

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**กลไกการกำจัดพิษและความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดย
สาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิต**

**LEAD (Pb) DETOXIFICATION MECHANISMS AND BIOREMOVAL
ABILITY OF LIVING MICROALGAE**



T117074



สงวน
เลขทะเบียน 117074
วันเดือนปี 23 ส.ย. 2554

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553
KMITL-2010-AG-M-101-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LEAD (Pb) DETOXIFICATION MECHANISMS AND BIOREMOVAL
ABILITY OF LIVING MICROALGAE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY
FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010**

KMITL-2010-AG-M-101-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กลไกการกำจัดพิษและความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิต
Lead (Pb) Detoxification Mechanisms and Bioremoval Ability of Living Microalgae
นักศึกษา นางสาวอติชา สพานกลาง
รหัสประจำตัว 51065804
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ลำแพน	ขวัญพุด	ลำแพน ขวัญพุด
รศ.ดร.ดวงรัตน์	อินทร	ดวงรัตน์ อินทร
ผศ.ดร.ปวีณา	ทวีกิจการ	ปวีณา ทวีกิจการ
ดร.มณฑล	แก่นมณี	มณฑล เก่นมณี
รศ.ดร.สุนีรัตน์	เรืองสมบูรณ์	สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

INSTITUTION: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 กันยายน 2553 เวลา 13.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม A209 (ชั้น 2 อาคารเจ้าคุณทหาร)

คณบดีรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ศักดิ์ชัย ชูโชติ)

คณบดีคณะเทคโนโลยีการเกษตร

วันที่ 14 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจก.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 22 เดือน ๑๐ พ.ศ. ๕๓

ลงชื่อ ประจักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกการกำจัดพิษและความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวอติยา สพานกลาง
รหัสประจำตัว	51065804
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์

บทคัดย่อ

การศึกษากลไกการกำจัดพิษและความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิต เพื่อหาสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงสาหร่ายที่สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด โดยผันแปรแสง ปริมาณสารอาหาร ปริมาณตะกั่วระดับพีเอชต่ำ โดยสาหร่ายขนาดเล็กที่ศึกษา ได้แก่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. พบว่า สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ การเลี้ยงสาหร่ายภายใต้การได้รับแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 12 ชั่วโมงต่อวัน หรือ ความเข้มข้นของสารอาหาร 50-100 เปอร์เซ็นต์ จากสูตรปกติ หรือเลี้ยงในอาหารที่มีการลดไนเตรทหรือฟอสเฟต 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการเลี้ยง 3-4 สัปดาห์ หรือเลี้ยงในอาหารระดับพีเอชต่ำที่มีตะกั่วไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อายุการเลี้ยงไม่เกิน 18 วัน จะทำให้สาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด โดย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโต ปริมาณโปรตีน และปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ สัมพันธ์กับความความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าระหว่าง 92.09 ± 2.44 - 119.17 ± 3.17 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง รองลงมา ได้แก่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. มีค่าการดูดซับตะกั่วระหว่าง 90.57 ± 2.94 - 102.01 ± 2.47 , 50.98 ± 1.49 - 63.43 ± 0.83 และ 38.69 ± 0.82 - 45.71 ± 0.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สาหร่ายขนาดเล็กที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำและโปรตีน สูงกว่าชุดควบคุม (ไม่มีตะกั่ว) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกของสาหร่ายขนาดเล็กในการลดพิษของตะกั่ว คือการเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำและโปรตีน นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ โปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์เพิ่มขึ้น

การบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต เป็นเวลา 14 วัน พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีการเจริญเติบโต และการดูดซับตะกั่วสูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 27.82 ± 0.31 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง การศึกษากลไกการกำจัดพิษของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella* sp. โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอะมิโน cysteine ใน *Chlorella* sp. ที่สัมผัสตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณกรดอะมิโน cysteine สูงที่สุดเท่ากับ 75.2 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่มีปริมาณกรดอะมิโน cysteine เท่ากับ 44.9 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

การศึกษาดังนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. สามารถบำบัดตะกั่วได้ดีและมีความสามารถในการลดพิษของตะกั่วได้จึงสามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบที่มีชีวิตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Lead (Pb) detoxification mechanisms and bioremoval ability of living microalgae
Student	Miss Atiya Saparnklang
Student ID	51065804
Degree	Master of Science
Program	Agricultural Biotechnology
Year	2010
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Dr. Suneerat Ruangsomboon

ABSTRACT

Lead (Pb) detoxification mechanisms and bioremoval ability of living microalgae cultured under various conditions were studied. Microalgae; *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. and *Chlorella* sp. were cultured under various light cycle, nutrient concentration, nitrogen (N) and phosphorus (P) limitation, and Pb contamination in media with low pH. Microalgae showed the maximum Pb removal ability when cultured under 12 h light and dark cycle, or 50-100 % nutrient concentration, or 50% N or P limitation for 3-4 weeks, or Pb contamination lower than 2 mg/l for 18 days. *Chlorella* sp. showed the highest Pb removal ability 92.09 ± 2.44 - 119.17 ± 3.17 mg/g dry wt., followed by *Phormidium* sp. (90.57 ± 2.94 - 102.01 ± 2.47 mg/g dry wt.), *Mastigocladopsis* sp. (50.98 ± 1.49 - 63.43 ± 0.83 mg/g dry wt.) and *Hapalosiphon* sp. (38.69 ± 0.82 - 45.71 ± 0.53 mg/g dry wt.). Microalgae cultured in media containing Pb had higher cellular polysaccharides, exocellular polysaccharides and protein than control (without Pb). This study indicated that detoxification mechanisms of microalgae on Pb appeared to increase their cellular polysaccharides, exocellular polysaccharides and protein. Moreover, Pb removal ability of microalgae were increased when protein and polysaccharide content were increased.

The ability of microalgae as living biosorbents to remove Pb from industrial wastewater was studied. Microalgae; *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. and *Chlorella* sp. were added in industrial wastewater, Pb removal ability and growth of microalgae were determined for 14 days. The growth and Pb removal ability of microalgae were increased when culture time was prolonged. *Chlorella* sp. showed the highest growth and Pb removal ability 27.82 ± 0.31 mg/g dry wt. Pb detoxification mechanism by means of an increment of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

amino acid, cysteine content of *Chlorella* sp. was studied. *Chlorella* sp. exposed to 5 mg/l Pb solution for 48 h has higher cysteine content (75.2 mg/g dry wt.) than control (44.9 mg/g dry wt.) which exposed to 0 mg/l Pb.

The ability to remove Pb and to grow under toxic conditions as demonstrated herein indicate that *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. and *Chlorella* sp. are promising living biomaterial for Pb removal in contaminated waters.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **IV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์
หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการทำวิจัยแก้ปัญหาขาดแคลนความรู้และ
ประสบการณ์ที่ดี รวมทั้งตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง
ในความกรุณาและขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.ลำแพน ขวัญพูล สาขาวิชาพืชสวน ผศ.ดร.ปวีณา ทวีกิจการ
และ ดร.มณฑล แก่นมณี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ รศ.ดร.ดวงรัตน์ อินทร ภาควิชาวิทยาศาสตร์
อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณา
สละเวลาตรวจสอบให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนส่วนหนึ่งจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพ
เกษตร สำนักพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการ
อุดมศึกษากระทรวงศึกษาธิการ (AG-BIO/PERDO-CHE) และทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ประจำปี
2553 จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนคำแนะนำ
จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
และหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและคำแนะนำต่างๆ ในการใช้อุปกรณ์
เครื่องมือต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หลักสูตรปริญญาโทที่กรุณาใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตรและ
หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ และสนับสนุนส่งเสริม
ด้านการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ซึ่งประโยชน์และคุณค่าของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอบ
แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนผู้ที่สามารถนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปได้

อภิชา สพานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญภาพ.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ตะกั่ว.....	5
2.1.1 แหล่งที่มาและพิษของตะกั่ว.....	5
2.1.2 อาการของโรคจากพิษของตะกั่ว.....	5
2.2 กลไกการทำงานของสารห่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตในการดูดซับ โลหะหนัก.....	6
2.3 ข้อดีของการใช้สารห่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตในการดูดซับ โลหะหนัก.....	6
2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	7
2.4.1 หมู่ฟังก์ชันที่ผิวตัวดูดซับ.....	7
2.4.2 ความเป็นกรด-ด่าง.....	7
2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	9
2.6 ผลของโลหะหนักต่อค่าการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ในสารห่ายขนาดเล็ก.....	10
2.7 ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสารห่ายที่มีชีวิต.....	12
2.8 กลไกการปรับตัวของสารห่ายขนาดเล็กในน้ำที่พีเอชต่ำ.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภา VI ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 กลไกการลดพิษจากโลหะหนักของเซลล์สาหร่าย.....	16
2.9.1 Phytochelatin.....	16
2.9.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของ phytochelatin.....	16
2.9.3 Phytochelatin ในสาหร่าย.....	17
2.9.4 หน้าที่ของ cysteine.....	18
2.10 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ.....	21
2.10.1 ผลของสภาวะการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์	21
2.10.2 ผลของสภาวะการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์	
และ โปรตีน.....	22
2.10.3 อายุสาหร่ายหรือระยะเวลาในการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อการดูด	
ซับ.....	26
2.11 การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก.....	30
3.2 สารเคมี.....	30
3.2.1 อาหารเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก.....	30
3.2.2 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ.....	30
3.2.3 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณ โปรตีน.....	30
3.2.4 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์.....	30
3.2.5 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณตะกั่ว.....	31
3.2.6 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาคุณภาพน้ำ.....	31
3.3 อุปกรณ์.....	31
3.4 สถานที่ทำการวิจัย.....	32
3.5 วิธีการศึกษา.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 ศึกษาหาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อให้สาหร่ายมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด.....	32
3.5.2 ศึกษาความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต.....	35
3.5.3 ศึกษากลไกการลดพิษของตะกั่วโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ กรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็กในสภาวะที่มีตะกั่ว ปนเปื้อน.....	36
3.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	36
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลของสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อให้ สาหร่ายมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด.....	37
4.1.1 ผลของความสามารถในการเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ). 4.1.1.1 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	37
4.1.1.2 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้ความ เข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	41
4.1.1.3 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยง โดยที่มีการลด ปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	47
4.1.1.4 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	55
4.1.2 ผลของปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน.....	62
4.1.2.1 ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้น ของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	62
4.1.2.2 ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะที่มีความเข้มข้นของ สารอาหารที่แตกต่างกัน.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2.3 ปริมาณ โปรตีนของสาหร่ายที่มีการลดปริมาณไนเตรทและ ฟอสเฟต.....	68
4.1.2.4 ปริมาณ โปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	71
4.1.3 ผลของปริมาณคาร์โบไฮเดรท (พอลิแซ็กคาไรด์) ของสาหร่ายที่เลี้ยง ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน.....	76
4.1.3.1 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มี ความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	76
4.1.3.2 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มี ความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	80
4.1.3.3 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการ ลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	89
4.1.3.4 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มี ช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	99
4.1.4 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้ สภาวะที่แตกต่างกัน.....	107
4.1.4.1 การกำจัดตะกั่วโดยเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความ เข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	107
4.1.4.2 การกำจัดตะกั่วโดยเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความ เข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	110
4.1.4.3 การกำจัดตะกั่วโดยเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลด ปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	113
4.1.4.4 การดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะการได้รับ ช่วงเวลารับแสงแตกต่างกัน.....	117
4.2 ความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต.....	123
4.2.1 คุณภาพน้ำของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp., <i>Hapalosiphon</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp. ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับพีเอช 4.5.....	129
4.2.3 การดูดซับตะกั่วของสาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp., <i>Hapalosiphon</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp. ในน้ำเสีย.....	131
4.3 กลไกการลดพิษของตะกั่วโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอะมิโน cysteine ใน <i>Chlorella</i> sp.	136
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	143
บรรณานุกรม.....	144
ภาคผนวก ก.....	157
ภาคผนวก ข.....	158
ภาคผนวก ค.....	159
ภาคผนวก ง.....	159
ประวัติผู้เขียน.....	161

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันที่พบในสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่จับ โลหะหนัก.....	8
2.2 ปริมาณ CPS, EPS และปริมาณผลผลิตของสาหร่าย <i>G. gelatinosa</i> ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน.....	22
2.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและ โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ (EPS) ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด.....	23
2.4 ผลของไนโตรเจนที่มีจำกัดต่อองค์ประกอบของธาตุของ <i>Oocytis polymorpha</i> และ <i>Chlorella sorokiniana</i> ในการการเลี้ยงแบบต่อเนื่อง.....	26
2.5 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (q_{eq}) โดย <i>Calothrix marchica</i> ที่อายุแตกต่างกัน... 27	
4.1 ค่าการดูดซับ (q) ของสาหร่ายที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันและที่พีเอชต่ำ (4.5).....	108
4.2 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	110
4.3 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	111
4.4 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	112
4.5 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	112
4.6 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	114
4.7 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	115
4.8 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกัน ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	116
4.9 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ XI เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	118
4.11 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	118
4.12 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	119
4.13 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	119
4.14 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp. และ <i>Hapalosiphon</i> sp.	124
4.15 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	124
4.16 ปริมาณไนไตรท์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp. และ <i>Hapalosiphon</i> sp.	125
4.17 ปริมาณไนไตรท์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.....	125
4.18 ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp. และ <i>Hapalosiphon</i> sp.	126
4.19 ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	126
4.20 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp. และ <i>Hapalosiphon</i> sp.	127
4.21 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	127
4.22 ค่า BOD (Biological oxygen demand) (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp. และ <i>Hapalosiphon</i> sp.	128
4.23 ค่า BOD (Biological oxygen demand) (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	128
4.24 น้ำหนักเปียก (กรัม) ของ <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp., <i>Hapalosiphon</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp. ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายในน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรม.....	133



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ค่า pH ของสารละลายต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของตะกั่วในน้ำ...	9
2.2 ผลของระยะเวลาต่อค่าประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงที่ PII (Fv/Fm) ของ <i>Microcystis aeruginosa</i> ที่สัมผัสแคดเมียมที่เข้มข้นแตกต่างกันเป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....	11
2.3 ผลของปรอทที่เข้มข้นแตกต่างกันต่อค่าผลผลิตจากการเรืองแสงที่น้อยที่สุด (F0), ผลผลิตที่มากที่สุด (Fm) และ ค่าประสิทธิภาพของการเรืองแสงสูงสุดที่ PII (Fv/Fm) ของ <i>Spirulina platensis</i> ที่ได้รับความเข้มแสง 50 ไมโครโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	11
2.4 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ระหว่างการเจริญเติบโตของ <i>Gloeocapsa</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของตะกั่วที่แตกต่างกัน.....	13
2.5 การเจริญเติบโตของ <i>Spirulina</i> ในสารละลายที่มีตะกั่ว ในแต่ละความเข้มข้น.....	13
2.6 ผลของตะกั่ว (Pb(NO ₃) ₂) ต่อการเจริญเติบโตของ <i>Spirulina platensis</i> วัดในวันที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 (set1-set 6) และในแต่ละความเข้มข้น (แผนภูมิแท่งจากซ้ายไปขวา) 0.5, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ.....	14
2.7 รูปแบบของกลไกในการทนต่อความเป็นกรดและความเป็นพิษของโลหะหนักในสาหร่าย (<i>Chlorella vulgaris</i>).....	15
2.8 โครงสร้างทั่วไปของ phytochelatin.....	17
2.9 การสังเคราะห์ทางชีวภาพของ phytochelatin.....	18
2.10 การจับตัวของ phytochelatin (PCs) กับ แคดเมียม (Cd ²⁺) จับกันกับอะตอมของซัลเฟอร์ (S) ได้ตั้งแต่ 1, 2, 3 หรือสูงสุดคือ 4 อะตอมจาก PCs โมเลกุลเดียว หรือหลายโมเลกุลก็ได้ ทำให้เกิดเป็น โครงสร้างที่ซับซ้อนรูปร่างไม่แน่นอน.....	19
2.11 ปริมาณกรดอะมิโน cysteine ของ <i>Scenedesmus acutus</i> ภายใต้การสัมผัสแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 0 ถึง 27 ไมโครโมล ภาพซ้ายเป็นสาพันธ์ทั่วไป และภาพขวาเป็นสาพันธ์ที่ต้านทาน โครเมียม.....	20
2.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแถบของ Carbo/Aminide ของไซยาโนแบคทีเรีย (A) <i>Microcystis aeruginosa</i> , (B) <i>Croococcus minutes</i> และ (C) <i>Nostoc</i> sp. เส้นตามขวางคือการกลับคืนสู่สภาพเดิมจากสภาวะขาด N และ P.....	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.13 องค์ประกอบทางชีวเคมี ของ <i>S. platensis</i> และ <i>S. fusiformis</i> ในสภาวะที่เหมาะสม ค่าเฉลี่ยของ 3 ซ้ำ sp= <i>S. platensis</i> , sf= <i>S. fusiformis</i> , CHD=คาร์โบไฮเดรต.....	25
4.1 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp., <i>Hapalosiphon</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของตะกั่วแตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	38
4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp., <i>Mastigocladopsis</i> sp., <i>Hapalosiphon</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของตะกั่วแตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	39
4.3 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	42
4.4 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	43
4.5 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	43
4.6 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	44
4.7 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	45
4.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	45
4.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	46
4.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	46
4.11 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	49
4.12 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **XV** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	50
4.14 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	50
4.15 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	51
4.16 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	52
4.17 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	52
4.18 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	53
4.19 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	56
4.20 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	56
4.21 ปริมาณน้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	57
4.22 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	57
4.23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	58
4.24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	58
4.25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.26 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	59
4.27 ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชค่า (4.5).....	63
4.28 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	65
4.29 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	66
4.30 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	66
4.31 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	67
4.32 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	69
4.33 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	69
4.34 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	70
4.35 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	70
4.36 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	72
4.37 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	73
4.38 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	73

