.22 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 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 กรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร สามารถดูดซับสีข้อมได้เพียง 15.94 ± 0.09 , 13.60 ± 0.09 และ 15.98 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับลดลง 11, 9 และ 11 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 14)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณ เซลล์ (กรัมต่อ ลิตร)	ไม้ใส่สาหร่าย		<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 ^e	63.77±0.61 ⁱ	65.3±0.14 ^h	69.80±0.20 ^c
1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	33.35±0.08 ⁱ	71.29±0.11 ^e	32.06±0.26 ⁱ	68.54±0.31 ^c	39.42±0.35 ⁱ	84.27±0.47 ^d
1.5	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	22.63±0.09 ^c	72.58±0.23 ^d	22.28±0.09 ^c	71.43±0.17 ^d	27.11±0.12 ^c	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 ^e	87.47±0.17 ^b
3	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	12.26±0.07 ^h	78.64±0.31 ^{ab}	12.01±0.10 ^o	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)

ตารางที่ 13 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลาไลท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ปริมาณเซลล์แตกต่างกัน

ปริมาณ เซลล์ (กรัมต่อ ลิตร)	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 (%)
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 ⁱ	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 ^c	96.78±0.23 ^b	1.77±0.04 ^c	93.57±0.27 ^{bc}	1.78±0.05 ^c	93.75±0.40 ^c
3	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	1.54±0.03 ^c	97.26±0.13 ^{ab}	1.49±0.03 ^c	94.21±0.23 ^b	1.50±0.03 ^c	95.11±0.28 ^b
6	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.77±0.02 ^b	97.96±0.13 ^a	0.76±0.02 ^b	96.62±0.42 ^a	0.76±0.02 ^f	96.43±0.22 ^a

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณสาหร่ายที่ใช้แตกต่างกันมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับได้ต่อเซลล์สาหร่ายแห้งลดลง (ตารางที่ 12, 13, และ 14) เนื่องจากปริมาณสาหร่ายน้อยทำให้มีพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งยึดจับของสาหร่ายกับ โมเลกุลของสีข้อมต่อหน่วยของสาหร่ายได้มากกว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายมาก และปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันหรือชิดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งยึดจับบางส่วนไม่สามารถจับกับสีข้อมได้ (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 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (Tsai and Chen., 2010) และการใช้สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีข้อมแอซิด AB 324 และ AR 337 ที่ความแตกต่างของปริมาณตัวดูดซับ 5 ระดับ ในช่วง 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้มีการดูดซับสีข้อมทั้งหมด(เปอร์เซ็นต์การดูดซับ)เพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับปริมาณสีข้อมต่อหน่วยสาหร่ายลดลง (Ozer *et al.* 2005b) และการศึกษาผลของปริมาณสาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* ต่อการดูดซับสีข้อมเบสิก Yellow ที่ความแตกต่างของปริมาณตัวดูดซับ 4 ระดับ ในช่วง 3-10 กรัมต่อลิตร พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 81 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นการดูดซับต่อหน่วยกรัมสาหร่ายลดลง (Aravindhan *et al.* 2007) เนื่องจากปริมาณสีข้อมที่มีอยู่ในสารละลายนั้นมีอยู่จำกัด เมื่อใส่สาหร่ายลงไปจำนวนมากเกินจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่ม ตำแหน่งยึดจับมากขึ้นจำนวนสีข้อม เมื่อการดูดซับเสร็จสิ้นยังคงมีตำแหน่งยึดจับบางส่วนที่ว่างอยู่ หากใส่ตัวดูดซับจำนวนน้อยลงในปริมาณสีข้อมเท่ากัน ทำให้ตำแหน่งยึดจับสามารถจับสีข้อมได้เต็มที่ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันจึงทำให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนน้อยมีการดูดซับสีข้อมได้มากกว่า (Gadd, 1988; Fourest and Roux, 1992)

การใช้สาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ในการดูดซับสีข้อมเมทีลีนบลูที่พื้นแปรปริมาณเซลล์สาหร่ายระหว่าง 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* ดูดซับสีข้อมแอซิดเรด 274 ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับ ในช่วง 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อปริมาณของสาหร่ายเพิ่มขึ้น จากประมาณ 500-100 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (Ozer *et al.*, 2006b)

นอกจากนี้การใช้พืชน้ำ *Pasidonia ocaenica* ดูดซับสีข้อมแอซิดเยลโล 59 (Acid Yellow 59) ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 0.5-10 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสีข้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.2 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

2.2.1 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสำหรับ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเนวอลเรด 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้ 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 15) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเนวอลเรดต่ำลงเป็น 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

2.2.2 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมมาลาโคทกรีน

การดูดซับสีย้อมมาลาโคทกรีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสำหรับ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมาลาโคทกรีน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมมาลาโคทกรีนออกจากสารละลายได้ 56.54 ± 0.61 , 48.33 ± 0.82 และ 46.44 ± 1.39 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 483.37 ± 9.23 , 413.28 ± 11.45 และ 397.20 ± 16.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 16) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมาลาโคทกรีนต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. สามารถดูดซับสีย้อมได้ 8.44 ± 0.08 , 8.22 ± 1.25 และ 8.23 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงประมาณ 57, 50 และ 48 เท่า ตามลำดับ แต่สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 95.12 ± 0.05 , 92.65 ± 0.82 และ 92.71 ± 0.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิแคเรด

การดูดซับสีย้อมเบนเนฟิแคเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันระหว่าง 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณสำหรับ *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเนฟิแคเรด 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเบนเนฟิแคเรดออกจากสารละลายได้ 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 17) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำลง ($p < 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบนเนฟิแคเรดต่ำลงเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ *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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด โดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ความเข้มข้นของสีข้อมเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสี ข้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ไม้ใส่สาหร่าย		<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 (%)
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 ^k	85.40±1.26 ^a	70.18±1.33 ⁱ	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 ^k	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 ^c	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 ^c	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 ⁱ	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 ^c	341.79±15.01 ^b	45.19±1.62 ^k	505.20±14.98 ^h	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 ^t	410.56±13.27 ^a	40.56±2.16 ^h	601.80±13.39 ^a	59.47±1.40 ^d

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 16 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสี เขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใช่สาหร่าย		<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 ^u	8.22±1.25 ⁱ	92.65±0.82 ^u	8.23±0.13 ⁱ	92.71±0.58 ^u
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 ^{hi}	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 ^g	92.10±0.62 ^{bcd}	77.86±1.32 ^g	88.08±0.57 ^{ab}	78.22±1.16 ^g	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 ^b	0.00±0.00 ^a	119.02±1.99 ⁱ	91.11±0.62 ^d	101.72±1.83 ⁱ	77.86±0.63 ^c	108.69±1.93 ⁱ	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 ^c	139.94±3.43 ^e	78.98±0.84 ^{cd}	133.45±0.74 ^c	75.35±0.69 ^c
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 ^{de}	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 ^c	321.94±2.89 ^c	74.82±1.08 ^c
750	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^a	399.93±6.57 ^b	61.27±0.66 ^e	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 ^g	397.20±16.33 ^a	46.44±1.39 ^g

อักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 17 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่ความเข้มข้นของสีเขียวเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นสี เขียวเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ไม่ใส่สาหร่าย		<i>Arthrospira platensis</i>		<i>Caulerpa lentillifera</i>		<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 (%)
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 ^c
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)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าความเข้มข้นสีข้อมที่เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าการดูดซับต่อหน่วย (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) เพิ่มขึ้นแต่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลง (ตารางที่ 15- 17) เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์พบว่าการดูดซับยังคงมีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า 40-50 เปอร์เซ็นต์) ในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด โดย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 100, 80 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 15) การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน โดย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 150, 100 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 16) และการดูดซับสีข้อมเบนเฟ็คเรด โดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* เมื่อความเข้มข้นไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 17) เมื่อความเข้มข้นของสีข้อมสูงกว่าระดับดังกล่าวนี้แม้ว่าปริมาณการดูดซับสูงขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีข้อมต่ำลง ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับสูงขึ้นเนื่องมาจากมีการสะสมสีข้อมบนผิวเซลล์ตัวดูดซับซึ่งสามารถเกิดเป็นชั้นซ้อนกันหลายๆ ชั้น ทำให้การดูดซับสูงขึ้นและความเข้มข้นสีข้อมที่สูงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงผลักของประจุสีข้อมจากสารละลายสู่ผนังเซลล์ตัวดูดซับสูง ทำให้เกิดการขนส่งประจุจากสารละลายภายนอกเซลล์ไปยังผนังเซลล์ของสาหร่ายได้แรงและเร็ว ตัวดูดซับจึงสามารถบำบัดสีข้อมได้เร็วและได้มาก ค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะถูกจำกัดโดยปริมาณตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับ โดยถ้าความเข้มข้นของสีข้อมต่ำ ค่าการดูดซับอาจจะต่ำ เพราะตำแหน่งยึดจับของตัวดูดซับไม่ได้ใช้ทั้งหมด (Ozer *et al.* 2006b) สอดคล้องกับการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีข้อมแอสซิคเรด 274 เริ่มต้น โดยสาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25-3600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณการดูดซับสีข้อมเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสีข้อมที่เพิ่มขึ้น (Ozer *et al.* 2006a) การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายสีเขียว *Cosmarium* sp. ที่ความเข้มข้น 2.5 ถึง 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.22 ถึง 2.78 มิลลิกรัมต่อ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร หรือ 40 ถึง 83.33 เปอร์เซ็นต์ (Daneshvar *et al.* 2007) การใช้สาหร่าย *Caulerpa scalpelliformis* ดูดซับสีข้อมเบสิกเยลโล (Basic Yellow) ที่ปริมาณสาหร่าย 5 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีข้อมจาก 25 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 4.7 ถึง 27 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Aravindhan *et al.* 2007) การใช้สาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเมทิลีนบลู ปริมาณสาหร่าย 0.5 กรัมต่อ 30 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าการดูดซับ 0.295-5.777 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Cengiz and Cavas. 2008) การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ที่ความเข้มข้นสีข้อมแตกต่างกัน 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 สีรีแอกทีฟริมาซอลแบลคบี (Remazol แอ็กสารนี้เป็นแอ็กสารที่สวางไวสำหรับกำจัดสีน้ำเพื่อการรักษาแทนนิน เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

black B) รีมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol red RR) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 20-800 มิลลิกรัมต่อลิตร และรีมาซอลโกลเดนที่เยลโล (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. ดูดซับสีเขียวอมฟ้า (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)

2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวอมฟ้า

2.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีเขียวอมฟ้าบนวอลเรด

การดูดซับสีเขียวอมฟ้าบนวอลเรดโดยสาหร่าย *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 ($p < 0.05$) และกำจัดสีเขียวอมฟ้าออกจากสารละลายได้เท่ากับ 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 ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีเขียวอมฟ้าบนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 73.20 ± 0.35 และ 87.40 ± 0.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีเขียวอมฟ้าบนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิระหว่าง 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 99.15, 10.02 และ 87.14 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

2.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน

การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *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 ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 94.82 ± 0.45 เปอร์เซ็นต์ ส่วน *Turbinaria* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.26 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 93.38 ± 0.60 เปอร์เซ็นต์ และ *Sargassum* sp. มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.26 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 93.53 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 19)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 50.40, 46.16 และ 47.85 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

2.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเคเรด

การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-55 องศาเซลเซียส พบว่า *A. platensis* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 93.45 ± 0.76 และ 93.39 ± 0.60 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับอุณหภูมิอื่นๆ ($p < 0.05$) สามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 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 ($p < 0.05$) และสามารถกำจัดสีข้อมเบนเนวอลเรดออกจากสารละลายได้เท่ากับ 75.93 ± 0.43 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 20)

ค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-55 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 38.04, -41.25 และ 35.83 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเบนวอลเรดโดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	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 (%)
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 ^b	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 ^e
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 19 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม้ได้สาหร่าย		<i>Padina</i> sp.		<i>Turbinaria</i> sp.		<i>Sargassum</i> sp.	
	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)	ปริมาณการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
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 ^c	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 20 ค่าการดูดซับสีของเบนเนฟิค โดยสาหร่าย *Arthrospira platensis*, *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	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 (%)
25	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	63.02±0.51 ^e	70.94±0.59 ^e	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 ^e	61.85±1.03 ^d	65.02±0.91 ^c	71.37±0.38 ^c	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 ^d	75.93±0.43 ^c	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 ^b	83.75±0.59 ^c	70.24±0.54 ^d	72.019±0.42 ^b	81.68±0.72 ^d	83.75±0.59 ^b
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 ^e	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 ^c	54.44±0.56 ^c	84.71±0.37 ^c	79.44±0.36 ^d

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 21 ค่าเอนทัลปี (ΔH) เอนโทรปี (ΔS) และพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) ของการดูดซับ
สีข้อมเบเนวอลเรด

สำหรับ	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

ตารางที่ 22 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีข้อมมาลาโคทกรีน

สำหรับ	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

ตารางที่ 23 ค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ของการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครีด

สำหรับ	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 45-50 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 55 องศาเซลเซียส การดูดซับลดลงอาจเนื่องมาจากบริเวณผิวหน้าสาหร่ายถูกทำลายด้วยความร้อนจึงส่งผลให้ตำแหน่งที่จับกับสีย้อมเสียสภาพทำให้การดูดซับลดลง (Marunreung and Pavasant, 2006) แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ไม่ได้ส่งผลให้การดูดซับลดลงมากนักอาจเนื่องมาจากการทำลายผิวหน้าเซลล์สาหร่ายอาจเกิดเป็นบางส่วน และยังพบว่าในการดูดซับสีย้อมเบนเนออลเรด โดยสาหร่าย *Rhizoclonium* sp. และการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Sargassum* sp. ค่าการดูดซับยังคงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 55 องศาเซลเซียส แสดงว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ยังไม่สูงพอที่จะส่งผลต่อผิวหน้าสาหร่าย *Rhizoclonium* sp. และ *Sargassum* sp. ในการดูดซับสีย้อมดังกล่าว ยกเว้นในการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคโดยสาหร่าย *C. lentillifera* ที่มีการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าระดับนี้ค่าการดูดซับลดลง

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ และอุณหภูมิยังมีผลเกี่ยวข้องต่อการดูดซับสีย้อมของสิ่งมีชีวิต โดยความเร็วของปฏิกิริยาหรือ rate of chemical reaction จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Ledin, 2000) ส่วนใหญ่แล้วความสามารถในการนำบดหรือดูดซับสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับชีวภาพ การดูดซับจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Wild, 1993) แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยพบว่าถ้ามีค่าเอนทัลปี (ΔH) เป็นลบนั้นคือเป็นการดูดซับแบบ 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

จากการศึกษาในครั้งนี้หากพิจารณาค่าเอนทัลปีพบว่าการดูดซับสีย้อมเบนเนออลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเนฟิคเรดโดยสาหร่ายทุกชนิดมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ยกเว้นการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิคเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera* ที่มีค่าเอนทัลปีเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นลบ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบค่าการดูดซับจะลดลง และค่าเอนโทรปีพบว่าการดูดซับสี่ข้อมเบนเวอลเรด มาลาโคทกริน และเบนเนฟิเคเรด โดยสำหรับทุกชนิดมีค่าเป็นบวก แสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มการสั่นจับหรือไม่มีการเลือกตำแหน่งยึดจับระหว่างผิวตัวดูดซับกับสี่ข้อมในสารละลาย ยกเว้นการดูดซับสี่ข้อมเบนเนฟิเคเรด โดยสำหรับ *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นลบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับลดลงเนื่องจากการลดการสั่นจับหรือมีการเลือกตำแหน่งยึดจับระหว่างผิวตัวดูดซับกับสี่ข้อมในสารละลายมากขึ้นในสำหรับชนิดนี้ หรือหากพิจารณาค่าพลังงานอิสระกิบส์ พบว่าการดูดซับสี่ข้อมเบนเวอลเรด มาลาโคทกริน และเบนเนฟิเคเรด โดยสำหรับทุกชนิดมีค่าเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ ยกเว้นการดูดซับสี่ข้อมเบนเนฟิเคเรด โดยสำหรับ *C. lentilipera* ที่มีค่าเป็นบวก แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้หรือเกิดขึ้นแบบย้อนกลับนั่นคือการลดอุณหภูมิทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ในการศึกษารั้วนี้พบว่าค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระกิบส์ในสำหรับทุกกลุ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับการดูดซับสี่ข้อมเบนเวอลเรด แต่สำหรับกลุ่มสีเขียวในการดูดซับสี่ข้อมเบนเนฟิเคเรดมีค่าตรงข้ามจากผลการทดลองดังกล่าว

ในหลายๆ การศึกษามักใช้ค่าเอนทัลปีหรือพลังงานอิสระกิบส์ในการพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เนื่องจากอธิบายได้ง่ายว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีลักษณะอย่างไร เช่นรายงานการศึกษาของ Marungrueng and Pavasant (2006) ซึ่งทำการศึกษาค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีเบสิก Astrazon blue FGRL ของสำหรับ *C. lentilifera* ที่อุณหภูมิ 18, 27, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเอนทัลปีเป็นบวกซึ่งเท่ากับ 14.87 กิโลจูลต่อโมล โดยไม่นำอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มาคิดเนื่องจากผนังเซลล์สำหรับถูกทำลาย โดยความร้อน

ในการศึกษาของ Aravindhan *et al.* (2007) ซึ่งค่าเอนทัลปีสำหรับการดูดซับสีเบสิก Yellow dye ของสำหรับ *Caulerpa scalpelliformis* พบว่าค่าเอนทัลปีเท่ากับ -3.306 กิโลจูลต่อโมล จากการศึกษาการดูดซับสี่ข้อมแอซิด AR 274 โดยสำหรับ *Enteromorpha prolifera* ที่อุณหภูมิระดับ 20, 25, 30, 35, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสี่ข้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าสูงสุดที่ดูดซับสี่ข้อมได้คือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสแต่ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้นให้บริเวณผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าการดูดซับลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่ากระบวนการดูดซับสี่ข้อม AR 274 โดยสำหรับ *E. prolifera* มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา (คายความร้อน) ในธรรมชาติ ของการดูดซับสี่ข้อมทางชีวภาพ (Ozer *et al.* 2005a) โดยมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ -5.28, -4.67, -4.06 และ -2.83 กิโลจูลต่อโมล การใช้พืชน้ำ *Azolla rongpong* ดูดซับสี่ข้อมแอซิด ได้แก่ แอซิดเรด 88 (acid red 88), แอซิดกรีน 3 (acid green 3), แอซิดออเรนจ์ 7 (acid orange 7) และแอซิดบลู (acid blue 15) ที่ผันแปรอุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ 4 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 30 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับสูงสุดซึ่งเท่ากับ 81.30, 83.33, 76.92 และ 76.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าแอนทัลปีเป็นบวกซึ่งเท่ากับ 21.83, 30.98, 25.82 และ 15.23 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (Padmesh *et al.* 2006) การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีน โดยสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ *Pithophora* sp. ที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วหาค่าพลังงานอิสระกิบส์พบว่าพลังงานอิสระเป็นลบมีค่าเท่ากับ -8.585 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง (Kumar *et al.* 2005)

การใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 298, 308 และ 318 องศาเซลวิน พบว่ามีค่าพลังงานอิสระกิบส์เป็นลบมีค่าเท่ากับ -7.1, -9.8 และ -10.9 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ และค่าแอนทัลปีเป็นบวกเท่ากับ 49.6 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 318 องศาเซลวินหรือ 45 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับเท่ากับ 25.67 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Bekci *et al.* 2009) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* ดูดซับมาลาไคท์กรีนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 298, 298 และ 318 องศาเซลวิน พบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 9.074, 9.452 และ 9.302 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Tsai and Chen. 2010) การดูดซับสีเขียวแอซิดเรด 337 (acid red 337) และแอซิดบลู 324 (acid blue 324) โดยสาหร่ายสีเขียว *Enteromorpha prolifera* ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการดูดซับเท่ากับ 41.55, 61.32, 67.29, 63.73 และ 45.05 และ 32.93, 66.27, 53.57, 45.84 และ 36.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อหาค่าพลังงานของแอซิดเรด 337 โดยใช้อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส และแอซิดบลู 324 โดยใช้อุณหภูมิ 25-50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าแอนทัลปีเท่ากับ -13.58 และ -3.64 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ (Ozer *et al.* 2005b) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ดูดซับสีเขียวเมริแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ (Remazol red RR) และริมาซอลโกลเดนที่เบลโลอาร์เอ็นแอล (Remazol golden yellow RNL) ที่ระดับอุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่า *C. vulgaris* ดูดซับสีเขียวเมริแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ สูงสุดที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 196.1 และ 71.9 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น *C. vulgaris* มีค่าการดูดซับสีเขียวเมริแอกทีฟริมาซอลเรดอาร์อาร์ ลดลง โดยมีค่าแอนทัลปีเท่ากับ -10.63 และ -23.15 กิโลจูลต่อโมล (Aksu and Tezer. 2005) การดูดซับสีเขียวเมริแอกทีฟริมาซอลบิลเลียนบลูอาร์ (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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อม

ทำการศึกษาผลของขนาดสาหร่ายต่อการดูดซับสีข้อมโดยใช้สาหร่ายขนาดน้อยกว่า 0.1, 0.1-0.24, 0.25-0.49 และ 0.5-1 มิลลิเมตร

2.4.1 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรด

การดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรดโดยสาหร่ายที่ขนาดแตกต่างกันพบว่าขนาดสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 24) สามารถกำจัดสีข้อมเบเนวอลเรดออกจากสารละลายได้สูงสุดเท่ากับ 73.13 ± 0.66 , 63.24 ± 0.18 และ 80.83 ± 0.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ *C. lentillifera* และ *Rhizoclonium* sp. สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 34.03 ± 0.42 และ 29.43 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกับขนาดเซลล์ 0.1-0.24 มิลลิเมตร แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *G. fisheri* สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงสุด 37.61 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$)