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.39 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	74
4.40 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	77
4.41 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	78
4.42 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5).....	78
4.43 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	82
4.44 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	82
4.45 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	83
4.46 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	83
4.47 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	84
4.48 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน	84
4.49 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	85
4.50 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	85
4.51 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	86

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.52 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	86
4.53 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	87
4.54 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.....	87
4.55 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	91
4.56 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	92
4.57 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	92
4.58 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	93
4.59 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	93
4.60 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	94
4.61 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	94
4.62 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	95
4.63 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	95
4.64 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	96

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.65 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	96
4.66 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต.....	97
4.67 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	100
4.68 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	100
4.69 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Phormidium</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	101
4.70 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	101
4.71 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	102
4.72 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Mastigocladopsis</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	102
4.73 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	103
4.74 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	103
4.75 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Hapalosiphon</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	104
4.76 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	104
4.77 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการ ได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.78 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ <i>Chlorella</i> sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน.....	105
4.79 ค่าพีเอชของสาหร่ายในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 14 วัน.....	130



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการเพิ่มการผลิตทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ตะกั่วเป็นวัตถุพิษที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เครื่องใช้ไฟฟ้า หม้อน้ำรถยนต์ อุตสาหกรรมตะกั่วบัดกรี หมึกพิมพ์ ท่อน้ำ กระสุนปืน โรงงานผลิตสี สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น จึงมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำและมีแนวโน้มปริมาณมากขึ้น

ปัญหาการปนเปื้อนของตะกั่วในแหล่งน้ำ อาหาร อากาศ ทำให้มีอันตรายต่อมนุษย์ตามมา โดยมีรายงานสารตะกั่วสะสมอยู่ในเลือดของผู้หญิงมากกว่า 8 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร และร้อยละ 59 มีโอกาสเสียชีวิต (จริญญา กิตติกันต์, 2552) เด็กเล็กใน Philadelphia กว่าร้อยละ 70 มีปริมาณตะกั่วในร่างกายมากเกินกำหนด เด็กเหล่านี้มีร่างกายเจริญเติบโตไม่เต็มที่ มีสติปัญญาต่ำ มีการทรงตัว และพัฒนาการทางร่างกายช้ากว่าปกติ (สุทัศน์ ยกส้าน, 2551) สำหรับประเทศไทยมีรายงานโรคพิษตะกั่วครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2495 และมีแนวโน้มจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้น (ณรงค์ศักดิ์ อังคะสุวพลา, 2540) นอกจากนี้เด็กไทยมีความเสี่ยงรับสารตะกั่วที่ ปนเปื้อนมากับอาหารและน้ำดื่ม ขณะที่ร่างกายเด็กดูดซึมสารพิษได้มากกว่าผู้ใหญ่ 5-10 เท่า แม้รับสารปริมาณต่ำก็ทำลายสมองและประสาท ทำให้มีพัฒนาการช้าและถดถอย สมารถสิ้น อาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาและพฤติกรรม (นัยนา ณีศะนันท์, 2553) ดังนั้นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และสำหรับมาตรฐานตะกั่วในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Friberb *et al.* 1992) ตะกั่วจึงเป็นปัญหามลภาวะทางน้ำที่สำคัญ เพราะตะกั่วมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และที่สำคัญคือตะกั่วไม่สามารถทำให้สลายไปจากแหล่งน้ำได้ โดยตะกั่วนี้จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารทางแหล่งน้ำ และทำให้มนุษย์ผู้บริโภคสัตว์น้ำ หรือใช้น้ำจากแหล่งนั้นโดยตรงได้รับพิษของตะกั่ว (Volesky, 1990) จึงควรมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่น้ำทิ้ง

ในอดีตนิยมกำจัดตะกั่วด้วยวิธี physico-chemical techniques เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแผ่นเรซิน การใช้คาร์บอนกัมมันต์ดูดซับ ซึ่งมีราคาสูง และไม่เหมาะสมถ้าน้ำเสียมีสารอินทรีย์ปนเปื้อน ซึ่งพบว่าวิธีที่เหมาะสมกว่าคือการใช้วิธีดูดซับชีวภาพ (Biosorption) หรือการใช้สิ่งมีชีวิตในการกำจัดตะกั่ว ซึ่งสาหร่ายเป็นกลุ่มสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เพราะมีมากมายในธรรมชาติ การใช้สาหร่ายกำจัดตะกั่วเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูง ราคาต่ำ โดยในอดีตนิยมใช้สาหร่ายที่ตายแล้ว (dead biomass) แต่พบว่ามีปัญหาคือ

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเซลล์ที่ไม่มีชีวิตไปใช้ในน้ำเสียจริงประสิทธิภาพจะลดลง เนื่องจากมีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำ (Malik, 2004) เพราะไม่สามารถลดสารโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารเหล่านี้ยังแย่งจับกับประจุที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้ การใช้สาหร่ายมีชีวิตในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสามารถแก้ปัญหานี้ได้เนื่องจากสาหร่ายใช้สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสียในการเจริญเติบโต ดังนั้นวิธีบำบัดตะกั่วจากน้ำเสียที่น่าจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการใช้เซลล์สาหร่ายที่มีชีวิต เพราะสามารถกำจัดสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ออกจากน้ำเสียไปพร้อม ๆ กัน และยังมีรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดใช้ในการกำจัดตะกั่ว เช่น *Phormidium sp.*, *Calothrix machica*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Gloeocapsa gelatinosa* และ *Chlorella vulgaris* เป็นต้น (Wang 1998; Ruangsomboon *et al.* 2006a; Tuzun *et al.* 2005; Ruangsomboon *et al.* 2006b; สุณีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2547)

ตะกั่วจะแตกตัวอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถดูดซับได้ ที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 4.5 ซึ่งข้อจำกัดของการที่จะใช้เซลล์ที่มีชีวิตกำจัดตะกั่วคือเซลล์ที่มีชีวิตจะไม่สามารถทนต่อพีเอชที่ต่ำหรือความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูงมากเกินไปได้ ดังนั้นการที่จะแก้ไขปัญหานี้ได้คือต้องหาชนิดของสิ่งมีชีวิตที่สามารถเจริญเติบโตได้ที่พีเอชต่ำ ทนโลหะหนักได้ในความเข้มข้นค่อนข้างสูง ซึ่งสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดมีความสามารถในการทนต่อพีเอชที่ต่ำ เช่น *Gloeocapsa gelatinosa* สามารถเจริญเติบโตได้ในอาหารที่มีพีเอชเท่ากับ 4 (Ruangsomboon *et al.* 2006b) และมีรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Chlorella* มีกลไกในการทนต่อสารละลายที่เป็นกรดได้ (Erten-Unal and Wixson, 1998) และทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้เพราะมีกลไกการลดพิษของโลหะหนักภายในเซลล์ (McLean and Williamson, 1977) โดยสาหร่ายมีกลไกการปกป้องตัวเองจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นพิษโดยการสร้าง phytochelatin ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีกรดอะมิโน cysteine เป็นองค์ประกอบและทำหน้าที่หลักในการป้องกันพิษของโลหะหนักภายในเซลล์ ทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตอยู่ได้ในภาวะไม่เหมาะสม

ดังนั้นการศึกษารุ่นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาชนิดสาหร่ายที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสารละลายที่มีพีเอชต่ำ มีตะกั่วปนเปื้อน และมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงรวมถึงศึกษากลไกในการปรับตัวให้ลดพิษของตะกั่ว เพื่อหาทางนำสาหร่ายเหล่านี้ไปใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมด้านแสง, ปริมาณสารอาหาร และปริมาณตะกั่วที่พีเอชต่ำ ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อให้สาหร่ายสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด

1.2.2 ศึกษาความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต

1.2.3 ศึกษากลไกของสาหร่ายในการปรับตัวให้ลดพิษของตะกั่วโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายภายใต้ห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ผันแปรสภาวะที่ต้องการศึกษาเท่านั้น เช่น แสง, อุณหภูมิ และสารอาหาร เป็นต้น ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยการนำเซลล์สาหร่ายภายใต้สภาวะการเลี้ยงต่างๆ โดยทดลองการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้ห้องปฏิบัติการและควบคุมปัจจัยอื่นๆ สำหรับน้ำเสียจริงโดยเก็บน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมและนำมาทดลองภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้เซลล์สาหร่ายที่เหมาะสมลงไปและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ การเจริญเติบโต และวิเคราะห์ตะกั่วในน้ำเสีย และการศึกษากลไกการลดพิษ โดยใช้ปริมาณกรดอะมิโน cysteine โดยทำการเลี้ยงสาหร่ายภายนอกอาคารด้วยแสงธรรมชาติ และนำมาสัมผัสตะกั่วเพื่อวิเคราะห์กรดอะมิโน cysteine และมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ และบันทึกผลข้อมูลเชิงปริมาณ

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งสิ้น 1 ปี 6 เดือน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบสภาวะแวดล้อมคือ แสง, ปริมาณสารอาหาร และปริมาณตะกั่วที่พีเอชต่ำ ที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อให้สาหร่ายสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุดในระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบที่มีชีวิต

1.5.2 สามารถนำสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนจาก โรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิตได้ และทราบแนวทางในการกำหนดสภาวะการเลี้ยงสาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบที่มีชีวิต

1.5.3 ทราบกลไกการลดพิษของตะกั่วในสาหร่าย โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอะมิโน cysteine และสามารถใช้ปริมาณกรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็กเป็นดัชนีประเมินมลภาวะจากโลหะหนักในแหล่งน้ำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว (Lead)

2.1.1 แหล่งที่มาและพิษของตะกั่ว

ตะกั่ว เป็นโลหะหนักที่มีพิษ เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ ในโลก แต่การกระจายของตะกั่วในดินกว้างขวางทั่วโลก เพราะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบในการผลิตมากมาย ดังนั้นตะกั่วที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในแต่ละปีจึงมีจำนวนมาก และมีปริมาณตะกั่วที่รั่วไหลออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในน้ำและอากาศ จากขบวนการถลุงแร่ตะกั่ว และขบวนการผลิตที่ใช้ตะกั่ว น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตวัสดุเหล่านี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ โดยน้ำเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพเช่นกัน ในชีวิตประจำวันคนเรามีความเสี่ยงต่อการนำตะกั่วเข้าสู่ร่างกายผ่านทางกรบริโภคอาหารหรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานที่ขาดจิตสำนึกกำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี (สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549) ดังนั้นรัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 วันที่ 14 มิถุนายน 2539 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนตะกั่วไม่เกินกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับมาตรฐานตะกั่วในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Friberb *et al.* 1992)

2.1.2 อาการของโรคจากพิษของตะกั่ว

ในระบบประสาทส่วนกลางและสมอง อาการสำคัญที่พบ คือ สมองเสื่อมจากพิษตะกั่ว พบในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ รายที่เป็นรุนแรงอาจมีอาการ ชัก หมดสติ และเสียชีวิตได้ ระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อ พบมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่างๆ อ่อนแรง หรืออัมพาต ระบบทางเดินอาหาร เป็นอาการที่พบได้บ่อยที่สุด ผู้ป่วยมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ น้ำหนักลด มีอาการปวดท้องมาก ระบบเลือด มักพบมีอาการซีด ทำให้เป็นโรคเลือดจาง ระบบทางเดินปัสสาวะ ผู้ป่วยที่ได้รับตะกั่วเป็นเวลานานๆ อาจเกิดภาวะไตวายเรื้อรัง ระบบโครงสร้าง ตะกั่วจะไปสะสมที่กระดูก ระบบสืบพันธุ์ ผู้ได้รับตะกั่วติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจเป็นหมันได้ทั้งชายและหญิง และระบบอื่นทำให้เกิดความผิดปกติในการทำงานของต่อมไทรอยด์ และการผิดปกติของดีเอ็นเอ (สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549)

2.2 กลไกการทำงานของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนัก

สาหร่ายขนาดเล็กมีกลไกการกำจัดโลหะหนัก 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์เกิดอย่างรวดเร็ว (adsorption) และตามด้วยขั้นตอนที่สอง คือดูดซับโลหะหนักอย่างช้าๆ นำเข้าเซลล์ (absorption/uptake) ซึ่งขั้นตอนหลังนี้เกิดขึ้นได้ในเซลล์สาหร่ายที่ยังมีชีวิตเท่านั้น (Stumm and Morgan, 1996) และการดูดซับเข้าเซลล์พบว่ามี 2 แบบ คือ 1) โลหะหนักสามารถถูกจับเข้าไปไว้ภายในเซลล์ของบริเวณ binding site ซึ่งขบวนการนี้ไม่ขึ้นกับขบวนการเมตาบอลิซึมของสาหร่าย จะเป็นการแพร่ผ่านของโลหะหนักเข้าไป เนื่องจากภายนอกเซลล์มีโลหะเข้มข้นมากกว่าในเซลล์ (passive transport) 2) อีกวิธีหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการนำโลหะหนักเข้าเซลล์โดยใช้พลังงาน (active uptake) ซึ่งขึ้นกับขบวนการทำงานของเซลล์ (Domez *et al.* 1999) โดยนำโลหะหนักผ่านผนังเซลล์เข้าไป และโลหะหนักเหล่านี้จะสะสมภายในเซลล์สาหร่ายในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์

ผนังเซลล์ของสาหร่ายเป็นส่วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่ผนังเซลล์มีประจุเป็นลบ จึงเกิดการดูดซับกับไอออนของโลหะหนักอื่นๆ ได้ ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่ผนังเซลล์ชั้นนอกมี lipopolysaccharide ประกอบอยู่ จะทำให้ผนังเซลล์มีค่าประจุลบได้มากขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถจับโลหะหนักหรือกำจัดโลหะหนักได้ดี เพราะไอออนของโลหะหนักมักมีเป็นประจุบวก นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตหรือสาหร่ายที่เป็นเมือกวุ้น (mucilage, gelatinous sheath) หุ้มเซลล์จะมีการจับโลหะหนักต่างๆ ได้ดีมากขึ้นเพราะในเมือกเหล่านี้มีประจุลบ เมื่อสารละลายต่างๆ สัมผัสกับผนังเซลล์สาหร่ายหรือเมือกวุ้นสาหร่ายจะสามารถสะสมไอออนของโลหะต่างๆ จากน้ำไว้ที่ผิวเซลล์โดยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ที่ผนังเซลล์สาหร่ายเกิดจากการทำงานของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) โดยหมู่หลักที่ทำหน้าที่จับโลหะหนักคือหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ผนังเซลล์ (Volesky, 1990) หรือใช้ประจุลบที่พบที่เมือกหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็น โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) เป็นตัวจับโลหะหนัก ซึ่งกลุ่มหลักๆ ในโพลีแซคคาไรด์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนคือกลุ่ม COOH (Percival and McDowell, 1967), SO_4^{2-} , $-\text{NH}_2$, OH^- และ $-\text{SH}$ (Eccles, 1999)

2.3 ข้อดีของการใช้สาหร่ายขนาดเล็กที่มีชีวิต (living/growing cell) ในการดูดซับ

โลหะหนัก

การกำจัดโลหะหนักแบบระบบที่มีชีวิต (living system) คือการใช้สาหร่ายที่ยังคงมีชีวิตอยู่ในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งเป็นเซลล์สาหร่ายที่ยังคงมีขบวนการการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ อยู่อย่างปกติ โดยใช้ในรูปแบบของ growing cell คือให้เซลล์สาหร่ายนั้นเจริญเติบโตอยู่ในระบบบำบัดและนิยมใช้บำบัดในขั้นตอนที่สาม หรือ tertiary treatment ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่มีโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นไม่สูง แต่อยู่ในปริมาณน้ำที่มีปริมาณมาก ซึ่งเซลล์ที่มีชีวิตมีการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่า สาหร่ายไม่มีชีวิต นั่นคือมีขั้นตอนการนำโลหะหนักเข้าภายในเซลล์ (Matsunaga *et al.* 1999; Perez-Rama *et al.* 2002)

การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการกำจัดโลหะหนักนั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตในระบบบำบัดน้ำเสียได้ด้วยการเติมแร่ธาตุอาหารเพียงเล็กน้อย และใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน (Wong *et al.* 2000) ซึ่งจุดนี้จึงทำให้มีประโยชน์ในการนำไปใช้จริงเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ยิ่งไปกว่านั้นโดยทั่วไปน้ำเสียส่วนใหญ่มักมีสารอินทรีย์ อนินทรีย์ หรือแร่ธาตุอื่น ๆ ปนเปื้อนมาด้วย ซึ่งยิ่งทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตและกำจัดโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น เพราะใช้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ในระบบที่มีชีวิตจะมีการเจริญเติบโต สร้างเซลล์สาหร่ายใหม่ขึ้นตลอด ซึ่งทำให้ระบบมีตัวบำบัดใหม่อยู่ตลอดเวลาเช่นกัน จึงทำให้บำบัดน้ำเสียได้ต่อเนื่องตลอดเวลา นอกจากนี้สาหร่ายเหล่านี้สามารถทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเป็นเวลานาน เพราะสาหร่ายมีการปรับตัว (Wilde and Benemann, 1993) และหากน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ไม่มีสารอาหารสำหรับสาหร่ายก็สามารถเติมสารอาหารบางส่วนลงไปเพื่อให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้

2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.4.1. หมู่ฟังก์ชันที่ผิวตัวดูดซับ

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ เช่นหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH) คาร์บอนิล (CO) หมู่อะมิโน (NH₂) และหมู่ซัลเฟต (SO₃) ซึ่งจะเป็นประจุลบในสารละลาย สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักที่เป็นประจุบวกได้ (สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ์, 2549)

2.4.2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลุ่มประจุบวกสอง (divalency ion) เช่น ตะกั่วในแหล่งน้ำสามารถปรากฏอยู่ในรูปไอออนอิสระ Pb²⁺ ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำ หรือปรากฏในรูปการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ Pb(OH)₂ หรือรวมตัวกับเกลือต่างๆที่อยู่ในน้ำ Pb(NO₃)₂, Pb(CO₃)₂ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Schuthess and Huang, 1990) (ภาพที่ 2.1) ดังนั้นค่า pH ของสารละลายจึงมีผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์ตัวดูดซับด้วย แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันจะมีความสามารถและมีสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้น ตัวอย่างค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันที่พบในสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก (Schiewer and Volesky, 2000) (ตารางที่ 2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

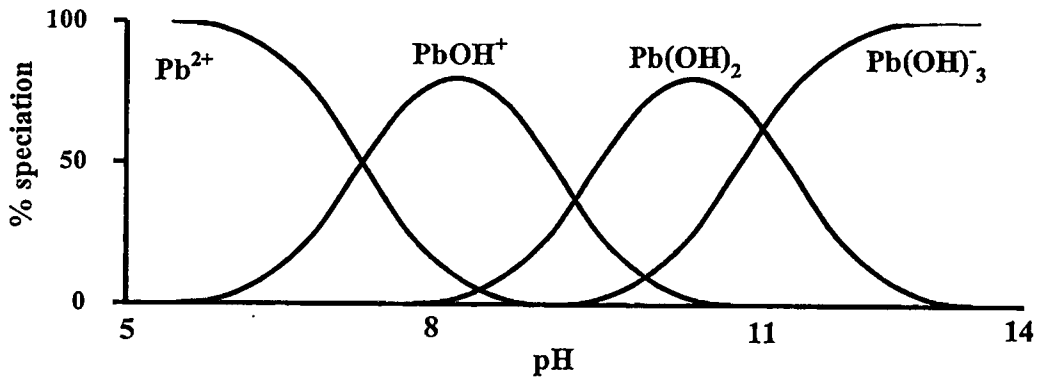
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันที่พบในสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก

หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง	pKa	Ligand atom	ตำแหน่งที่พบ
hydroxyl	-OH	9.5-13	O	PS, UA, SPS, AA,
carbonyl (ketone)	>C=O		O	Peptide bond
carboxyl	$\begin{array}{c} \text{-C=O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	1.7-4.7	O	UA, AA
sulfhydryl (thiol)	-SH	8.3-10.8	S	AA
thioether	>S		S	AA
sulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-S-O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	1.3	O	SPS
amine	-NH ₂	8-11	N	Cto, AA
secondary amine	>NH	13	N	Cti, PG, peptide bond
imine	=NH	11.6-12.6	N	AA
amide	$\begin{array}{c} \text{-C=O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$		N	AA
imidazole	$\begin{array}{c} \text{-C-N-H} \\ \quad \diagdown \\ \text{H-C-N} \quad \text{CH} \\ \quad \quad \quad \\ \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$	6.0	N	AA
phosphonate	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{-P=O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	0.9-2.1	O	PL
phosphodiester	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{-P=O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	6.1-6.8		
	>P=O	1.5	O	TA, LPS

PS = polysaccharide, UA= uronic acids, SPS= sulfated, Cto=chitosan, Cti=chitin, PG=peptidoglycan, AA=amino acids (e.g. in proteins and PG), TA=teichoic acid, PL= phospholipids, LPS=lipopolysaccharides.

ที่มา: Schiewer and Volesky (2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 ค่า pH ของสารละลายต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของตะกั่วในน้ำ
ที่มา : คัดแปลงจาก Schuthess and Huang (1990)

2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สถานะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ เป็นการหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับโลหะหนักของสารห่วย การหาค่าไอโซเทอร์มการดูดซับทำโดยใช้สมการของ Langmuir หรือ Freundlich

โดยไอโซเทอร์มของ Langmuir มีลักษณะการดูดซับเป็น homogeneous surface คือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน

Langmuir adsorption isotherm มีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{Q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e}$$

สมการที่ 1

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a Q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m}$$

สมการที่ 2

โดย q_e คือปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สารห่วย (mg/g dry wt.), Q_m คือปริมาณโลหะหนักสูงสุด (maximum capacity) ที่สารห่วยสามารถดูดซับได้ (mg/g dry wt.), C_e คือความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l), K_a คือ ค่าคงที่ในการดูดซับโลหะหนักของสารห่วยซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (ความสัมพันธ์ของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกละลาย (L /mg)

ไอโซเทอร์มของ Freundlich มีลักษณะการดูดซับเป็น heterogeneous binding site พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งยึดจับที่ต่างชนิดกัน ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว

Freundlich adsorption isotherm มีสมการดังนี้

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

และเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็น

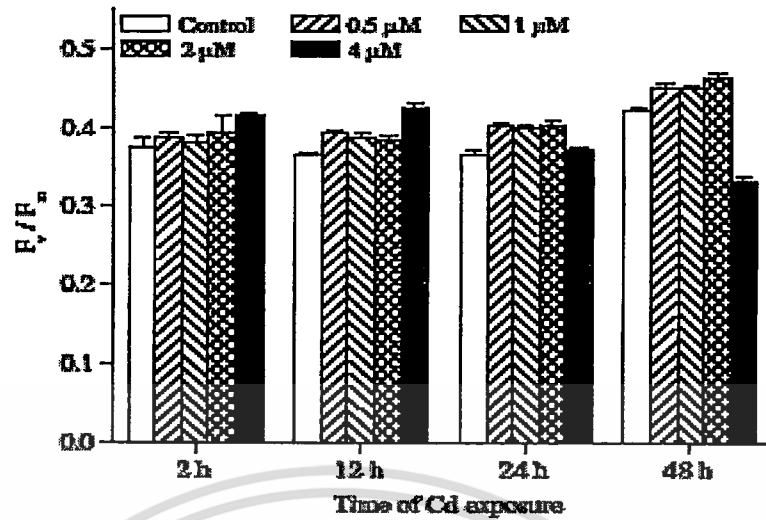
$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (mg/g dry wt.), C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l), K_F และ $1/n$ คือ ค่าคงที่, ค่า K_F เป็นดัชนีถึงความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) มีหน่วยเป็น mg/g และ n ความแรงในการดูดซับ (adsorption intensity) และไม่มีหน่วย

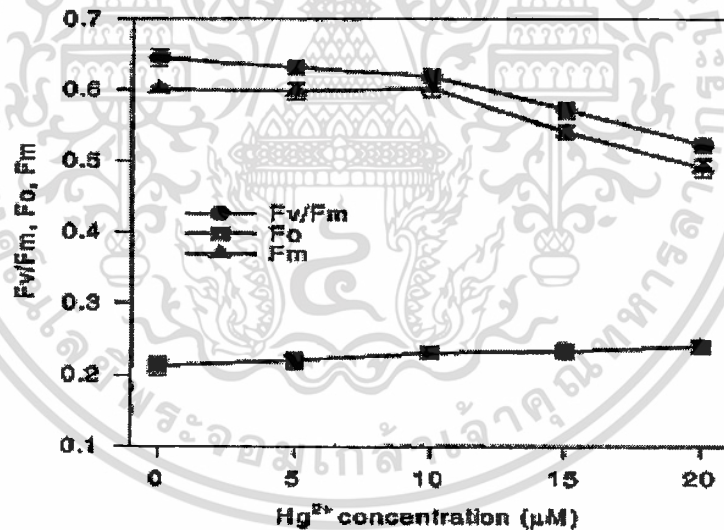
ความสำคัญของการเลือกใช้ไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายคือ ทำให้สามารถอธิบายสมดุลของสาหร่ายในระบบการกำจัดโลหะหนักได้ถูกต้อง

2.6 ผลของโลหะหนักต่อค่าการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll fluorescence) ในสาหร่ายขนาดเล็ก

การวิเคราะห์ chlorophyll fluorescence เป็นการทดสอบที่รวดเร็ว เพื่อกำหนดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยแสง (การสังเคราะห์แสง) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงทางสภาวะแวดล้อม เช่น สภาวะเครียดเนื่องจากโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว, ทองแดง, โครเมียม, นิกเกิล, แคดเมียม, ปรอท และ สังกะสี เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้จากค่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงสูงสุดที่ PSII (maximum PSII photochemical yield, Fv/Fm) (Lu *et al.* 2000) การศึกษาของ Zhou *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองใน *Microcystis aeruginosa* ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยง BG-11 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้รับแสง 40 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาทีและได้รับความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม (CdCl₂) เท่ากับ 0, 0.5, 1, 2 และ 4 μM เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนส์ (ภาพที่ 2.2) พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 4 μM จะมีค่า Fv/Fm ลดลงมากที่สุด (ลดลง 21 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม



ภาพที่ 2.2 ผลของระยะเวลาต่อค่าประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงที่ PII (F_v/F_m) ของ *Microcystis aeruginosa* ที่สัมผัสแคดเมียมที่เข้มข้นแตกต่างกันเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
ที่มา : Zhou et al. (2006)



ภาพที่ 2.3 ผลของปรอทที่เข้มข้นแตกต่างกันต่อค่าผลผลิตจากการเรืองแสงที่น้อยที่สุด (F_o), ผลผลิตที่มากที่สุด (F_m) และ ค่าประสิทธิภาพของการเรืองแสงสูงสุดที่ PII (F_v/F_m) ของ *Spirulina platensis* ที่ได้รับความเข้มแสง 50 ไมโคร โฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ที่มา : Lu et al. (2000)

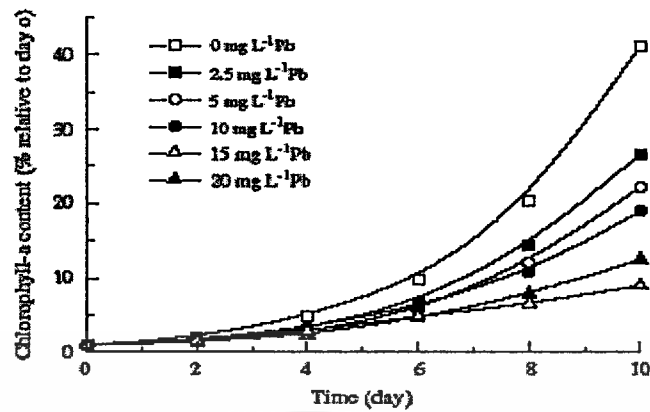
จากการศึกษาของ Lu et al. (2000) ได้ทดลองเลี้ยง *Spirulina platensis* ในอาหารเลี้ยง Zarouk's medium ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ได้รับแสงที่ 50 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตร ต่อวินาที และได้รับความเข้มข้นของปรอท ($HgCl_2$) ที่ 0, 5, 10, 15 และ 20 ไมโครโมล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ภาพที่ 2.3) พบว่า หลังจากเวลา 2 ชั่วโมงค่า Fv/Fm จะแสดงถึงการลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 20 ไมโครโมล จะลดลงมากที่สุด โดยลดลงถึง 15 เปอร์เซ็นต์ จากกลุ่มควบคุม

2.7 ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่ายที่มีชีวิต

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียโดยการใช้สาหร่ายที่เป็นแบบระบบที่มีชีวิต คือในระบบบำบัดต้องมีเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตและสามารถทำให้สาหร่ายเจริญเติบโต (growing cell) อยู่ในบ่อบำบัด แต่การใช้ living system หรือใช้ growing cell ในการดูดซับโลหะหนักมีข้อจำกัดคือ หากความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสียมักเกินไปจะเป็นพิษกับเซลล์ทำให้สาหร่ายตายได้ นอกจากนี้สาหร่ายยังต้องการธาตุอาหารในการเจริญเติบโตหากน้ำเสียไม่มีธาตุอาหารอยู่เลยสาหร่ายก็ตายได้ (Wong et al. 2000)

โลหะหนักที่ความเข้มข้นแตกต่างกันจะมีความเป็นพิษต่อสาหร่ายในระดับที่ต่างกัน สาหร่ายบางชนิดสามารถทนพิษโลหะหนักได้สูง แต่สาหร่ายบางชนิดทนได้ต่ำ และพิษของโลหะหนักแต่ละชนิดก็มีความรุนแรงหรือมีความเป็นพิษต่อสาหร่ายไม่เท่ากัน รวมทั้งผลของความเป็นพิษที่มีต่อสาหร่ายก็ส่งผลที่ต่างกัน ตัวอย่างความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่ายที่มีชีวิต เช่น สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus abundans* ที่ได้รับ แคดเมียมและคอปเปอร์ที่ระดับ 15-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Terry and Stone. 2002) กลุ่มไดอะตอมที่ได้รับ แคดเมียม 15 ไมโครกรัมต่อลิตร และสังกะสี 800 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีผลทำให้มีปริมาณไดอะตอมลดลง และองค์ประกอบชนิดของไดอะตอมเปลี่ยนแปลงไป (Gold et al. 2002) สาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella* ที่ได้รับสังกะสีที่ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้รูปร่างผิดปกติ และผนังเซลล์เปลี่ยนแปลงไป (Travieso et al. 1999) แต่อย่างไรก็ตาม ในการนำสาหร่ายที่มีชีวิตไปใช้กำจัดโลหะหนักที่มีพิษสูงนั้น จำเป็นต้องแน่ใจว่าเซลล์สาหร่ายสามารถคงความสามารถในการเจริญเติบโต และกำจัดโลหะหนักได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นคงที่ (Malik. 2004)

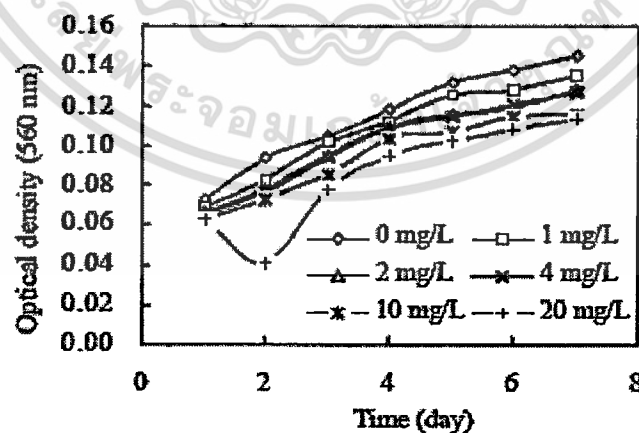
นอกจากนี้ตัวอย่างผลของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก เช่น จากการศึกษารายงานของ Raungsombon et al. (2008) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตะกั่วที่ความเข้มข้น คือ 0, 2.5, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Gloeocapsa* sp. เป็นเวลา 10 วัน (ภาพที่ 2.4) พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์จะลดลงมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 2.5 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ระหว่างการเจริญเติบโตของ *Gloeocapsa sp.* ที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของตะกั่วที่แตกต่างกัน

ที่มา : Raungsomboon *et al.* (2008)

Chen and Pan (2005) ได้ศึกษาถึงการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Spirulina* โดยได้รับความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่ 1, 2, 4, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 7 วัน (ภาพที่ 2.5) พบว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มข้นของตะกั่วที่สูงขึ้น โดยความเข้มข้นต่ำสุดที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้นสูงสุดที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตคือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสาเหตุให้เซลล์ตายตั้งแต่วันแรกของการทดลอง แต่เซลล์ก็สามารถฟื้นคืนสภาพได้ในภายหลังจาก 3 วันของการทดลอง