2.4.2 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน

Padina sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 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 ($p < 0.05$)

2.4.3 ขนาดของสาหร่ายที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครีด

การดูดซับสีข้อมเบเนวอลเรดโดยสาหร่ายที่ขนาดแตกต่างกันพบว่าขนาดสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ตารางที่ 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 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับขนาดเซลล์อื่นๆ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 24 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *Gracilaria fisheri* ที่ขนาดเซลล์แตกต่างกัน

ขนาดเซลล์ (มิลลิเมตร)	ไม้สาหร่าย		<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 ^d	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 ($p < 0.05$)

ตารางที่ 25 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *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 ($p < 0.05$)

ตารางที่ 26 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมเบนเนฟิเรด โดยสาหร่าย *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)

จากการศึกษานี้พบว่าการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดโดย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* การดูดซับสีย้อมมาลาไลท์กรีนโดย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีย้อมเบเนวอลเรดโดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ที่ขนาดสาหร่ายน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับสูงสุด (ตารางที่ 24-26) โดยทั่วไปความสามารถในการดูดซับสีถูกควบคุมด้วยสองกลไก คือพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Punjongham *et al.*, 2008) โดยขนาดสาหร่ายที่เล็กทำให้พื้นที่ผิวหน้าของสาหร่ายมีโอกาสสัมผัสโมเลกุลของสีย้อมในสารละลายมากกว่าสาหร่ายที่ขนาดใหญ่กว่า อนุภาคตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวโดยรวมทั้งหมดมากจึงสามารถกำจัดสีออกจากระบบได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่สอดคล้องกับ Punjongham *et al.* (2008) ซึ่งทำการศึกษาผลของการความแตกต่างของขนาดสาหร่าย *C. lentillifera* โดยขนาดเล็ก (0.1-0.84 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (0.84-2 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (มากกว่า 2 มิลลิเมตร) ต่อการดูดซับสีเบสิกแอสตราซอน โกลเดนท์เยลโล้แอสตี (Astrazon Golden Yellow GL-E) แอสตราซอน แอฟจีเออาร์แอสบลู (Astrazon FGRL Blue) และแอสตราซอนจีทีแอลเอ็นเรด (Astrazon GTLN Red) พบว่าสาหร่ายที่มีขนาดเล็กมีค่าการดูดซับสูงสุดและการดูดซับลดลงเมื่อขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีค่าการดูดซับสีแอสตราซอน โกลเดนท์เยลโล้แอสตีของสาหร่ายแต่ละขนาดเท่ากับ 35.5, 27.4 และ 26.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับสีแอสตราซอนแอฟจีเออาร์แอสบลู 80.7, 70.4 และ 68.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และการดูดซับสีแอสตราซอนจีทีแอลเอ็นเรด 113.6, 76.9 และ 78.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และการใช้ไดอะโตมาเทียส (diatomaceous) จากสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมในการดูดซับสีย้อมเบสิกเมทีลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.13-1.87 มิลลิโมลต่อลิตร โดยขนาดของไดอะโตมาเทียสที่แตกต่างกันคือ 45-63, 200-500 และมากกว่า 500 ไมโครเมตร พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 27.8, 17.4 และ 13.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Shawabkeh and Tutunji, 2003) การใช้สาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* ดูดซับสีย้อม โรดามีนบี (rhodamine B) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขนาดที่แตกต่างกันระหว่างสาหร่ายรูปแบบที่ไม่บดเป็นผงและรูปแบบที่บดเป็นผง พบว่าสาหร่ายในรูปแบบที่บดเป็นผงมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่ารูปแบบที่ไม่บดเป็นผง โดยสาหร่ายสามารถดูดซับ โรดามีนบีได้ 96 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Hii *et al.* 2009)

นอกจากนี้การใช้พีชกลุ่มเฟรินดูดซับสีย้อมเบสิกเรด 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)

3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาอันดับของปฏิกิริยา และขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา จากการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมโดยการคัดเลือกสาหร่ายที่แสดงค่าการดูดซับสูง หาง่าย และมีปริมาณมากจากธรรมชาติ ได้แก่ การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*, การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่ายสีน้ำตาล *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และการดูดซับสีย้อมเบนเนฟิครดโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*, สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri* และนำมาศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

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

การพิจารณาว่าสาหร่ายมีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นอันดับใดพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r) ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา

โดยอันดับของปฏิกิริยาใดที่มีค่า r สูงกว่าคืออันดับปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายชนิดนั้นๆ การดูดซับสีย้อมเบนเนวอลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน (ตารางที่ 27-29) และอัตราเร็วของการดูดซับขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสอง มีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 30-32)

ตารางที่ 27 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด โดย *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นของ สีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-1}$ ลิตรต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-1}$ 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 28 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีข้อมเบนเนวอลเรด โดย *Rhizoclonium* sp.

ความเข้มข้นของสี ข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-1}$ ลิตร ต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-1}$ 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 29 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรด โดย *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	$-k$ ($\times 10^{-1}$ ลิตร ต่อนาที)	$-r$	k ($\times 10^{-1}$ 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

ตารางที่ 30 ความเข้มข้นของสีเขียวเบนเนออลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นสีเขียว เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน	การแพร่ภายในอนุภาค	
	ชั้นฟิล์ม	การดูดซับช่วงแรก	การดูดซับช่วงที่สอง
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที ¹)	(มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที ^{-0.5})	(มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที ^{-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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 31 ความเข้มข้นของสีย้อมเบนเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Rhizoclonium* sp.

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที่ ¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.1})	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

ตารางที่ 32 ความเข้มข้นของสีย้อมเบนเนวอลเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp.

การดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนโดย *Turbinaria* sp. *Padina* sp. และ *Sargassum* sp. มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน (ตารางที่ 33-35) และอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสองมีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 36-38)

ตารางที่ 33 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวอมมาลาไคท์กรีนโดย *Padina* sp.

ความเข้มข้นของ สีเขียวอม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเหมือน		อันดับที่สองเหมือน	
	$-k$ ($\times 10^4$ 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 34 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวมาลาไลท์กรีนโดย *Turbinaria* sp.

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k (x10 ⁻⁴ ลิตร ต่อนาที)	-r	k (x10 ⁻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 35 อันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับสีเขียวมาลาไลท์กรีนโดย *Sargassum* sp.

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกิริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k (x10 ⁻⁴ ลิตร ต่อนาที)	-r	k (x10 ⁻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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 36 ความเข้มข้นของสีของมาลาโคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Padina* sp.

ความเข้มข้นสีของ เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที่ ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที่ ^{-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

ตารางที่ 37 ความเข้มข้นของสีของมาลาโคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Turbinaria* sp.

ความเข้มข้นสีของ เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 38 ความเข้มข้นของสีของมาลาไคท์กรีนเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Sargassum* sp.

ความเข้มข้นสี เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (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

3.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีของเบนเฟนโคลิกเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri*

การดูดซับสีของเบนเฟนโคลิกเรดโดย *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (ตารางที่ 39-41) และ *C. lentillifera* มีอัตราเร็วของการดูดซับชั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรก (ตารางที่ 43) *A. platensis* และ *G. fisheri* มีอัตราเร็วของการดูดซับชั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงสองมีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ (ตารางที่ 42, 44)

ตารางที่ 39 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครด โดย *Arthrospira platensis*

ความเข้มข้นของ สีข้อม (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 40 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีข้อมเบเนฟิครด โดย *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นของ สีข้อม (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 43 ความเข้มข้นของสีของเบนเฟนพิกเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Caulerpa lentillifera*

ความเข้มข้นสีของ 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

ตารางที่ 44 ความเข้มข้นของสีของเบนเฟนพิกเรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นสีของ เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม	การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 41 อันดับของปฏิกริยาในการดูดซับสีเขียวเบนเฟนฟิเกรด โดย *Gracilaria fisheri*

ความเข้มข้นของ สีเขียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อันดับของปฏิกริยา			
	อันดับที่หนึ่งเสมือน		อันดับที่สองเสมือน	
	-k ($\times 10^{-4}$ ลิตร ต่อนาที)	-r	k ($\times 10^{-4}$ กรัมต่อ มิลลิกรัมต่อนาที)	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

ตารางที่ 42 ความเข้มข้นของสีเขียวเบนเฟนฟิเกรดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วของการดูดซับในชั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคของ *Arthrospira platensis*

ความเข้มข้นสีเขียว เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การแพร่ผ่าน ชั้นฟิล์ม		การแพร่ภายในอนุภาค	
	การดูดซับ ช่วงแรก (นาที ⁻¹)	การดูดซับช่วงแรก (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที ^{0.5})	การดูดซับช่วงที่สอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นาที ^{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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรดโดยสาหร่าย *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* (ตารางที่ 27-29) สีข้อมมาลาโคทกรีนโดยสาหร่าย *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. (ตารางที่ 33-35) และสีเขียวเบนเนออลเรดโดยสาหร่าย *A. platensis*.

C. lentillifera และ *G. fisheri* (ตารางที่ 39-41) พบว่ามีปฏิริยาการดูดซับเป็นปฏิริยาอันดับสองเหมือน โดยพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r) ของอัตราเร็วของปฏิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิริยา พบว่าปฏิริยาอันดับสองเหมือนมีค่าความสัมพันธ์สูงกว่าอันดับหนึ่งเหมือน คืออัตราเร็วของปฏิริยาเป็นปฏิภาคกับกำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเข้าสู่ระบบหนึ่งเท่าจะดูดซับสีเขียวเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของตัวดูดซับตั้งต้น จากการศึกษาอันดับของปฏิริยาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาอันดับของปฏิริยาของการใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีเบสิกมาลาโคทกรีน (Bekci *et al.* 2009) และดูดซับสีเบสิกเมทิลินบลู (Cengiz and Cavas, 2008) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. (Tsai and Chen, 2010) และสาหร่ายสีน้ำตาล *Turbinaria conoides* (Kannan *et al.* 2010) ดูดซับสีมาลาโคทกรีน การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* การดูดซับสีแอสตราซอลบลู FGRL (Astrazon Blue FGRL) (Marungrueng and Pavasant, 2006) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* ดูดซับสีเขียวรีแอกทีฟริมาซอลเรด RR (Remazol Red RR) และริมาซอลโกลเด้นเยลโล RNL (Remazol Golden Yellow RNL) (Aksu and Tezer, 2005) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Spirogyra rhizopus* ดูดซับสีเขียวแอซิดบลู 324 (Acid Blue 324) และแอซิดบลู 290 (Acid Blue 290) (Ozer *et al.* 2006b) นอกจากนี้การใช้พืชน้ำ *Azolla filiculoides* ดูดซับสีเขียวแอซิดเรด 88 (Acid Red 88) แอซิดกรีน 3 (Acid green 3) และแอซิดออร์เรนจ์ 7 (Acid Orange 7) (Padmesh *et al.* 2005) ซึ่งการศึกษาล้วนส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าอันดับของปฏิริยาการดูดซับสีเขียวมักเป็นปฏิริยาอันดับสองเหมือน

C. lentillifera, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรดเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ตารางที่ 30-32) *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีเขียวมาลาโคทกรีนเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ตารางที่ 36-38) และ *C. lentillifera* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรดเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรก (ตารางที่ 40) *A. platensis*, และ *G. fisheri* มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับสีเขียวเบนเนออลเรดเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สอง (ตารางที่ 42 -44) ตามลำดับ ซึ่งเป็นขั้นที่มีค่าการดูดซับช้าที่สุดจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ โดยสาหร่ายทุกชนิดกับสีเขียวทุกประเภทมีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาค ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับคือขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับทั้งหมด จากกลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ จะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน คือ 1) bulk transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ จากสารละลาย ไปยังผิวเอกสารเป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับกริงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุภาคหนาไปเขยประยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ 2) film transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ 3) intraparticle transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับและ 4) adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับ 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 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นทำให้มีแรงผลักไอออนของสีย้อมเข้าไปภายในตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้อัตราเร็วของการดูดซับของสารหลายชนิดในช่วงแรกสูงกว่าช่วงที่สอง แสดงว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับคือ ขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของช่วงที่สองของการดูดซับ ยกเว้น *C. lentillifera* ที่มีอัตราเร็วของการดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเรดขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงแรกต่ำกว่าช่วงที่สอง (ตารางที่ 4.3) แสดงว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมเบนเฟลคเรดของ *C. lentillifera* คือ ขั้นการแพร่ภายในอนุภาคของช่วงแรกของการดูดซับ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าขั้นการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาสอดคล้องกับการศึกษาการใช้สาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ในการดูดซับสีย้อมอะซิเดิล 324 (Acid Blue 324) และอะซิเดิล 290 (Acid Blue 290) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ozer *et al.*, 2006b) การดูดซับสีย้อมแอซตราซอลบลู FGRL (Astrazon Blue FGRL) โดยใช้สาหร่าย *C. lentillifera* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ถึง 1280 มิลลิกรัมต่อลิตร (Marungrueng and Pavasant, 2006) การใช้สาหร่ายสีเขียว *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* ดูดซับสีย้อมสเต็กมาลาไลท์กรีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ถึง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร (Bekci *et al.* 2009) และการใช้พืชน้ำ *Posidonia oceanica* ดูดซับสีย้อมยลโล 59 (Acid Yellow 59) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Guezgues *et al.*, 2009) เมื่อหาอัตราเร็วขั้นการแพร่ภายในอนุภาคพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วในการแพร่ภายในอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วย

4 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

4.1 การบำบัดสีย้อมเบนเฟลคเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกล่องกระดาษจะผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยวิธีการบำบัดทางเคมีเนื่องจากในขั้นต้นสีย้อมมีความเข้มข้นสูงหลังจากผ่านการตกตะกอน สีย้อมที่เหลือในน้ำเสียจะผ่านขบวนการบำบัดขั้นต่อไป เช่น แลกเปลี่ยนไอออนหรือตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ ได้นำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนขั้นต้นมาทำ

เอกลิสต์เอกสารที่นำมาใช้ประกอบการศึกษาครั้งนี้ได้แก่เอกสารที่ 1-10 ซึ่งเป็นการคัดลอกเอกสารที่นำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดสีข้อมที่คงเหลือในน้ำเสียด้วยการใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวได้เตรียมขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ โดยมีวิธีการเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งทำโดยนำสีข้อมเบนเวลอเรดละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นบำบัดขั้นต้นโดยตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีข้อมปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีข้อมส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.6 มาบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใส่สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสีข้อมเบนเวลอเรดสูงสุดเท่ากับ 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 45) ส่วน *Rhizoclonium* sp. ที่ 120 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสีข้อมเบนเวลอเรดสูงสุดเท่ากับ 30.05 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ 96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 88.98 ± 0.79 เปอร์เซ็นต์