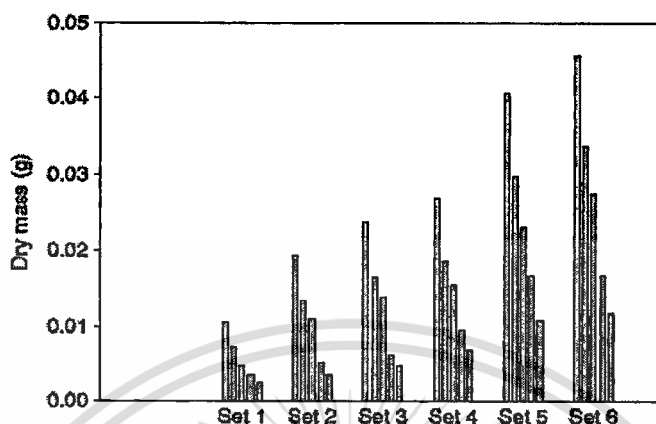


ภาพที่ 2.5 การเจริญเติบโตของ *Spirulina* ในสารละลายที่มีตะกั่ว ในแต่ละความเข้มข้น

ที่มา : Chen and Pan (2004)

Choudhary *et al.* (2007) ได้ทดลองถึงผลของ ตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของ *Spirulina* *platensis* และได้รับความเข้มข้นของตะกั่ว ที่ระดับ 0, 0.5, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการยับยั้งการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มข้นของตะกั่วที่สูงขึ้น โดยความเข้มข้นต่ำสุดที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตคือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้นสูงสุดที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตคือ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสาเหตุให้เซลล์ตายตั้งแต่วันแรกของการทดลอง แต่เซลล์ก็สามารถฟื้นคืนสภาพได้ในภายหลังจาก 3 วันของการทดลอง

เป็นเวลา 11 วัน (ภาพที่ 2.6) พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักยังเพิ่มขึ้นการเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายจะยังคงลดลง ตามลำดับ



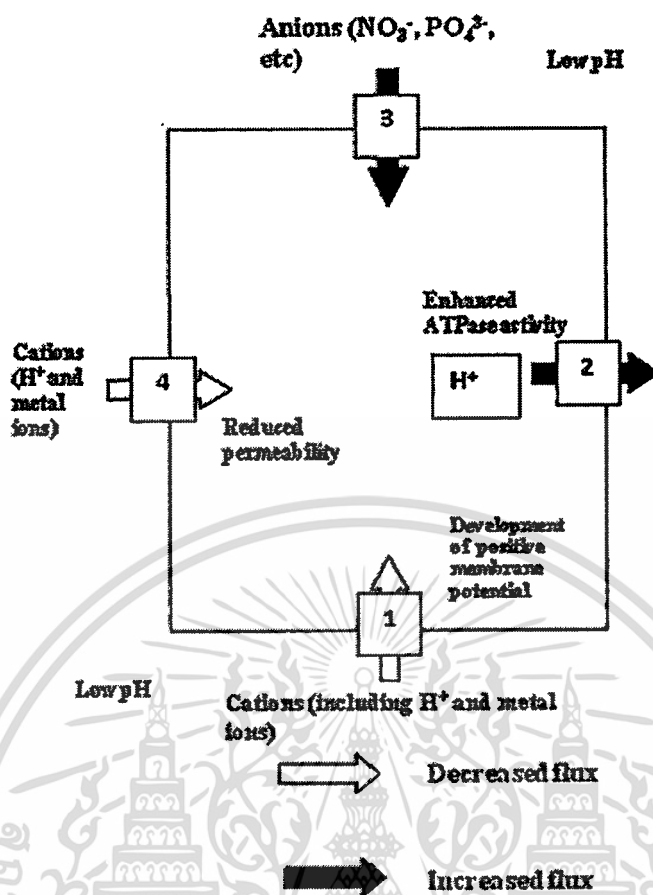
ภาพที่ 2.6 ผลของตะกั่ว ($Pb(NO_3)_2$) ต่อการเจริญเติบโตของ *Spirulina platensis* วัดในวันที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 (set1-set 6) และในแต่ละความเข้มข้น (แผนภูมิแท่งจากซ้ายไปขวา) 0.5, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ที่มา: Choudhary *et al.* (2006)

2.8 กลไกการปรับตัวของสาหร่ายขนาดเล็กในน้ำที่พีเอชต่ำ

การที่จะนำสาหร่ายมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบที่มีชีวิตในโรงงานอุตสาหกรรมในขั้นตอน tertiary treatment นั้น สาหร่ายอาจต้องทนกับพีเอชที่ต่ำและทนต่อพิษโลหะหนักได้ เพราะโลหะหนักหลายชนิดแตกตัวอยู่ในรูปไอออนอิสระซึ่งเป็นรูปที่สาหร่ายสามารถกำจัดได้ ซึ่งแม้มีเกณฑ์ข้อจำกัดดังกล่าว ก็ยังพบว่าสาหร่ายยังคงเป็นตัวเลือกที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้ดี ซึ่งพบมีรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิด เช่น *Gloeocapsa gelatinosa* สามารถเจริญเติบโตได้ในอาหารที่มีพีเอชเท่ากับ 4 (Ruangsomboon *et al.* 2006b) และพบมีรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Chlorella* มีกลไกในการทนต่อสารละลายที่เป็นกรดได้ โดยมีกลไกการปรับไม่ให้เซลล์ของสาหร่ายมีสถานะเป็นกรด (Erten-Unal and Wixson. 1998) โดยกลไกต่าง ๆ เช่นการลดปริมาณ H^+ ภายในเซลล์ และลดการนำเข้าประจุบวกเป็นต้น โดย Rai *et al.* (1996) ทดลองนำสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีความสามารถในการทนต่อพีเอชต่ำ มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ และได้ศึกษากลไกในการทนกรดของสาหร่ายชนิดนี้ พบว่ามีกลไกในการทำให้เซลล์สามารถทนต่อพีเอชที่ต่ำได้ เมื่อพีเอชต่ำ มีประจุบวกโดยเฉพาะ H^+ มาก ซึ่งจะทำให้ H^+ นี้แพร่เข้าเซลล์ได้ (ภาพที่ 2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 รูปแบบของกลไกในการทนต่อความเป็นกรดและความเป็นพิษของโลหะหนักในสาหร่าย (*Chlorella vulgaris*)

- เซลล์ของสาหร่ายเร่งการนำประจุลบเข้าสู่เซลล์เพื่อทำให้พีเอชภายในเซลล์มีค่าเป็นกลาง (หมายเลข 3)
- สาหร่ายเพิ่มปริมาณของ ATPase เพื่อใช้ในการขับ H^+ ออกจากเซลล์ (หมายเลข 2)
- เซลล์สาหร่ายขับประจุบวก ซึ่งรวมทั้ง H^+ และ ไอออนของโลหะอื่น ๆ ออกจากเซลล์ (หมายเลข 2)
- สาหร่ายลดการแพร่ผ่านเยื่อเซลล์โดยการเพิ่มการผลิตไขมัน (lipid) ซึ่งทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุบวกเข้าสู่เซลล์ (หมายเลข 4)
- สาหร่ายปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อเซลล์ให้เป็นบวกซึ่งจะทำให้ประจุบวกแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้ยากมากขึ้น (หมายเลข 1)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rai *et al.* (1996)

ซึ่งกลไกทั้งหมดนี้สำหรับพัฒนาขึ้นเพื่อความอยู่รอดของเซลล์สำหรับเอง และยังเป็นไปได้ว่าสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อยู่ในธรรมชาติ สามารถเกิดกลไกในการป้องกันตัวให้มีชีวิตรอดแบบนี้เช่นกัน หากแหล่งอาศัยที่สิ่งมีชีวิตนั้นอาศัยอยู่เกิดภาวะเครียดที่มีทั้งกรดและโลหะหนักเข้ามาในแหล่งที่มันอาศัย

2.9 กลไกการลดพิษจากโลหะหนักของเซลล์สาหร่าย (detoxified mechanism of algae)

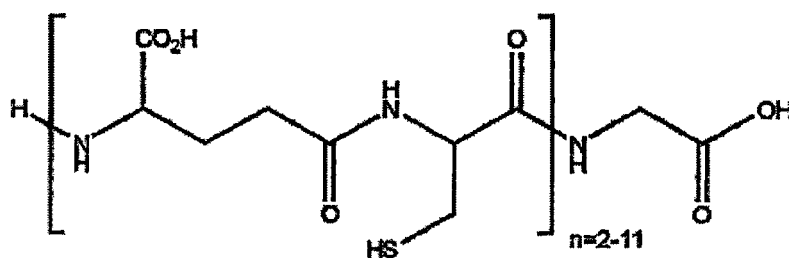
สาหร่ายมีกลไกในการป้องกันตัวเมื่อระดับโลหะหนักที่เข้าเซลล์เริ่มเป็นพิษกับเซลล์ โดยใช้สารประกอบภายในเซลล์จับกับโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งพบว่าสาหร่ายหลายชนิดสามารถสร้าง phytochelatin เพื่อลดพิษของโลหะหนักได้ หรืออาจทำให้โลหะหนักตกตะกอนภายในเซลล์ โดยสาหร่ายบางชนิดเมื่อตกตะกอนโลหะหนักแล้วก็สามารถส่งตะกอนออกมาเก็บไว้ที่เมือกหุ้มเซลล์ได้ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของผนังเซลล์สาหร่ายนั้น ๆ ด้วย (Volesky. 1990) หรือสาหร่ายอาจจับโลหะหนักไว้กับ โปรตีน ในเซลล์และส่งไปไว้ที่แวคิวโอลภายในเซลล์ (vacuole) หรือทิ้งไว้ในเซลล์ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ขบวนการเหล่านี้ไม่มีการผันกลับ (Gekeler *et al.* 1988) แต่กลไกนี้จะทำงานได้ต่อเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงเกินความสามารถในการกำจัดของเซลล์

2.9.1 Phytochelatin

Phytochelatin เป็นลักษณะของเปปไทด์สายยาวที่จับกับโลหะหนักภายในเซลล์ (metal-binding polypeptide) ซึ่งพบใน พืช ฟังก์ไจ และสาหร่ายทุกกลุ่ม สำหรับในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำได้มีการพัฒนากลไกเพื่อรักษาสมดุลของเซลล์ โดยควบคุมโลหะหนักที่มีในเซลล์กับที่มีในสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยเซลล์จะต้องเลือกชนิดโลหะหนักที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต และกำจัดโลหะหนักที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต และเซลล์ต้องคอยรักษาปริมาณไอออนที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตให้อยู่ในเซลล์ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม (Cobbett and Goldsbrough. 2002)

2.9.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของ phytochelatin

โครงสร้างโดยทั่วไปของ phytochelatin คือ $(\gamma\text{-Glu-Cys})_n\text{-Gly}$ ($\gamma\text{-glutamyl-cysteinyl}$)_n-glycine) (ภาพที่ 2.8) ซึ่งความยาวของสายหรือ “n” มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 11 หน่วย (Clemens. 2006) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 10,000 คาลตัน (Perales-Vela *et al.* 2006)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปของ phytochelatin

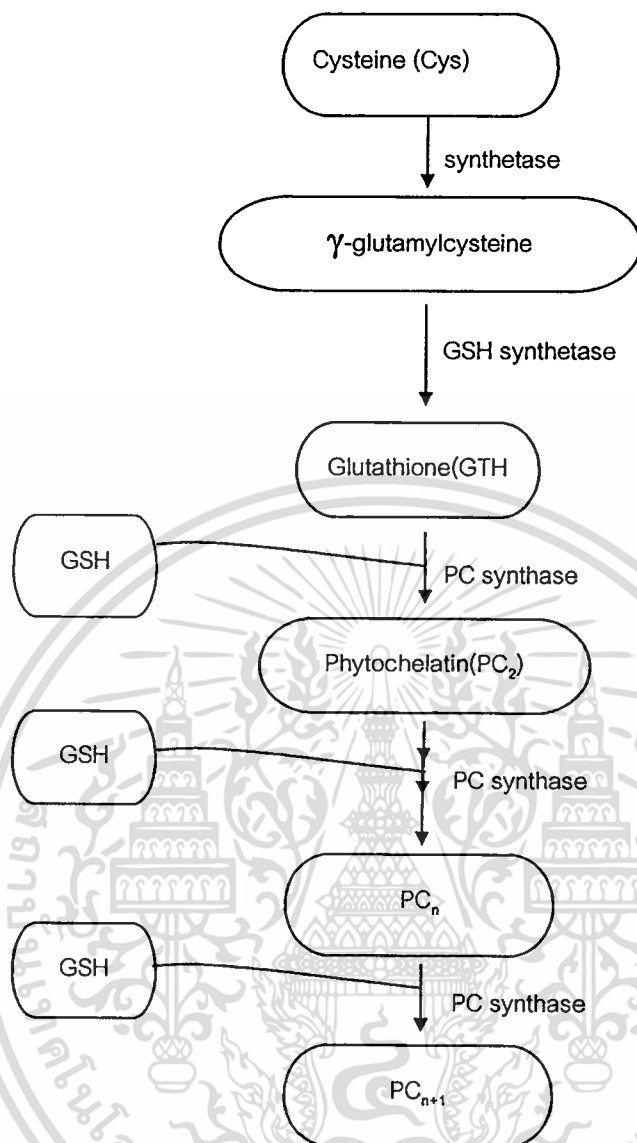
ที่มา: Clemens (2006)

2.9.3 Phytochelatin ในสาหร่าย

การสังเคราะห์ทางชีวภาพของ phytochelatin โดย glutathione เป็นเปปไทด์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจับโลหะหนักและเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ phytochelatin (Vatamaniuk *et al.* 2004) โดยเอนไซม์ที่ใช้ในการการสังเคราะห์ glutathione คือ γ -glutamylcysteine synthetase (YECS) และ glutathione synthetase (GS) (Xiang *et al.* 2001) ซึ่งกลไกการสร้าง phytochelatin โดยทั่วไปเขียนได้คือ



ในสาหร่ายส่วนใหญ่จะพบว่ามี การสังเคราะห์ phytochelatin ที่มีค่า $n=2$ (Gekeler *et al.* 1988) โดยในสาหร่ายนั้นสามารถกระตุ้นให้มีการสร้าง phytochelatin ได้โดยใช้ Cd^{2+} , Ag^+ , Bi^{3+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} และ Au^{2+} (Robinson. 1989) การสังเคราะห์ phytochelatin แบบง่าย ๆ คือ PC_2 (phytochelatin ที่มี $n=2$) สังเคราะห์โดย PC synthase (phytochelatin synthase) จากสอง โมเลกุลของ glutathione (GSH) ซึ่ง GSH สร้างมาจาก cysteine (Cys) ผ่าน γ -glutamylcysteine (γEC) การทำให้สายยาวขึ้นคือการทำซ้ำตามขั้นตอนเดิม (ภาพที่ 2.9) โดยปกติแล้ว phytochelatin ที่มีสายยาวจะจับกับโลหะหนักได้แข็งแรงและเสถียรมากกว่าพวกที่มีสายสั้น (Hirata *et al.* 2005)



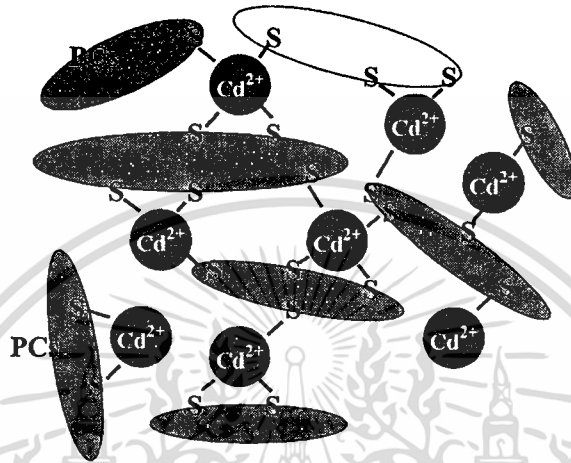
ภาพที่ 2.9 การสังเคราะห์ทางชีวภาพของ phytochelatin

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirata (2001)

2.9.4 หน้าที่ของ cysteine

cysteine เป็นส่วนหนึ่งของแกนของ phytochelatin และเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของ phytochelatin synthase (PCS) (Oven *et al.* 2002a) ดังนั้นการสังเคราะห์ cysteine จึงมีความสำคัญกับการผลิต phytochelatin ด้วย และ cysteine อาจเป็นปัจจัยที่จำกัดเหมาะสมต่อการลดพิษของโลหะหนัก โดยพบว่าในพืชบางชนิดมีการเพิ่มปริมาณของเอนไซม์ *O*-acetylserine (thiol) lyase เป็นปริมาณมาก ซึ่งเอนไซม์นี้ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ cysteine โดยพบว่าพืชที่มีเอนไซม์ชนิดนี้มาก สามารถเจริญเติบโตในที่ที่มีแคดเมียมเข้มข้นสูงได้มากกว่าปกติ และจะสะสมแคดเมียมไว้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบได้มากกว่าปกติด้วย โดย cysteine มีกลุ่ม thiol, (-SH) เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) จะพบในการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง phytochelatin กับโลหะ (ภาพที่ 2.10) โดยซัลไฟด์ไอออนจะช่วยทำให้ phytochelatin จับตัวกับโลหะหนักได้เสถียรมากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้เพิ่มความสามารถในการลดพิษได้มากยิ่งขึ้นด้วย (Domínguez-Solís *et al.* 2001)