4.2 การบำบัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

นำสีข้อมมาลาไคท์กรีนละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีข้อมปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีข้อมส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5.8 บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใส่สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *Padina* sp. และ *Sargassum* sp. มีค่าการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนสูงสุด เท่ากับ 3.27 ± 0.01 และ 3.11 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ 96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 76.98 ± 0.62 และ 73.12 ± 0.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 46) ส่วน *Turbinaria* sp. ที่ 120 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนสูงสุด เท่ากับ 3.23 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ 72-96 ชั่วโมง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 75.96 ± 0.40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การบำบัดน้ำเสียขอมเบเนฟิครดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงาน

อุตสาหกรรม

นำสีขอมเบเนฟิครดละลายในน้ำประปาโดยให้ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตกตะกอนด้วย Aluminum potassium sulphate ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียที่ยังคงมีสีขอมปนเปื้อนเหลืออยู่เป็นสีขอมส่วนที่ไม่ตกตะกอน มาวัดค่าพีเอชเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 4.1 บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้สาหร่าย 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าที่ 120 ชั่วโมง *A. platensis* และ *G. fisheri* มีค่าการดูดซับสีขอมเบเนฟิครดสูงสุด 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 47) ส่วน *C. lentillifera* ที่ 120 ชั่วโมง มีค่าการดูดซับสีขอมเบเนฟิครดสูงสุด เท่ากับ 45.46 ± 0.73 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเวลาอื่นๆ ($p < 0.05$) และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 64.03 ± 0.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 45 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวของสาหร่ายในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

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 ^e	0±0.00 ^h	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ^h	0.00±0.00 ⁱ	0.00±0.00 ^h	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 ^{cf}	0.67±0.12 ^{gh}	23.06±0.72 ^d	68.27±1.53 ⁱ	22.14±0.59 ^{bc}	65.52±0.91 ^b	25.10±0.51 ^e	74.30±0.52 ^g
3	0.31±0.04 ^{cf}	0.92±0.13 ^{gh}	24.27±0.53 ^d	71.84±0.50 ^c	23.13±0.51 ^{ci}	68.47±0.79 ^f	26.99±0.35 ^d	79.91±0.45 ^f
6	0.47±0.07 ^{cd}	1.39±0.19 ^{ef}	25.88±0.30 ^c	76.64±0.45 ^d	24.10±0.48 ^{cd}	71.37±0.86 ^c	28.63±0.60 ^c	84.76±0.87 ^c
12	0.68±0.13 ^{cd}	2.01±0.36 ^{cd}	27.77±0.85 ^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 ^h	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

อักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 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 ^b	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 ^j
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 ^{dc}	6.82±0.33 ^{dc}	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 ^e	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 ^e
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)

ตารางที่ 47 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเขียวเบนเนฟิเคเรดในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม

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 ^a	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 ^{lm}	0.46±0.09 ^{gh}	20.26±0.09 ^{bc}	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 ^{gh}	27.51±0.98 ^f	38.74±1.07 ^h	11.74±1.49 ^j	16.51±1.14 ⁱ	10.28±0.18 ^b	14.48±0.25 ⁱ
3	1.20±0.14 ^{efg}	1.69±0.19 ^{gh}	30.89±0.50 ^c	43.51±0.48 ^h	16.06±0.88 ^h	22.61±0.77 ^h	12.13±0.23 ^{lm}	17.09±0.31 ^h
6	1.76±0.06 ^{cdc}	2.47±0.06 ^{efg}	35.44±0.72 ^d	49.92±0.66 ^f	19.18±1.76 ^k	27.00±1.11 ^b	13.88±0.44 ^f	19.56±0.66 ^e
12	2.21±0.26 ^{cd}	3.11±0.34 ^{def}	39.77±0.85 ^e	56.01±0.80 ^c	22.70±1.49 ^f	31.95±1.25 ^f	18.21±0.65 ^c	25.65±0.82 ^f
24	2.83±0.49 ^{bc}	3.97±0.66 ^{cd}	41.43±0.84 ^c	58.35±0.68 ^d	28.32±2.83 ^c	39.87±1.08 ^c	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)

- Mittal A., Kurup L. and Gupta V.K., 2005. Use of waste materials- bottom ash de-oiled soya, as potential adsorbents for the removal of Amaranth from aqueous solution, *J. Hazard. Mater. B* 117, 171–178.
- 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.
- Mohan, S.V., Rao. N.C., Srinivas. S., Prasad, K.K., Karthikeyan, J., 2002. Treatment of simulated reactive yellow 22 (axo) dye effluents using *Spirogyra* species. *Waste Management*. 22, 575-582.
- Namasivayam C., Muniasamy N., Gayatri K., Rani M. and Ranganathan K., 1996. Removal of dye from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel, *Bioresour. Technol.* 57, 37–43.
- Nassar M.M. and Magdy Y.H., 1997. Removal of different basic dyes from aqueous solution by adsorption on palm-fruit bunch particles. *Chem. Eng. J.* 66, 223–226.
- 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.
- Novotny, C., Dias, N., Kapanen, A., Malachova, A., Vandrovцова, M., Itavaara, M., Lima, N., 2006. Comparative use of algal and protozoan test to study toxicity of azo and anthraquinone dyes. *Chemosphere*. 63, 1436-1442.
- Okay, O.S., Donkin, P., Peters, L.D., Livingstone, D.R., 2000. The role of algae (*Isochrysis galbana*) enrichment on the bioaccumulation of benzo[a]pyrene and its effects on the blue mussel *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution* 110, 103-113.
- Ozer, A., Akkaya, G. and Turabik, M. 2005b. “The biosorption of Acid Red 337 and Acid Blue 324 on *Enteromorpha prolifera*: The application of nonlinear regression analysis to dye biosorption.” **Chemical Engineering Journal**. 112 : 181–190.
- Ozer, A., Akkaya, G. and Turabik, M. 2005a. “Biosorption of Acid Red (AR 274) on *Enteromorpha prolifera* in a batch system.” **Journal of Hazardous Materials**. B126 : 119-127.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบนเนอลเรด มาลาไคท์กรีน และเบนเพ็คเรดจากในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมได้ดีจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ถึงแม้ในน้ำเสียที่ไม่มีสาหร่ายจะมีการตกตะกอนจากไอออนต่างๆ ของน้ำประปาก็ตามแต่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อมในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับสีย้อม โดยไม่ตกตะกอนด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน พบว่าการดูดซับสีย้อม โดยไม่ตกตะกอนด้วยสารเคมีมีประสิทธิภาพสูงกว่าใช้สาหร่ายดูดซับสีย้อม ในน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นที่มีการตกตะกอนด้วยสารเคมี อาจเนื่องมาจากการไม่ปรับพีเอชของน้ำที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นที่มีการตกตะกอนด้วยสารเคมี เพราะน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมในเบื้องต้นจะตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ยังไม่รวมถึงการปรับพีเอชในสารละลายให้เหมาะสมจึงทำให้การดูดซับนี้มีสภาวะที่พีเอชในสารละลายยังไม่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้เกิดการแทนที่ของ ไอออนอื่นๆ กับผิวหน้าสาหร่ายแทนที่จะเป็น โมเลกุลของสีย้อมเนื่องจากน้ำประปามีไอออนอื่นๆ ด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของผิวหน้าสาหร่าย ไม่ได้จับกับ โมเลกุลของสีย้อม ได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตามในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมย่อมมีไอออนอื่นๆ เจือปน

มีการใช้สาหร่ายในการบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น มิในรายงาน การศึกษาการดูดซับสีย้อมของ Khalaf (2008) ได้ทำการทดลอง โดยใช้สาหร่าย *Spirogyra* sp. บำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ Synazol จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่อุณหภูมิตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำสาหร่ายมาทำการ pre-treatment โดยการนำไปผ่านหม้อน้ำเชื่อมก่อนการนำไปดูดซับ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาในการสัมผัสสีย้อม 18 ชั่วโมง

นอกจากนี้ Lim *et al.* (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพจากน้ำเสียที่มีสีอะโซรีแอคทีฟ (Azo reactive) Supranol Red 3 BW ปนเปื้อนจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยใช้เซลล์มีชีวิตซึ่งปริมาณเซลล์มีคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ในช่วง 0.17 ถึง 2.26 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 41.8 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้สาหร่าย *Chlorella vulgaris* UMACC 001 มาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมอะโซรีแอคทีฟ (Azo reactive) Lanaset red 2GA โดยใช้เซลล์สาหร่ายที่ตรึงกับอัลจินเนต (alginate) 2 เปอร์เซ็นต์ ที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 7.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 44 เปอร์เซ็นต์ (Chu *et al.* 2009)

ในการศึกษาความสามารถในการนำสาหร่ายดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมในครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นไปได้ในการนำสาหร่ายเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเบนเนออลเรดได้สูงคือ *C. lentillifera*, *Rhizoclonium* sp. และ *G. fisheri* สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพการในบำบัดสีย้อมสีย้อมมาลาโคท์กรีนได้สูงคือ *Padina* sp., *Turbinaria* sp. และ *Sargassum* sp. และสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเบนเฟ็คเรดได้สูงคือ *A. platensis*, *C. lentillifera* และ *G. fisheri* การดูดซับสีย้อมโดยสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir จลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมส่วนใหญ่มีอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และมีอัตราเร็วขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับช่วงที่สองเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ โดยพบว่าค่าเอนทัลปีของการดูดซับสีย้อมทุกประเภทโดยสาหร่ายมีค่าเป็นบวก และการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขบวนการบำบัดขั้นต้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า สาหร่ายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อม ได้แก่ *G. fisheri*, *Padina* sp. และ *A. platensis* จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้สูง จึงสามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Acuner, E., Dilek, F.B., 2004. Treatment of tectilon yellow 2G by *Chlorella vulgaris*. *Process Biochemistry* 39, 623-631.
- Adamson, A.W. 1990. **Physical Chemistry of Surfaces**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 777 p.
- Agrawal, G.L. 1990. **Basic Chemical Kinetics**. McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi. 214 p.
- Ahner, B.A., Price, N.M. and Morel, F.M.M. 1994. Phytochelatin production by marine phytoplankton at low free metal ion concentrations: laboratory studies and field data from Massachusetts Bay. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 91: 8433-8436.
- Ahuja, P., Gupta, R. and Saxena, R.K. 1999a. Sorption and desorption of cobalt by *Oscillatoria angustissima*. *Current Microbiology*. 39:49-52.
- Ahuja, P., R. Gupta and R.K. Saxena. 1997. "*Oscillatoria angustissima*: a promising Cu²⁺ biosorbent". *Current Microbiol.* 35 : 151-154.
- Akhtar, N., Saeed, A. and Iqbal, M. 2003. *Chlorella sorokiniana* immobilized on the biomatrix of vegetable sponge of *Luffa cylindrica*: a new system to remove cadmium from contaminated aqueous medium. *Bioresource Technology*. 88:163-165.
- Aksu, Z. and Tezer, S. 2005. "Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*" *Process Biochemistry*. 40 : 1347- 1361.
- Aksu, Z., Sag, Y. and Kutsal, T. 1992. "The biosorption of copper(II) by *C. vulgaris* and *Z.*
- Aravindhan, R., Rao, J.R., Nair, B.U., 2007. Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpelliformis*. *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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Bhattacharyya, K.G., Sharma, A., 2004. Azadirachta indica leaf powder as an effective biosorbent for dyes: a case study with aqueous Congo Red solutions. *J. Environ. Mangae.* 71, 217-229.
- Carr, H.P., Carino, F.A., Yang, M.S., and Wong, M.H. 1998. Characterization of the cadmium-binding capacity of *Chlorella vulgaris*. *Bulletin of Environmental Contaminate Toxicology.* 60:433-440.
- 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.
- Cho, D.U., Lee, S.T., Park, S.W. and Chung, A.A. 1994. Studies on the biosorption of heavy metals onto *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Science and Health.* 29:389-409.
- Choy, K.K.H., McKay, G., Proter, J.F., 1999. sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. *Resour. Conserv. Recycl.* 27. 57-71.
- 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., Hejazi M.J., Rangrangy B. and Khataee A.R., 2004a. Photocatalytic degradation of an organophosphorous pesticide phosalone in aqueous suspensions of titanium dioxide, *J. Environ. Sci. Heal.* B 39, 285–296.
- Daneshvar N., Salari D. and Khataee A.R., 2004b. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO₂. *J. Photoch. Photobio. A* 162, 317–322
- 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.
- Daneshvar, N., Khataee, A.R., Rasoulifard, M.H., Pourhassan, M., 2007b. Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: Optimization of effective parameters using Taguchi method. *Journal of Hazardous Materials* 143, 214-219.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Donmez, G.C., Aksu, Z., Ozturk, A. and Kutsal, T. 1999. A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. *Process Biochemistry*. 34:885-892.
- Eccles, H. 1999. Treatment of metal-contaminated wastes: why select a biological process?. *Trend in Biotechnology*. 12:462-465.
- 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., Cserhati, 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.
- Franklin, N.M., Adams, M.S., Stauber, J.L. and Lim, R.P. 2001. Development of an improved rapid enzyme inhibition bioassay with marine and freshwater microalgae using flow cytometry. *Archives Environmental Contamination Toxicology*. 40:469-480.
- Friberg, 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*
- Gupta V.K., Mittal A., Krishnan L. and Gajbe V., 2004b. Adsorption kinetics and column operations for the removal and recovery of malachite green from wastewater using ash. *Sep. Purif. Technol.* 40. 87–96.
- Gupta V.K., Mohan D., Sharma S. and Sharma M., 2000. Removal of Basic dyes (Rhodamine B and Methylene Blue) from aqueous solution using bagasse fly ash, *Sep. Sci. Technol.* 35, 2097–2113.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gupta V.K., Suhas I.A. and Saini V.K., 2004a. Removal of Rhodamine B, fast green and methylene blue from wastewater using red mud an aluminum waste, *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 1740–1747.
- 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. and McKay G., 1998. Sorption of dye from aqueous solution by peat, *Chem. Eng. J.* 70, 115–124.
- Hoffmann, E.M., Bauknecht, N., 1999. A Dye Binding Assay for the Quantification of Soluble and Cell-Bound Acidic Polysaccharides Produced by Red Algae. *Analytical Biochemistry* 267, 245-251.
- Hu, S. 1998. Cadmium sequestration in the marine macroalgae *Kappaphycus alvarezii*. *Molecular Marine Biology and Biotechnology*. 7:97-104.
- Jain A.K., Gupta V.K., Bhatnagar A. and Suhas I.A., 2003. Utilization of industrial waste products as adsorbents for the removal of dyes, *J. Hazard. Mater. B* 101, 31–42.
- 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 Donmez., 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 of a dye solution by Macroalgae *Chara sp.*: Effect of operational parameters, intermediates identification and artificial neural network modeling.” *Bioresource Technology*. 101 : 2252-2258.
- Khattri S.D. and Singh M.K., 1999. Colour removal from dye wastewater using sugar cane dust as an adsorbent, *Adsorp. Sci. Technol.* 17, 269–282