ภาพที่ 2.10 การจับตัวของ phytochelatin (PCs) กับ แคดเมียม (Cd^{2+}) จับกันกับอะตอมของซัลเฟอร์ (S) ได้ตั้งแต่ 1, 2, 3 หรือสูงสุดคือ 4 อะตอมจาก PCs โมเลกุลเดียว หรือหลายโมเลกุลได้ ทำให้เกิดเป็น โครงสร้างที่ซับซ้อนรูปร่างไม่แน่นอน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirata *et al.* (2005)

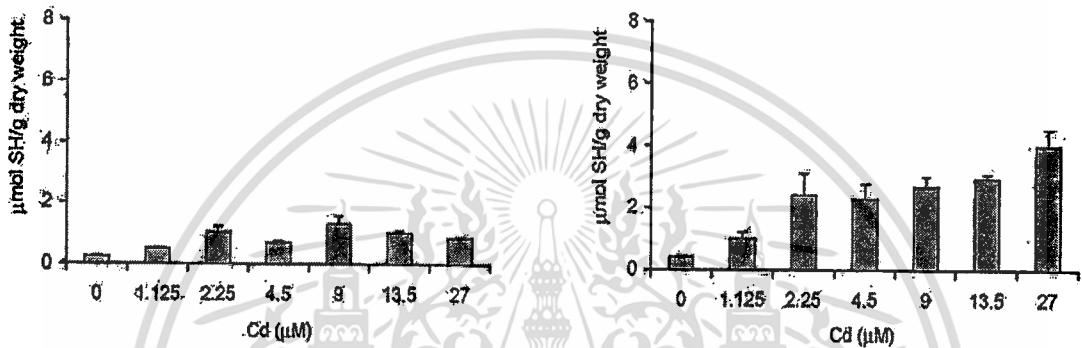
จากการศึกษาของ Yu-Shan *et al.* (1992) พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่จับกับโลหะหนัก (Heavy metal binding complexes) พบในไซโตพลาสซึมของพืชซึ่งมีรายงานไว้อย่างกว้างขวางในการตอบสนองในการต้านทานโลหะซึ่ง metal binding complexes นี้ ทำหน้าที่สำคัญในการสะสมโลหะหนักและป้องกันไม่ให้โลหะที่เป็นโครงสร้างนี้เข้าสู่วิถีเมตาบอลิซึมของพืช ซึ่งโมเลกุลนี้จะมีปริมาณกรดอะมิโน cysteine สูงและความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูงด้วย

Torricelli *et al.* (2004) ศึกษาความไวต่อแคดเมียมของสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus acutus* 2 สายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ทั่วไปกับสายพันธุ์ที่ต้านทานต่อโครเมียม และประเมินปริมาณ cysteine ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่แตกต่างกัน จาก 1.125 ถึง 27 ไมโครโมล (ภาพที่ 2.11) แคดเมียมส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระดับกรดอะมิโน cysteine ที่แตกต่างกันระหว่างสายพันธุ์ที่ต้านทานโครเมียมและสายพันธุ์ทั่วไป โดยปริมาณ cysteine ในเซลล์ของสายพันธุ์ที่ต้านทานโครเมียมมีมากกว่า 2 เท่ากับสายพันธุ์ทั่วไป ในสายพันธุ์ที่ต้านทานโครเมียมปริมาณ cysteine เพิ่มจากความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมต่ำสุด (1.125 ไมโคร โมล) จนถึงสูงสุด (27 ไมโคร โมล) มีค่าเท่ากับ 3.984 ± 0.536 ไมโคร โมล SH ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับในสายพันธุ์ทั่วไป ปริมาณ cysteine สูงสุด เมื่อเพิ่มขึ้นแคดเมียมถึง 9 ไมโคร โมล เท่านั้น และเมื่อความเข้มข้นสูงถึง 27 ไมโคร โมล สายพันธุ์ต้านทานโครเมียมมีปริมาณ cysteine สูงกว่าสายพันธุ์ทั่วไปถึง 5 เท่า แสดงให้เห็นถึงการสูงขึ้นความเข้มข้นของแคดเมียมส่งผลให้มีการต้านทานร่วมกันกับ *Scenedesmus acutus* สายพันธุ์ต้านทานโครเมียมเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ทั่วไป

Cysteine



ภาพที่ 2.11 ปริมาณกรดอะมิโน cysteine ของ *Scenedesmus acutus* ภายใต้การสัมผัสแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0 ถึง 27 ไมโคร โมล ภาพซ้ายเป็นสายพันธุ์ทั่วไป และภาพขวาเป็นสายพันธุ์ที่ต้านทานโครเมียม

ที่มา : Torricelli *et al.* (2004)

Garg *et al.* (2004) ศึกษาการสะสมและพิษของแคดเมียมใน *Hydrilla verticillata* โดยทั่วไปเกิดขึ้นในส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ (macrophyte) โดยควบคุมความเข้มข้น แคดเมียมที่แตกต่างกัน 6 ระดับ จาก 1.0 ถึง 25.0 ไมโคร โมล และระยะเวลาในการสัมผัสแคดเมียม 24, 48, 72, และ 168 ชั่วโมง พบว่าการสะสมแคดเมียมมีความสัมพันธ์เชิงปริมาณกับ cysteine โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในเนื้อเยื่อพบสูงที่สุด (13.71 µmoles/g dwt) และที่ความเข้มข้นของแคดเมียมที่แตกต่างกันจาก 1.0 ถึง 25 ไมโคร โมล จะมีปริมาณ cysteine สูงขึ้นในแต่ละระยะเวลาในการสัมผัสของพืชชนิดนี้

นอกจากนี้ Feng *et al.* (2009) ศึกษาบทบาทของซัลเฟอร์ (S) ต่อการสะสมแคดเมียมใน *Tagetes erecta* L. ที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณของแคดเมียมในหน่อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ 2- 3 เท่า เมื่อเพิ่มระดับซัลเฟอร์ที่ใช้เลี้ยงในสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ไม่ได้รับซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 35 องศาเซลเซียสการสะสมแคดเมียมในหน่อต่ำกว่าภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามปริมาณ glutathione และ cysteine เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิถึง 35 องศาเซลเซียส จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนการประกอบเป็นโครงสร้างของ S ผลที่ได้บ่งชี้ว่าสารประกอบที่มีหมู่ thiol (SH) ที่เป็นองค์ประกอบของ cysteine มีบทบาทในสำคัญในการสะสม แคลเมียมของ *T. erecta*

2.10 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ

สาหร่ายที่มีชีวิตมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ หรือลักษณะผนังเซลล์ของสาหร่าย โดยพบว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายกับเซลล์แต่ไม่ทำให้สาหร่ายตาย (sublethal) จะทำให้สาหร่ายเพิ่มปริมาณความหนาของเมือกที่คลุมเซลล์และเยื่อหุ้มไซโต-พลาสซึม ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนองค์ประกอบไปด้วย เช่นการสร้างกรดขึ้นมาที่ผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงเช่นสาร antibiotic จะทำให้มีการเพิ่มหมู่ free carboxyl และกลุ่ม amine และยังมีปัจจัยเรื่องสภาวะของการเลี้ยง เช่นการจำกัดปริมาณฟอสเฟต การจำกัดสารอาหาร การเปลี่ยนค่าพีเอช การได้รับรังสี การได้รับยาฆ่าเชื้อรา หรือปัจจัยเรื่องแสง อุณหภูมิ แหล่งสารอาหาร เป็นต้น (Volesky, 1990) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับสภาวะในการเลี้ยงจะส่งผลถึงความสามารถในการกำจัด โลหะหนักของเซลล์สาหร่ายได้เช่นกัน

2.10.1 ผลของสภาวะการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์

เนื่องจากความสามารถในการกำจัด โลหะหนักของสาหร่ายส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายชนิดนั้นๆ (Bekasova *et al.* 2002) ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งภายในเซลล์ (Intracellular polysaccharide, IPS) ส่วนที่หุ้มติดผนังเซลล์ (Capsular polysaccharide, CPS) และส่วนที่ละลายในน้ำล้อมรอบเซลล์ (Exocellular polysaccharide, EPS) ที่สร้างโดยสาหร่ายนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยง โดยขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพและเคมี (Otero and Vincenzi, 2003; Allard and Tazi, 1993) พอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายที่สร้างขึ้นในเซลล์ระหว่างการเจริญเติบโต ปริมาณ IPS, CPS และ EPS จึงสัมพันธ์การเจริญเติบโตของสาหร่าย ดังนั้นปัจจัยในการเลี้ยงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตโดยอ้อมมีผลต่อปริมาณ IPS, CPS และ EPS ด้วย

การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันในสูตรอาหาร M-18 โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ได้รับแสง 24 ชั่วโมง ความเข้มแสง 400 ไมโครไรสโตนต่อตารางเมตรต่อวินาที พีเอชอาหารเท่ากับ 7 (สภาวะควบคุม) และเลี้ยงในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เลี้ยงเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่า *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะควบคุมมีปริมาณ CPS และ EPS สูงสุดคือ 35.4 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย และ 33.0±1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณผลผลิตสูงสุดคือ 1.9±0.3 กรัมต่อลิตร การเลี้ยงภายใต้อาหารที่ไม่เติมไนเตรทและภายใต้ความเข้มแสงต่ำ จะทำให้มีปริมาณ CPS ต่ำ (Ruangsomborn *et al.* 2006b) (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณ CPS, EPS และปริมาณผลผลิตของสาหร่าย *G. gelatinosa* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ย±ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

Growth condition	CPS (mg/g dry biomass)	EPS(mg/l culture medium)	Total dry biomass (g/l)
Control condition	35.4	33.0±1.0d	1.9±0.3d
Sub-optimal condition			
Low pH (pH 4)	33.2	31.8±1.1d	0.9±0.1a
UV exposure (3 hr/day)	18.4	20.0±1.3e	0.8±0.0a
Low light intensity (200 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}^1$)	16	19.5±1.4e	0.7±0.0a
Light and dark cycle	23.5	26.3±1.7f	0.6±0.1a
Nitrate free media	15.8	27.8±1.0f	1.0±0.1a

ที่มา: Ruangsomboon *et al.* (2006b)

2.10.2 ผลของสภาวะการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน

พอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่ายประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักโดยหมู่ฟังก์ชันหลักของคาร์โบไฮเดรตคือคาร์บอกซิล ส่วนหมู่ฟังก์ชันหลักของโปรตีนคือเอมีน

จากการวิเคราะห์โดยทั่วไป AOAC (1995) พบว่าสัดส่วนของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต EPS และ CPS ในสาหร่ายแต่ละชนิดไม่เท่ากัน เช่น จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในพอลิแซ็กคาไรด์ในส่วนของ EPS ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินคือ *Oscillatoria sp.*, *Nostoc sp.*, *N. carneum* และ *Cyanothece sp.* พบว่ามีปริมาณขององค์ประกอบ EPS ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.3) โดย *Cyanothece sp.* มีเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตใน EPS สูงสุด ส่วน *Nostoc sp.* มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนใน EPS สูงสุด ซึ่งการที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนที่แตกต่างกัน จะทำให้สามารถทำนายได้ถึงค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายที่จะเหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายแต่ละชนิดด้วยเพราะหมู่ฟังก์ชันของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนมีค่า pKa ที่แตกต่างกัน โดยคาร์โบไฮเดรตมีหมู่ฟังก์ชันในการแตกตัวที่พีเอชต่ำกว่าโปรตีน ดังนั้นเมื่อทราบส่วนประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์จะทำให้วางแผนในการออกแบบระบบบำบัดโลหะหนักให้เหมาะสมกับชนิดของสาหร่ายได้ (Parikh and Madamwar, 2006)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในพอลิแซ็กคาไรด์ (EPS) ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด (ค่าเฉลี่ย±ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

Algae	Carbohydrate (%)	Protein (%)
<i>Oscillatoria</i> sp.	70.0±1.4	3.44±0.14
<i>Nostoc</i> sp.	68.5±1.0	4.01±0.01
<i>N. carneum</i>	56.0±1.0	2.72±0.01
<i>Cyanoyhece</i> sp.	87.0±1.1	1.83±0.03

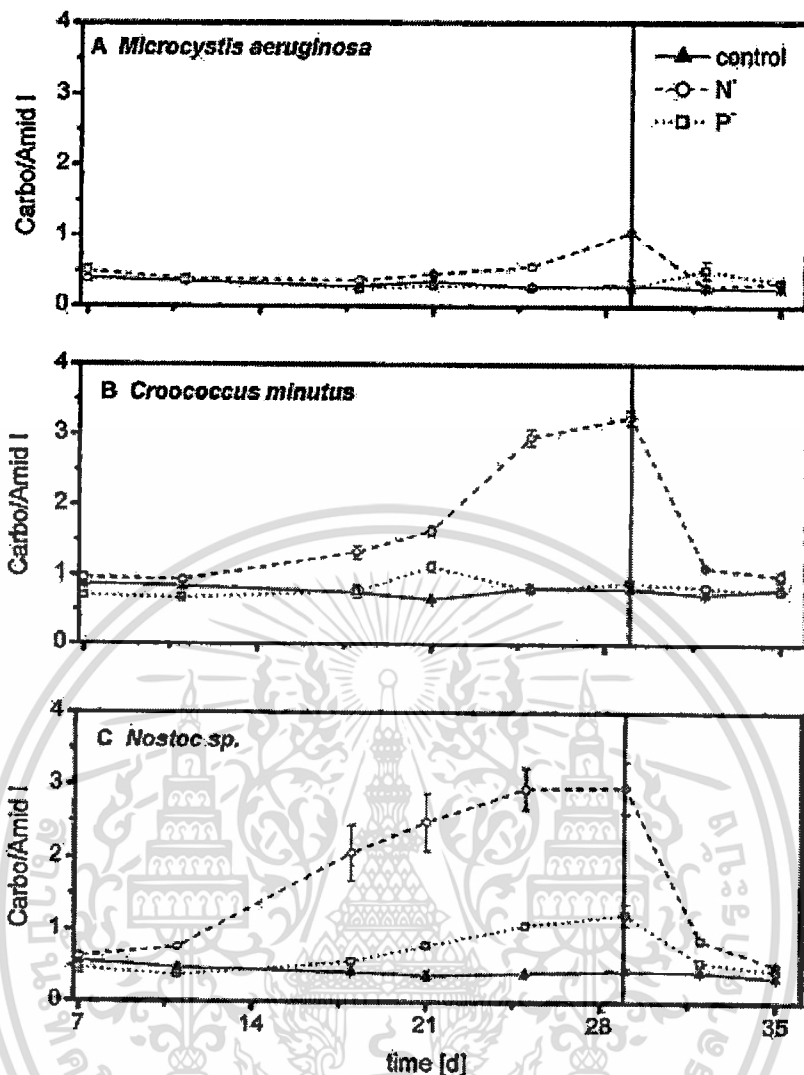
ที่มา : Parikh and Madamwar (2006)

โดยพบว่าปัจจัยในการเลี้ยงส่งผลต่อสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย เช่น พบว่าหากเลี้ยงสาหร่ายที่ระยะเวลาแตกต่างกัน มีผลทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนใน EPS มีค่าแตกต่างกันด้วยเช่นกัน เช่น การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas angustae* ที่ระยะเวลา 10-22 วัน พบว่าที่ระยะเวลาการเลี้ยง 22 วัน EPS จะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุดถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโปรตีนใน EPS มีปริมาณสูงสุดที่ 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเลี้ยงสาหร่ายเป็นระยะเวลา 10 วัน (Allard and Tazi. 1993)

การการตอบสนองต่อความเครียดจากสารอาหารของเซลล์แพลงก์ตอนพืช คือการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสาร โมเลกุลใหญ่ (macromolecule) ของเซลล์ เมื่อในโตรเจนที่จำนวนจำกัดจะทำให้มีการลดลงของปริมาณโปรตีน และค่อนข้างเพิ่มการสะสมของคาร์โบไฮเดรตหรือลิพิด (Shifrin and Chisholm. 1981; Geider *et al.* 1993) สำหรับฟอสเฟตที่มีจำกัดจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วน โปรตีน ลิพิด และคาร์โบไฮเดรต (Bertilsson *et al.* 2003) ดังนั้นองค์ประกอบทางชีวเคมีของแพลงก์ตอนพืชจึงมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโต และส่งผลต่อศักยภาพทางสรีรวิทยา

Stehfest *et al.* (2005) ศึกษาความเครียดจากสารอาหารไนโตรเจน (N) หรือฟอสฟอรัส (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงแถบสเปกตรัมของ FTIR spectroscopy โดยศึกษาอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชัน carbo/amide ใน 3 สายพันธุ์ของไซยาโนแบคทีเรีย *Microcystis aeruginosa*, *Croococcus minutes* และ *Nostoc* sp. ภายใต้ N หรือ P ที่มีจำนวนจำกัดในอาหาร ตามลำดับ (ภาพที่ 2.12) สายพันธุ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันในช่วงเริ่มต้นภายใต้สารอาหารที่พอเพียงของอัตราส่วนระหว่างหมู่ carbo/amide ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1 และค่อนข้างคงที่ในทุกสายพันธุ์ตลอดการทดลอง สำหรับภายใต้สภาวะ N จำกัดพบว่า ไซยาโนแบคทีเรียทุกสายพันธุ์ มีการเพิ่มอัตราส่วนของหมู่ carbo/amide ที่แตกต่างกันอย่างจำเพาะของแต่ละสายพันธุ์ โดย *M. aeruginosa* พบว่ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีอัตราที่สูงที่สุดซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุม 3.5 เท่า หลังจาก 25 วันของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแถบของ Carbo/Amide ของไซยาโนแบคทีเรีย (A)