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Kumar, K.V., Ramamurthi, V., and Sivanesan, S. 2006. "Biosorption of malachite green, a cationic dye onto *Pithophora* sp., a fresh water algae." **Dyes and Pigments**. 69 : 102-107.
- Kumar, K.V., Sivanesan, S., Ramamurthi, V., 2006. Adsorption of malachite green onto *Pithophora* sp., a fresh water algae: Equilibrium and kinetic modelling. *Process Biochemistry* 40, 2865-2872.
- Larkum, A. W.D., Douglas, S.E. and Raven, J.A. 2003 . **Photosynthesis in Algae**. Kluwer Academic Publishers. London. 479 p.
- Ledin, M. 2000. "Accumulation of metals by microorganisms-processes and importance for soil systems." **Earth-Science Reviews**. 51: 1-31.
- Lee, Y.K. 2001. Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential. *Journal of Applied Phycology*. 13:307-315.
- 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.
- Matheickal, J.T., Yu, Q. and Woodburn, G.M. 1999. Biosorption of cadmium(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine alga *Durvillaea potatorum*. *Water Research*. 33:335-342.
- McKay G., El-Geundi M. and Nassar M.M., 2003. Equilibrium studies during the removal of dyestuffs from aqueous solutions using bagasse pith. *Water Res.* 21, 1513-1520.
- McKay G., Porter J.F. and Prasad G.R., 1999. The removal of dye colours from aqueous solutions by adsorption on low-cost materials, *Water, Air, Soil Pollut.* 114, 423-438.
- 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., Tripathy, M. 1993. A Critical review of the treatment for decolorization of textile effluent. *Colourage*. 40, 35-38.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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.
- Ozer, A., Akkaya, G.n.l., Turabik, M., 2005. Biosorption of Acid Red 274 (AR 274) on *Enteromorpha prolifera* in a batch system. **Journal of Hazardous Materials** 126, 119-127.
- Ozer, A., Akkaya, G.n.l., Turabik, M., 2006a. Biosorption of Acid Blue 290 (AB 290) and Acid Blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*. **Journal of Hazardous Materials** 135, 355-364.
- Ozer, A., Akkaya, G.n.l., Turabik, M., 2006b. The removal of Acid Red 274 from wastewater: Combined biosorption and biocoagulation with *Spirogyra rhizopus*. **Dyes and Pigments** 71, 83-89.
- Padmesh, T.V.N., Vijayaraghavan, K., Sekaran, G., Velan, M., 2005. Batch and column studies on biosorption of acid dyes on fresh water macro alga *Azolla filiculoides*. **Journal of Hazardous Materials** 125, 121-129.
- Pandey, A., Singh, P., Lyengar, L., 2007. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. **International Biodeterioration and Biodegradation** 59, 73-84.
- Percival, E. and McDowell, R.H. 1967. **Chemistry and Enzymology of Marine Algal Polysaccharides**. Academic Press, London.
- Punjongharn, P., Meevasana, K. and Pavasant, P. 2008. "Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste : dried Seagrass (*Caulerpa lentilifera*)."
Journal of Environmental sciences. 20 : 760-768.
- Robinson T., McMullan G., Marchant R. and Nigam P., 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposal alternative, **Bioresource Technol.** 77. 247-255.
- Rothstein, A. 1959. Cell membrane as a site of action of heavy metals. **Proceeding of American Society Experimental Biology**. 18:1026-1038.
- Sadettin, S. and Donmez, G. 2007. "Simultaneous bioaccumulation of reactive dye and chromium (VI) by using thermophil *Phormidium* sp." **Enzyme and Microbial Technology**. 41 : 175-180.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Scherer, C., Wiltshire, K., Bickmeyer, U., 2008. Inhibition of multidrug resistance transporters in the diatom *Thalassiosira rotula* facilitates dye staining. *Plant Physiology and Biochemistry* 46, 100-103.
- 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 : Trickling Filter, [Online]. Available URL: [http:// www.lbcc.cc.or.us/process2](http://www.lbcc.cc.or.us/process2) .
- Shawabkeha, R.A. and Tutunjib, M.F. 2003. "Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay." *Applied Clay Science*. 24 : 111-120.
- Sponza, D.T., 2006. Toxicity studies in a chemical dye production industry in Turkey. *Journal of Hazardous Materials* 138, 438-447.
- 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.
- Van-Hille, R.P., Boshoff, G.A., Rose, P.D. and Duncan, J.R. 1999. A continuous process for the biological treatment of heavy metal contaminated acid mine water. *Resources Conservation and Recycling*. 27:157-167.
- Vasanth Kumar, K., Ramamurthi, V., Sivanesan, S., 2006. Biosorption of malachite green, a cationic dye onto *Pithophora* sp., a fresh water algae. *Dyes and Pigments* 69, 102-107.
- Venkata Mohan, S., Chandrasekhar Rao, N., Krishna Prasad, K., Karthikeyan, J., 2002. Treatment of simulated Reactive Yellow 22 (Azo) dye effluents using *Spirogyra* species. *Waste Management* 22, 575-582.
- 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.
- Vilar, V.J.P., Botelho, C.M.S., Boaventura, R.A.R., 2007. Methylene blue adsorption by algal biomass based materials: Biosorbents characterization and process behaviour. *Journal of Hazardous Materials* 147. 120-132.
- Volesky, B. 1990a. *Biosorption of Heavy Metals*. CRC Press, Boston.
- website : <http://europa.eu.int/comm/enterprise/chemicals>
- Wilde, E.W. and Benemann, J.R. 1993. "Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae." *Biotechnology Advance*. 11 : 781-812.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) .พิมพ์ ครั้งที่ 1 .
กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- 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>
- ภาวิ ศรีกุลกิจ. 2542. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ
ติดสียรีแอคทีฟ (reactive dyes). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จันทิมา ชั่งสิริพร ณรงค์พล ทองสังข์ วุฒิกโร วงษ์มะขูรา และจรรยา อินทมณี. 2552. “การกำจัด
CODและสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน”. ในการประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จันทิมา ชั่งสิริพร .2552 .การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษโดยใช้ปฏิกิริยาเฟน
ตันร่วมกับการตกจม.ระหว่างดำเนินการวิจัย .
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. 2539. “เรื่อง กำหนดมาตรฐาน
ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม
อุตสาหกรรม” .**ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 13 ตอนที่ 11313** กุมภาพันธ์ 2539
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8. 2537. “เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใน
แหล่งน้ำผิวดิน” .**ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง** .24 กุมภาพันธ์ 2537
- ถัดดา วงศ์รัตน์. 2542. **แพลงก์ตอนพืช**. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สารต้องห้าม Malachite green .2552 เข้าถึงได้จาก . <http://www.nfi.or.th> “ Early Warning Report”
สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มปป. **การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม** . กรมโรงงาน
อุตสาหกรรม.
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์ .2549 .**การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายน โลบีพระจอมเกล้าสถาบันเทคโนโลยี** .
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้