Microcystis aeruginosa, (B) *Croococcus minutus* และ (C) *Nostoc sp.* เส้นตามขวาง
 คั่นการกลับสู่สภาพเดิมจากสภาวะขาด N และ P

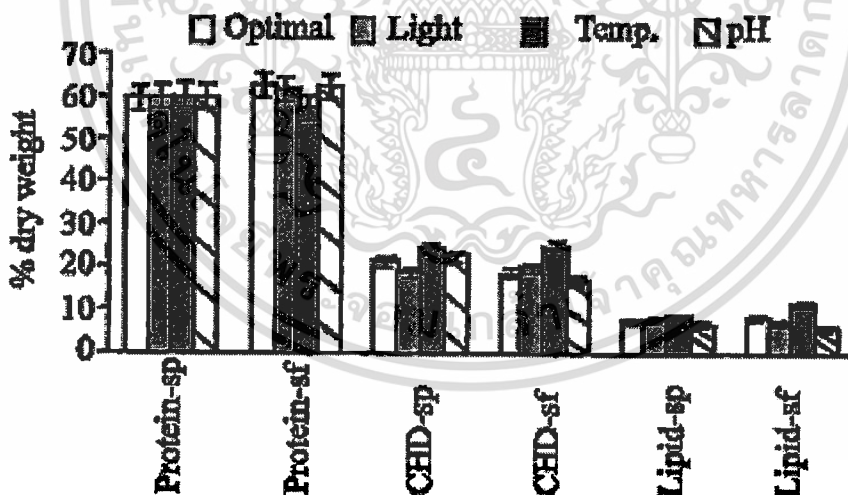
ที่มา : Stehfest *et al.* (2005)

สำหรับ *C. minutus* เพิ่มขึ้น 4.1 เท่า และ *Nostoc sp.* เพิ่มขึ้น 6.7 เท่า หลังจาก 14 และ 10 วันของการทดลอง และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากวันที่ 21 ของการเลี้ยง ในสายพันธุ์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ผลของการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน carbo/amide เกือบทั้งหมดสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากให้ไนโตรเจนอีกครั้ง ความพอเพียงของอาหารทำให้มีการลดลงอย่างรวดเร็วใกล้เคียงกับอัตราส่วนของกลุ่มควบคุม ทั้ง 3 สายพันธุ์ สำหรับภายใต้สภาวะ P จำกัด *M. aeruginosa* และ *C. minutus* แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนใกล้เคียงกันที่คล้ายกันของอัตราส่วนหมู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

carbo/amide ที่ใกล้เคียงกลุ่มควบคุม ในขณะที่ *Nostoc* sp. มีอัตราส่วนของหมู่ carbo/amide เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ลักษณะทางกายภาพ-เคมี สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการตกกระทบของแสง ความหนาแน่นและอุณหภูมิมีความสำคัญในการประเมินการผลิตของสาหร่ายขนาดเล็กและไซยาโนแบคทีเรียที่ดีสำหรับลักษณะโดยทั่วไป (Knusten and Skjanes. 1999) จากการศึกษาของ Rafiqul *et al.* (2005) โดยศึกษาปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม คือ สภาวะอุณหภูมิ แสงและพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสาหร่าย *Spirulina platensis* และ *Spirulina fusiformis* ในอาหารสูตร Zarouk สำหรับสภาวะการเลี้ยงของ *S. platensis* อุณหภูมิ 32°C แสง 2500 ลักซ์ และพีเอช 9 ในขณะที่ *S. fusiformis* อุณหภูมิ 37°C แสง 2500 ลักซ์ และพีเอช 10 (ภาพที่ 2.13) พบว่าปริมาณโปรตีนของ *S. platensis* คือ 58.6% และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับปริมาณโปรตีนของ *S. fusiformis* คือ 61.8% แต่ค่านี้สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเลี้ยงแต่มีความเหมือนทางสถิติกับพีเอชและแสงที่ส่งผลต่อการเลี้ยง ($p>0.05$) ผลที่ได้สนับสนุนว่าสภาวะทางแวดล้อมที่เหมาะสมส่งผลต่อการเลี้ยง *Spirulina* และเป็นปัจจัยสำหรับการผลิตชีวมวลและปริมาณโปรตีนที่ดี



ภาพที่ 2.13 องค์ประกอบทางชีวเคมี ของ *S. platensis* และ *S. fusiformis* ในสภาวะที่เหมาะสม

ค่าเฉลี่ยของ 3 ซ้ำ sp=*S. platensis*, sf=*S. fusiformis*, CHD=คาร์โบไฮเดรต

ที่มา: Rafiqul *et al.* (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายที่เจริญเติบโตในอาหารที่ไนโตรเจนลดลงจนหมดจะผลิตปริมาณไขมันที่สูง และการที่ไนโตรเจนค่อยๆ ลดลง ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และโปรตีนลดลงและปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณลิพิดเพิ่มขึ้นด้วย (Collyer and Fogg, 1955)

Richardson *et al.* (1969) ศึกษาการตอบสนองต่อไนโตรเจนที่หมดไปในการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Chlorella sorokiniana* และ *Oocystis polymorpha* ในการเลี้ยงแบบต่อเนื่องพบว่า การลดลงของไนโตรเจนปริมาณไนโตรเจนภายในเซลล์ลดลงจากประมาณ 10 ถึง 4% และจะมีการปลดปล่อยออกซิเจน (ตารางที่ 2.4) การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณคลอโรฟิลล์และผลผลิตเนื้อเยื่อลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ พบว่าองค์ประกอบ C, H และ N ของปริมาณคาร์โบไฮเดรตมีการเพิ่มขึ้นในระดับกลางๆ

ตารางที่ 2.4 ผลของไนโตรเจนที่มีจำกัดต่อองค์ประกอบของธาตุของ *Oocystis polymorpha* และ *Chlorella sorokiniana* ในการเลี้ยงแบบต่อเนื่อง

Determination	<i>Oocystis polymorpha</i> (NO ₃ input, mmole/liter)				<i>Chlorella sorokiniana</i> (NO ₃ input, mmole/liter)		
	20	12	9	6a	20	10	5
C	44.1b	46.3	46.1	45.1	47.7	43.3	41.8
H	6.6	6.8	7.3	7.0	7.0	6.8	6.8
N	10.0	8.1	6.8	4.0	10.1	7.3	5.6
Ash	6.4	5.5	4.7	4.6	5.5	7.5	7.0
O	32.9	33.3	35.1	39.3	29.7	35.1	38.8
R-value	36.8e	36.4	38.2	35.8	48.6	36.1	34.0

ที่มา: Richardson *et al.* (1969)

2.10.3 อายุสาหร่ายหรือระยะเวลาในการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กต่อการดูดซับตะกั่ว

อายุสาหร่ายหรือระยะเวลาในการเลี้ยงสาหร่าย (algal age or culture time) พบว่ามีผลหลักต่อชนิด ปริมาณ และองค์ประกอบของสารต่างๆ หรืออาหารสะสมในเซลล์สาหร่าย และพบว่า การสะสมโลหะหนักโดยสาหร่ายอาจผันแปรได้แตกต่างกันขึ้นกับอายุของสาหร่าย และนอกจากนี้ ยังพบว่ากลไกของเซลล์สาหร่ายในการเพิ่มความทนทานต่อโลหะหนักนั้นจะเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างช่วงชีวิตของการเจริญเติบโตหรือช่วงอายุของสาหร่ายที่แตกต่างกันซึ่งอาจเนื่องมาจาก สามารถเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ได้นั่นเอง Joux-Arab *et al.* (2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต็มได้น้อย และสาหร่ายยังต้องการพลังงานจากภายนอกเช่นพลังงานแสง และสารอาหาร (Donmez *et al.* 1999)

อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยใช้สาหร่ายบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่กับของเสียประเภทสารอินทรีย์ (organic waste) จะได้ผลดี เพราะมีสารอินทรีย์ช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโต นอกจากนี้ต้องทำการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายที่ทนต่อความเป็นกรด ทนต่อพิษของโลหะหนักได้สูงและเลือกสายพันธุ์ที่สามารถใช้สารอินทรีย์จากของเสียเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต การเลือกสาหร่ายสายพันธุ์ที่ทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้สูงเป็นเกณฑ์ที่สำคัญมากที่จะทำให้ระบบบำบัดโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายที่มีชีวิตสามารถปฏิบัติได้จริง ซึ่งสาหร่ายที่ทนต่อโลหะหนักได้สูงนั้นจะสามารถจับกับโลหะหนักได้มากกว่าสาหร่ายปกติทั่วไป แต่คุณสมบัติบางประการอาจลดลงเพราะเซลล์สาหร่ายจำเป็นต้องมีขบวนการในการลดพิษของโลหะหนักในเซลล์ ซึ่งคุณสมบัติอื่นๆ ที่อาจขาดไปได้แก่ กิจกรรมของเซลล์ในการทำให้โลหะหนักตกตะกอน การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ และการพัฒนาผิวเซลล์ให้จับโลหะหนักได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ควรมีในเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตที่จะนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ดังนั้น ควรมีการออกแบบระบบให้มีสาหร่ายหลายๆ ชนิดอยู่ร่วมกันได้ โดยให้มีสาหร่ายที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้สูง สามารถสะสมโลหะหนักในเซลล์ได้มาก และสามารถทำให้โลหะหนักตกตะกอนด้วยวิธีการทางชีวภาพ (bioprecipitation) ได้ (Pumpel *et al.* 2001) การใช้สาหร่ายหลายชนิดร่วมกันจะทำให้มีข้อดี โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีค่าของพีเอชต่ำ หรือค่าของโลหะหนักเข้มข้นสูง สาหร่ายที่สามารถปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์ได้มาก จะทำให้เซลล์สาหร่ายต่างๆ สามารถเกาะรวมตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ (biofilms) ซึ่งทำให้สามารถจับได้ทั้งไอออนของโลหะที่ละลายน้ำและจับกับโลหะที่จับตัวเป็นก้อนเล็กๆ และกระจายอยู่ในน้ำ นอกจากนี้สาหร่ายเหล่านี้ยังมีผลต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ผลต่อค่าพีเอช หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งล้วนส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักได้ นอกจากนี้การที่มีสาหร่ายหลายชนิดอยู่ร่วมกัน ยังสามารถช่วยทำให้สาหร่ายชนิดที่มีความทนทานต่อโลหะหนักได้ต่ำนั้นสามารถมีชีวิตอยู่รอดได้ (Bradshaw *et al.* 1998) แต่ในการนำสาหร่ายที่มีชีวิตไปใช้กำจัดโลหะหนักที่มีพิษสูงนั้น จำเป็นต้องแน่ใจว่าเซลล์สาหร่ายสามารถคงความสามารถในการเจริญเติบโตและกำจัดโลหะหนักได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นคงที่ (Malik. 2004)

การที่จะนำสาหร่ายที่มีชีวิตมาใช้มาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีรายงานไว้ไม่มากนัก เช่น การทดลองนำสาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Nostoc linckia* และ *Nostoc rivularis* มาบำบัดน้ำเสียซึ่งนำมาจากบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรม โดยนำน้ำเสียมาเจือจางลง พบว่าน้ำเสียที่เจือจางลงที่ระดับ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ นั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยมีจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ การสังเคราะห์แสง การหายใจ และปริมาณโปรตีน

เอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นใช้ประโยชน์จากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น แต่วัฏจักร หรือระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตสั้นลง โดยสาหร่าย *N. linckia* จะสะสม สังกะสีและแคดเมียมไว้ในเซลล์ได้สูงกว่าในน้ำภายนอกถึง 30 เท่า และ 10 เท่า ตามลำดับ (Ei-Enany and Issa. 2000)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก

3.1.1 *Phormidium* sp.

3.1.2 *Mastigocladopsis* sp

3.1.3 *Hapalosiphon* sp.

3.1.4 *Chlorella* sp.

3.2 สารเคมี

3.2.1 อาหารเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (ภาคผนวก ก)

3.2.1.1 BG-11 medium

3.2.1.2 Chlorella medium

3.2.2 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

3.2.2.1 เมทานอล (Methanol) (Fisher scientific, UK)

3.2.3 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณโปรตีน

3.2.3.1 Folin-Ciocalteu reagent (Fluka, Switzerland)

3.2.3.2 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) (Carlo erba, France)

3.2.3.3 คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) (Carlo erba, France)

3.2.3.4 โซเดียมโพแทสเซียมทราเทรต ($\text{NaKC}_4\text{H}_6\text{O}_6$) (Carlo erba, France)

3.2.3.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Carlo erba, France)

3.2.3.5 โบวีนซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin, BSA) (Fluka, Switzerland)

3.2.4 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์

3.2.4.1 ฟีนอล ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) (Carlo erba, France)

3.2.4.2 ซัลฟูริก (H_2SO_4) (Carlo erba, France)

3.2.4.3 กลูโคสมาตรฐาน (Glucose standard) (Fluka, Switzerland)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาปริมาณตะกั่ว

3.2.5.1 เลด ไนเตรท (PbNO_3) (Carlo erba, France)

3.2.5.2 สารละลายตะกั่วมาตรฐาน (Lead solution standard) (Merck, Germany)

3.2.6 เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาคุณภาพน้ำ (ภาคผนวก ข)

3.3 อุปกรณ์

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Atomic Absorption) (GBC Avanta, Australia)

3.3.2 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (BECthai, Thailand)

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

3.3.4 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Hettich Zentrifugen, Australia)

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

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

3.3.7 อ่างทำความร้อน (Water bath) (WNE, Germany)

3.3.8 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.3.9 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.3.10 เครื่องผสมสาร (vortex) (vision scientific, Korea)

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

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

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

3.3.14 ไมโครปิเปต (micro pipette) (socorex, Switzerland)

3.3.15 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) (Ecoscan, Netherlands)

3.3.16 โถดูดความชื้น (Descicator)

3.3.17 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.3.18 กระบอกตวง (Cylinder)

3.3.19 คอลัมน์ไนเตรท (Column Nitrate)

3.3.20 เพลท (Plate)

3.3.21 ขวด BOD

3.3.22 ขวดน้ำเกลือ

3.3.23 สายออกซิเจน

3.3.24 ทิป (tip)

3.3.25 หลอดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.26 เครื่องแก้วต่างๆ

3.3.27 ภาชนะพลาสติก (polypropylene) ต่างๆ

3.4 สถานที่ทำการวิจัย

3.4.1 ห้องปฏิบัติการแพลงก์ตอน หลักสูตรวิทยาศาสตร์การประมง สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4.2 ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ AA (Atomic Absorption Spectrophotometer) หลักสูตรปฐพีวิทยา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.5 วิธีการศึกษา

3.5.1 ศึกษาหาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อให้สาหร่ายสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด

โดยเลือกสาหร่ายขนาดเล็ก 4 ชนิด ได้แก่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. นำมาปรับแปรสภาวะในการเลี้ยง โดยศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโต ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต (พอลิแซ็กคาไรด์) ในสภาวะการเลี้ยงที่แตกต่างกัน คือ

(1) สภาวะในการเลี้ยงที่ความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันและที่พีเอชต่ำ (4.5) โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยอาหารสูตร *Chlorella* และเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. ด้วยอาหารสูตร BG-11 ที่ไม่เติม EDTA ทั้ง 2 สูตร ภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12 ที่ความเข้มแสง 30 ไมโครโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ในขบวนการเลี้ยงปริมาณ 1 ลิตร และมีการให้ฟองอากาศในขวดเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่อง โดยในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 4.5 เป็นชุดควบคุม และในอาหารที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 0 – 9 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 9 – 18 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 จนกระทั่งสาหร่ายตาย (วันที่ 18 – 30 ของการทดลอง) ระหว่างการเลี้ยงวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้ำหนักแห้ง ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรตีนโดยวิธีการของ Lowly และปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีการ Phenol-sulfuric ทุก 3 วัน เป็นเวลา 30 วัน

(2) สภาวะในการเลี้ยงที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยอาหารสูตร *Chlorella* และเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. ด้วยอาหารสูตร BG-11 ที่ไม่เติม EDTA ทั้ง 2 สูตรที่มีความเข้มข้นของสารอาหาร 100 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุม) และลดความเข้มข้นของสารอาหารเหลือ 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12 ที่ความเข้มแสง 30 ไมโครโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ในขวดน้ำเกลือปริมาตร 1 ลิตร และมีการให้ฟองอากาศในขวดเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่อง ระหว่างการเลี้ยงวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีนโดยวิธีการของ Lowly และปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีการ Phenol-sulfuric ทุก 3 วัน เป็นเวลา 30 วัน

(3) สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต (ทำตามข้อ (2)) โดยผันแปรเฉพาะการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ (ชุดควบคุม) และสภาวะคั้งนี้กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ทุกกลุ่มการเลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง

(4) สภาวะในการเลี้ยงที่มีช่วงเวลาได้รับแสงที่แตกต่างกัน (ทำตามข้อ (2)) โดยผันแปรเฉพาะการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยอาหารสูตรที่เหมาะสมแต่ละชนิดที่ไม่เติม EDTA ที่มีความเข้มข้นของสารอาหาร 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบการเลี้ยงสาหร่ายระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12

3.5.1.1 การเตรียมปริมาณเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นในการเพาะเลี้ยง

นำหัวเชื้อสาหร่ายระยะการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (late exponential phase) แต่ละชนิดปริมาตรสาหร่าย 100 มิลลิลิตร ลงในอาหารสูตรที่เหมาะสมของแต่ละชนิดปริมาตร 900 มิลลิลิตร ในการเริ่มต้นในการเพาะเลี้ยงแต่ละสภาวะในการทดลอง โดย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เริ่มต้นเท่ากับ 0.79 ± 0.05 , 0.73 ± 0.04 , 1.19 ± 0.06 และ 2.01 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5.1.2 การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ

โดยแยกเซลล์สาหร่ายจากอาหารเลี้ยง โดยนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3600 รอบต่อนาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติมเมทานอล 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดพลาสติกขนาดประมาณ 10 มิลลิลิตรที่มีเซลล์สาหร่าย และนำไปต้มในอ่างทำความร้อน (water bath) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 -15 นาที หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3600 รอบต่อนาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนของเหลวใสที่อยู่ด้านบนวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรทันที

3.5.1.3 การหาปริมาณน้ำหนักแห้ง

โดยแยกเซลล์สาหร่ายจากอาหารเลี้ยง โดยนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3600 รอบต่อนาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เซลล์ที่ได้นำไปอบในตู้อบ (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.5.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีการของ Lowly

โดยแยกเซลล์สาหร่ายจากอาหารเลี้ยง โดยนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3600 รอบต่อนาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้วที่มีเซลล์สาหร่าย และนำไปต้มในอ่างทำความร้อน (water bath) ที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที รอจนกระทั่งเย็น แล้วเติมสารผสม (โซเดียมคาร์บอเนต 5 เปอร์เซ็นต์+ คอปเปอร์ซัลเฟต 1 เปอร์เซ็นต์+ โซเดียมโพแทสเซียมเตตระไฮเดรท ในอัตราส่วน 50:1:1 ตามลำดับ, เตรียมสด) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากันโดยเครื่องผสมสาร (vortex) แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที หลังจากนั้นเติม Folin-Ciocalteu reagent 50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วเขย่าผสมให้เข้ากันทันที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร สำหรับการเตรียมโปรตีนมาตรฐาน โดยเตรียมสต็อก (stock) สารละลายของ bovine serum albumin (BSA) ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วนำไปทำการเจือจางเป็นความเข้มข้น 0,10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 ไมโครกรัมต่อ 0.5 มิลลิลิตร แล้วนำแต่ละความเข้มข้น 0.5 มิลลิลิตร ทำตามขั้นตอนข้างต้น

3.1.5.5 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีการ Phenol-sulfuric

โดยแยกเซลล์สาหร่ายและน้ำจากอาหารเลี้ยง โดยนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3600 รอบต่อนาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำส่วนเซลล์ เพื่อวิเคราะห์พอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (พอลิแซ็กคาไรด์ทั้งภายในเซลล์และส่วนที่เคลือบเซลล์รวมกัน) และน้ำ (พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ) อย่างละ 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้ว และเติมสารละลายฟีนอล 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากัน หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟูริกทันที 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสง โดยเครื่อง spectrophoto meter ที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร สำหรับการเตรียมกลูโคสมาตรฐาน โดยนำกลูโคสที่มีความเข้มข้น 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ไมโครกรัม ปรับปริมาตรให้เป็น 1 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว และทำตามขั้นตอนข้างต้น

3.5.1.6 ศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด

โดยเก็บเซลล์สาหร่ายในสภาวะการเลี้ยงจากข้อ 3.5.1 (1) ทุก 9 วัน ก่อนแยกเซลล์ย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ และสภาวะการเลี้ยงจากข้อ 3.5.1 (2), 3.5.1 (3) และ 3.5.1 (4) ที่อายุแตกต่างกันทุก 1 สัปดาห์ นำมาดูดซับตะกั่ว กรองเซลล์สาหร่าย 0.01 กรัม น้ำหนักเปียก โดยใช้ถุงกรองเพลงกั๊ตตอนขนาดช่องตา 60 ไมโครเมตร และใช้น้ำ deionized water ล้างเซลล์ 3 ครั้ง จากนั้นใส่เซลล์ในสารละลายตะกั่ว 10 มิลลิลิตร ในความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 ในขวดรูปชมพู่พลาสติก (polypropylene) ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที หลังจากนั้นแยกเซลล์สาหร่ายออกจากสารละลายตะกั่ว โดยการกรองด้วยถุงกรองขนาด 15 ไมครอน วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย และนำเซลล์สาหร่ายไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้ง

วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (GBC Avanta, Australia) โดยใช้แกรไฟท์ และใช้สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ (Merck) ความเข้มข้น 1000 ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารละลายมาตรฐาน

3.5.2 ศึกษาความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต

โดยนำน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากบ่อบำบัดน้ำเสียกลาง นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (ภาคผนวก ค) และปรับสภาวะระดับพีเอชให้เหมาะสมต่อสาหร่ายขนาดเล็ก 4 ชนิด ในการศึกษาแบบเซลล์ที่มีชีวิต โดยใช้เซลล์สาหร่าย 0.2 กรัม น้ำหนักเปียก (ไม่ใส่เซลล์สาหร่ายเป็นชุดควบคุม) ลงในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 15 ไมโครเมตร ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วตั้งต้นปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับพีเอช 4.5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่พลาสติก (polypropylene) ขนาด 125 มิลลิลิตร และศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโต โดยการวัดระดับพีเอชทุก 2 วัน และชั่งน้ำหนักสาหร่ายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ศึกษาความสามารถในการดูดซับ โดยเก็บน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทุก 2 วัน และหาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้แก่ ไนเตรท-ไนโตรเจน, ไนไตรท์-ไนโตรเจน, แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต (soluble reactive phosphate, SRP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุก 5 วัน (เก็บน้ำ 4 ครั้ง) เป็นเวลา 14 วัน และ BOD (Biological oxygen demand) ในวันเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง (เก็บน้ำ 2 ครั้ง) (ภาคผนวก ง) ภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ วัฏจักร 12 : 12 ที่ความเข้มแสง 30 ไมโครโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส และนำเซลล์สาหร่ายไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้งในวันสุดท้ายของการทดลอง

3.5.3 ศึกษาผลกระทบของตะกั่วโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็กในสภาวะที่มีตะกั่วปนเปื้อน

โดยคัดเลือกสาหร่ายที่มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุด 1 ชนิด เพื่อหาปริมาณกรดอะมิโน cysteine โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยสูตรอาหารที่เหมาะสมของสาหร่ายที่ไม่เติม EDTA โดยนำสาหร่ายเซลล์สดมีปริมาณน้ำหนักแห้งปริมาณ 35 กรัมต่อลิตร ที่ไม่ได้สัมผัสตะกั่ว (ชุดควบคุม) และเซลล์สาหร่ายที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 ในขวดรูปชมพู่พลาสติก (polypropylene) ขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้นแยกเซลล์สาหร่ายออกจากสารละลายตะกั่ว โดยวิธีการปั่นเหวี่ยง 3600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 วัน และนำเซลล์สาหร่าย 100 กรัม น้ำหนักแห้ง บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น นำไปวิเคราะห์ปริมาณ cysteine โดยวิธี High performance liquid chromatography (HPLC) (AOAC, 2005) และนำเซลล์สาหร่ายส่วนหนึ่ง 0.2 กรัม น้ำหนักเปียก มาเลี้ยงต่อในอาหารที่เหมาะสมของสาหร่ายที่ไม่เติม EDTA ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร วัดความสามารถในการเจริญเติบโตโดยวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทุก 2 วัน เป็นเวลา 14 วัน

3.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) และในกรณีมากกว่า 2 ชุดการทดลอง เปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากวิธีการของ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และในกรณี 2 ชุดการทดลอง เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองกลุ่ม (t-test) ทำการทดลองโดยชุดการทดลองละ 4 ซ้ำ

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

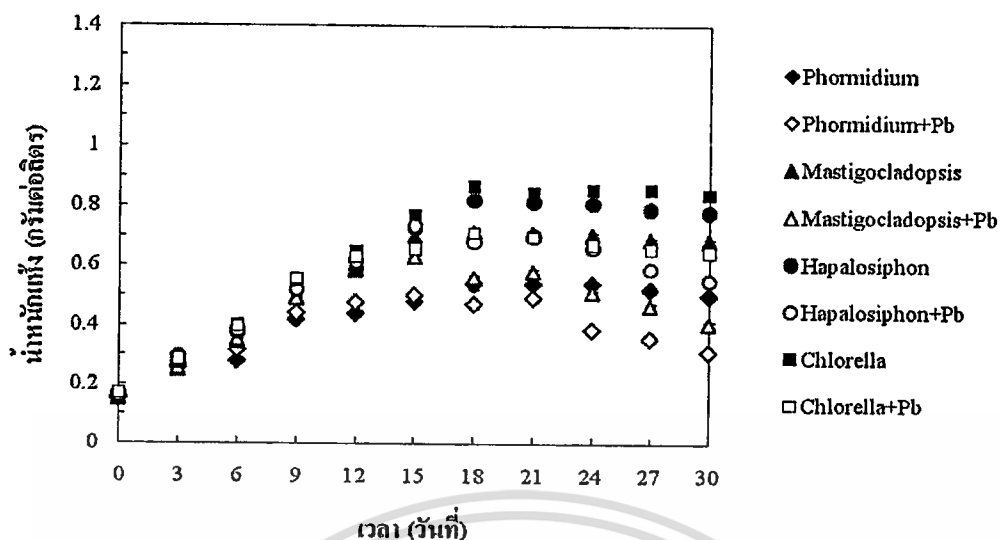
4.1 ผลของสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อให้สาหร่ายมีความสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด

4.1.1 ผลของความสามารถในการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ)

4.1.1.1 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

โดยเลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระดับพีเอช 4.5 (ชุดควบคุม) และในอาหารที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 0 – 9 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 9 – 18 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 3 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 จนกระทั่งสาหร่ายตาย (วันที่ 18 – 30 ของการทดลอง) พบว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว *Chlorella* sp. มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 0.87 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.1) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุด ในวันที่ 18 ของการทดลอง เท่ากับ 0.54 ± 0.02 , 0.72 ± 0.01 และ 0.82 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของสาหร่ายในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Hapalosiphon* sp. มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 0.74 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Chlorella* sp. มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 0.50 ± 0.01 , 0.63 ± 0.01 และ 0.71 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 15, 15 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ โดยน้ำหนักแห้งของสาหร่ายจะเข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยพบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว จะเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 18 ของการทดลอง และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว จะเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 15, 15, 15 และ 18 ของการทดลอง ซึ่งช่วงเวลาของการคงที่นั้นเป็นระยะสั้น แล้วจะเข้าสู่ช่วงการตายอย่างรวดเร็วกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีตะกั่ว

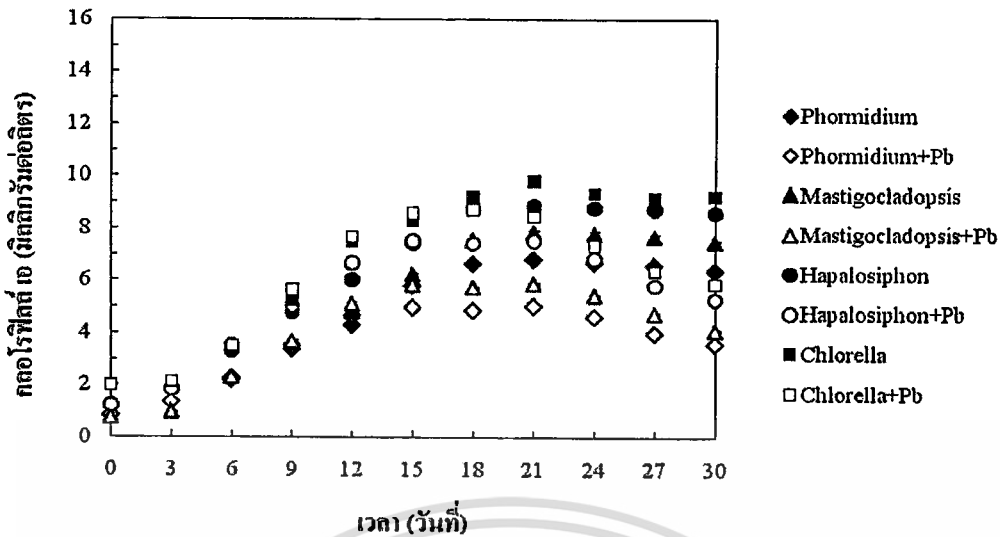


ภาพที่ 4.1 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของตะกั่วแตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5) พบว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว *Chlorella* sp. มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด เท่ากับ 9.80 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 21 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.2) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด ในวันที่ 21 ของการทดลอง เท่ากับ 6.81 ± 0.07 , 7.82 ± 0.10 และ 8.85 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Chlorella* sp. มีคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด เท่ากับ 8.71 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด ในวันที่ 21 ของการทดลอง เท่ากับ 5.00 ± 0.04 , 5.88 ± 0.04 และ 7.52 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายจะเข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยพบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว จะเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 21 ของการทดลอง และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง จะเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 15 ของการทดลอง ซึ่งช่วงเวลาของการคงที่นั้นเป็นระยะสั้น แล้วจะเข้าสู่ช่วงการตายอย่างรวดเร็วกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของตะกั่วแตกต่างกันที่พีเอชค่า (4.5)

การเจริญเติบโตภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่ความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันจากการทดลองครั้งนี้ในช่วงแรกของการทดลองมีความเข้มข้นของตะกั่วในระดับต่ำ (เริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) และสาหร่ายยังมีการเจริญเติบโตแสดงว่ายังทนต่อพิษของตะกั่วความเข้มข้นระดับนี้ได้ ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกันจะมีความเป็นพิษต่อสาหร่ายที่ต่างกัน จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน เช่น การเจริญเติบโตของสาหร่ายสกุล *Chlorella* เมื่อได้รับนิกเกิลมีการเจริญเติบโตลดลง แต่ยังคงแบ่งเซลล์ได้ (Stumm and Morgan, 1996) สาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus abundans* ที่ได้รับ แคดเมียมและคอปเปอร์ที่ระดับ 5-20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 วัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น (Terry and Stone, 2002) ในสาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella vulgaris* ที่ได้รับแคดเมียม 5-10 ไมโครโมลต่อลิตร เป็นเวลา 7 วัน จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง (Huang *et al.* 2009) นอกจากนี้การเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella kesslerii* ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 1.7 นาโนโมล และ 1.6 ไมโครโมล จะมีระยะการเจริญเติบโตเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 10 และ 6 ของการทดลองตามลำดับ (Hassler *et al.* 2005) สำหรับผลของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก จากการศึกษาของ Chen and Pan (2005) ซึ่งได้ศึกษาถึงการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Spirulina* โดยของสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 1, 2, 4, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 7 วัน พบว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มข้นของตะกั่วสูงขึ้น โดยความเข้มข้นต่ำสุดที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาของ Raungsomboon *et al.* (2008) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gloeocapsa sp. เป็นเวลา 10 วัน พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 2.5 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายมีการเจริญเติบโตเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 8 ของการทดลอง ขณะที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าสาหร่ายยังคงมีการเจริญเติบโตต่อไป นอกจากนี้ Choudhary *et al.* (2007) ได้ทดลองถึงผลของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของ *Spirulina platensis* โดยได้รับความเข้มข้นของตะกั่ว ที่ระดับ 0, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เป็นเวลา 11 วัน พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นทำให้การเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้ง) ของสาหร่ายลดลง และที่ความเข้มข้น 0.15 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเจริญเติบโตเข้าสู่ช่วงคงที่ในวันที่ 9 ของการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าสาหร่ายยังคงมีการเจริญเติบโตต่อไป โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ไม่มีตะกั่ว) สาหร่ายยังคงอยู่ในช่วงการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (exponential phase) ซึ่งมีการเจริญเติบโตที่ช้ากว่าสาหร่ายที่เลี้ยงในความเข้มข้นของตะกั่วระดับอื่นๆ

สาหร่ายบางชนิดทนต่อตะกั่วได้สูงและบางชนิดทนได้ต่ำ เช่น *Chlamydomonas reinhardtii* ได้รับตะกั่วเพียง 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้การเจริญเติบโตลดลงถึง 47 เปอร์เซ็นต์ (Vymazal. 1995) ในขณะที่ตะกั่วสูงถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Platymonas subcordiformis* (Hessler. 1974)

สาหร่ายมีกลไกในการทนพิษต่อโลหะหนัก ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากันและเพิ่มระดับความเข้มข้นของตะกั่วเพื่อให้สาหร่ายได้มีการปรับตัว โดยปกติโลหะหนักที่นำเข้าสู่เซลล์ได้ต้องอยู่ในรูปของไอออนหรือรูปอิสระ ซึ่งพบว่าที่เยื่อหุ้มเซลล์อาจสามารถควบคุมการแพร่ผ่านของโลหะหนักได้ ทำให้ไอออนผ่านเข้าไปในเซลล์ได้ยาก หรือผ่านเข้าได้ช้ามาก นอกจากนี้ยังมีกลไกที่สร้างขึ้น เพื่อให้สามารถทนพิษต่อโลหะหนักได้ เช่น ขบวนการทางชีวเคมี (Stockes. 1983) จากการทดลองครั้งนี้ในช่วง 15 วันแรกของการทดลอง พบว่าสาหร่ายในทุกชุดการทดลองยังคงมีการเจริญเติบโต แสดงว่าในช่วงนี้สาหร่ายแต่ละชนิดสามารถทนต่อพิษของตะกั่วโดยอาจใช้กลไกในการลดพิษดังกล่าว และหลังจากนี้การเจริญเติบโตลดลงหรือเซลล์มีการตาย (death phase) เนื่องจากโลหะหนักมีผลในการทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์หรือทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ทำงานผิดปกติ ทำให้เกิดการบวมหรือการขยายขนาดของออร์แกเนลล์ต่าง ๆ หรือทำลายระบบควบคุมสมดุลไอออน อาจทำให้มีการสะสมของโลหะหนักที่ออร์แกเนลล์ส่วนหนึ่งส่วนใดมากเกินไป ออร์แกเนลล์นั้นๆ ถูกทำลาย จึงมีการตายในที่สุด (Jensen *et al.* 1982; Stockes. 1983) ในการทดลองนี้ได้ทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่พีเอชต่ำ (4.5) ซึ่งค่าพีเอชของน้ำหรือสารละลายที่โลหะหนักนั้นละลายอยู่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสาหร่าย เนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่มีความสามารถในการละลายได้ดีที่พีเอชต่ำ

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยในการเลี้ยงที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต เช่นมีรายงานการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeoecapsa gelatinosa* ที่พีเอช 7 (สภาวะควบคุม) และเลี้ยงในสภาวะที่เอซต่ำ (พีเอช 4) เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าที่พีเอช 7 สาหร่ายมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.9 ± 0.3 กรัมต่อลิตร และพีเอชต่ำมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.9 ± 0.1 กรัมต่อลิตร (Ruangsomboon *et al.* 2006b) การเลี้ยงสาหร่าย *Scenedesmus acutus* ที่พีเอชแตกต่างกันระหว่าง 4.5-6.5 เป็นเวลา 7 วัน พบว่าการเจริญเติบโตลดลงเมื่อลดระดับพีเอชต่ำลง (Nalewajko *et al.* 1997) และการเลี้ยงสาหร่ายชนิด *Anacystis nidulans* ที่ระดับ พีเอช 4-10 เป็นเวลา 6 วัน พบว่าที่ระดับพีเอช 4 มีค่าการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ต่ำที่สุด (Papageorgiou and Govindjee. 1971)

การศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Gloeoecapsa* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่พีเอชระดับ 3.5, 4 และ 7 (สภาวะควบคุม) เป็นเวลา 14 วัน พบว่า พีเอชระดับ 3.5 ไม่มีการเจริญเติบโตคือมีค่าคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงตลอดการทดลอง แต่พบว่า พีเอชระดับ 4 สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ช้ากว่าที่พีเอช 7 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง สาหร่ายที่พีเอชระดับ 4 และ 7 มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากกลไกการปรับตัวเพื่อป้องกันตัวเองในสภาวะที่เป็นกรด (Raungsomboon *et al.* 2008)

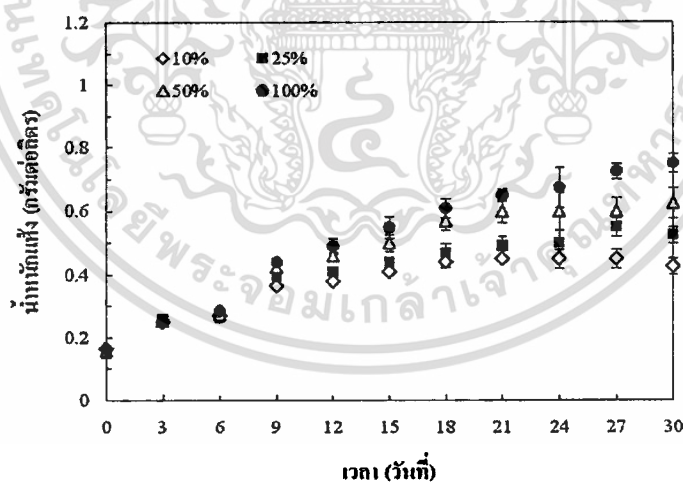
การทดลองนี้พบว่าสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีความรวดเร็วในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน เนื่องจากความสามารถในการทนต่อพีเอชต่ำและตะกั่วได้แตกต่างกัน โดยพบว่า *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตดีที่สุดซึ่งมีรายงานการศึกษากลไกการทำให้เซลล์สามารถทนต่อพีเอชต่ำได้ในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยเซลล์ของสาหร่ายเร่งการนำประจุลบเข้าสู่เซลล์เพื่อทำให้พีเอชภายในเซลล์มีค่าเป็นกลาง เซลล์สาหร่ายจับประจุบวก ซึ่งรวมทั้ง H^+ และไอออนของโลหะอื่นๆ ออกจากเซลล์ และลดการแพร่ผ่านเยื่อเซลล์โดยการเพิ่มการผลิตไขมัน (lipid) ซึ่งทำให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของประจุบวกเข้าสู่เซลล์ นอกจากนี้ยังปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อเซลล์ให้เป็นบวกซึ่งทำให้ประจุบวกแพร่ผ่านเข้าเซลล์ได้ยากมากขึ้น ซึ่งกลไกทั้งหมดนี้สาหร่ายพัฒนาขึ้นเพื่อความอยู่รอดของเซลล์สาหร่ายเอง และยังเป็นไปได้ว่าสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อยู่ในธรรมชาติ สามารถเกิดกลไกในการป้องกันตัวให้มีชีวิตรอดแบบนี้เช่นกัน หากแหล่งอาศัยที่สิ่งมีชีวิตนั้นอาศัยอยู่เกิดภาวะเครียดที่มีทั้งกรดและโลหะหนักเข้ามาในแหล่งที่มันอาศัย (Rai *et al.* 1996)

4.1.1.2 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

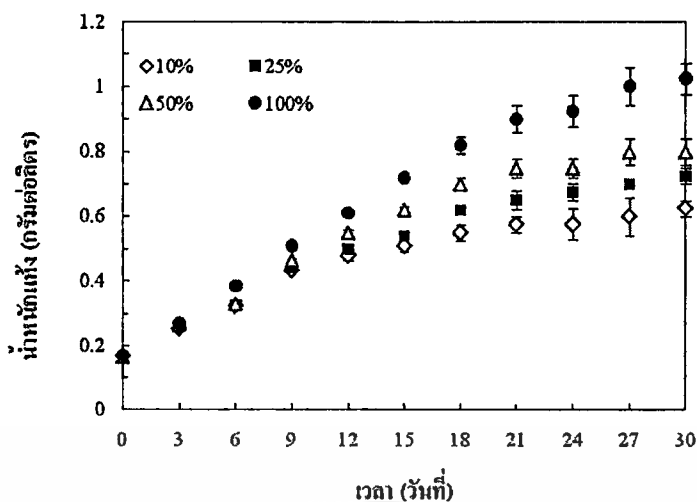
โดยเลี้ยงในอาหารสูตรที่เหมาะสมกับสาหร่ายที่ความเข้มข้นของสารอาหาร 100 (อาหารสูตรปกติ), 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

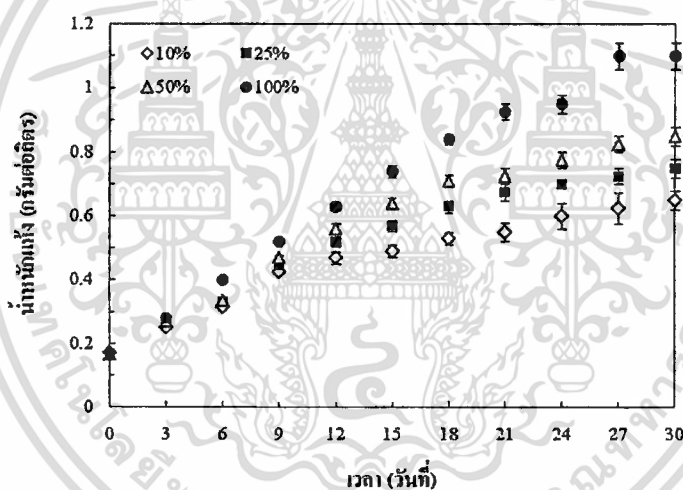
sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 0.75 ± 0.03 , 1.03 ± 0.05 , 1.10 ± 0.04 และ 0.85 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเมื่อเลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 0.63 ± 0.05 , 0.55 ± 0.03 และ 0.45 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27, และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.3) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 0.80 ± 0.04 , 0.73 ± 0.02 , 0.63 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.4) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 0.85 ± 0.03 , 0.75 ± 0.03 และ 0.65 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.5) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 0.75 ± 0.03 , 0.63 ± 0.03 และ 0.55 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6) โดย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันพบว่า การเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้ง) เข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยพบว่า การเลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 24, 21 และ 15 วัน ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 21, 21 และ 18 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 27, 24 และ 21 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 24, 24, 18 และ 15 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

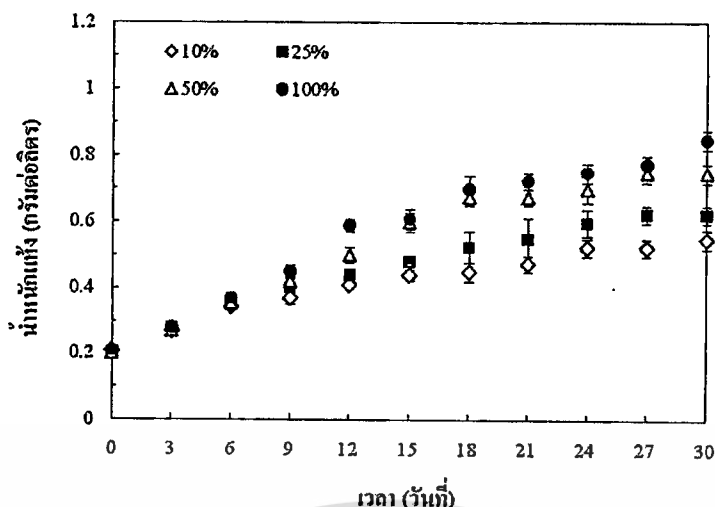


ภาพที่ 4.4 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.5 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

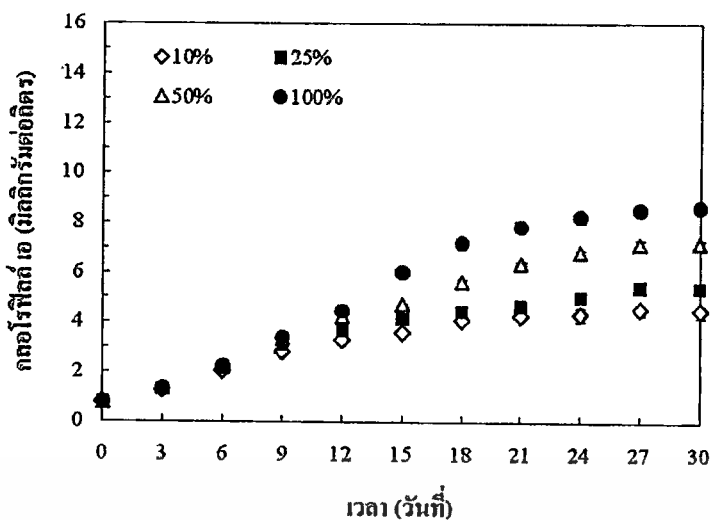
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



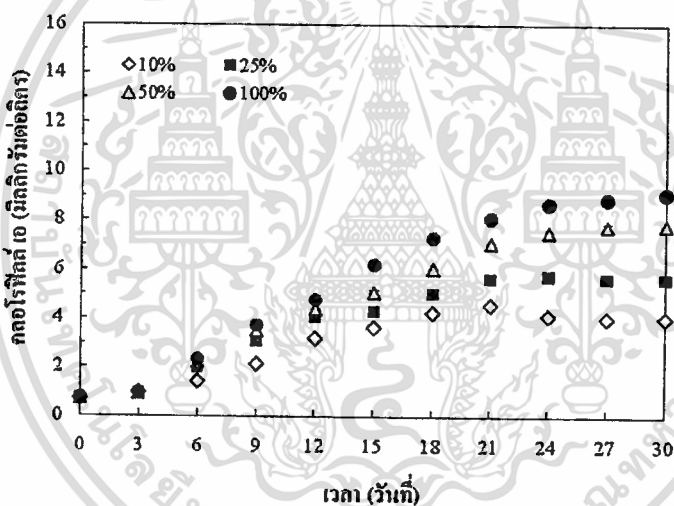
ภาพที่ 4.6 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันพบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ 8.67 ± 0.19 , 9.11 ± 0.16 , 11.20 ± 0.10 และ 14.99 ± 0.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 ของการทดลองตามลำดับ (ภาพที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 7.23 ± 0.13 , 5.44 ± 0.18 และ 4.55 ± 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27, และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.7) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 7.81 ± 0.10 , 5.76 ± 0.17 และ 4.55 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 24 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 9.31 ± 0.12 , 6.93 ± 0.18 และ 5.55 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 12.08 ± 0.26 , 10.45 ± 0.07 และ 8.29 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.10) โดย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันการเจริญเติบโต (ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ) เข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยการเลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 27, 27 และ 18 วัน ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 24, 21 และ 18 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 30, 30, 24 และ 18 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 27, 24 และ 21 วัน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

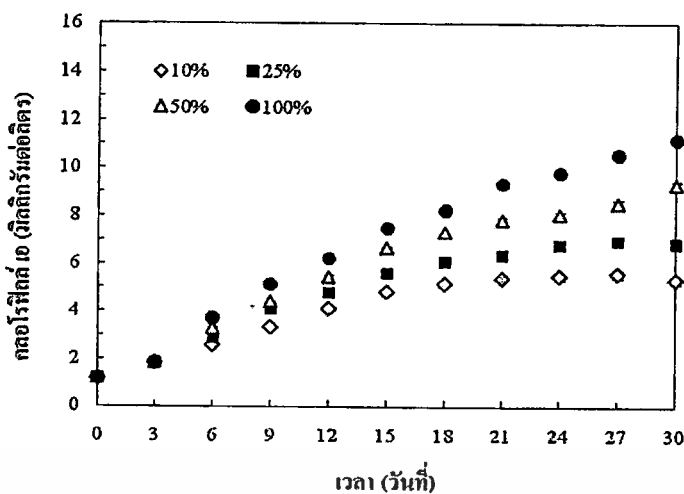


ภาพที่ 4.7 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

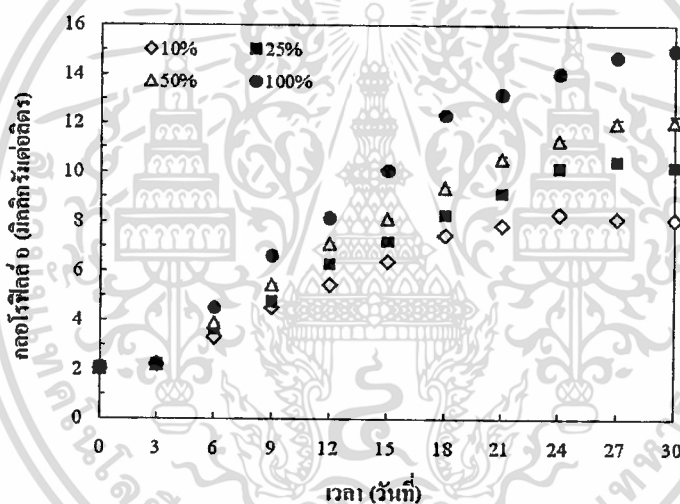


ภาพที่ 4.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีความสามารถในการเจริญเติบโตที่สูงสุดเมื่อเลี้ยงในปริมาณสารอาหาร 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอาหารเป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช โดยเฉพาะองค์ประกอบของคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสโดยแพลงก์ตอนพืชสามารถเจริญเติบโตได้สูงสุดจนกระทั่งสารอาหารเหล่านี้หมด (Schluter, 1998) จากการทดลองพบว่าเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการเจริญเติบโตลดลงและเข้าสู่ช่วงคงที่เร็วกว่า ตามลำดับ โดยในช่วงแรกของการทดลองมีการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และน้ำหนักแห้งที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในช่วงแรกเซลล์ของสาหร่ายสามารถนำสารอาหารไปใช้ได้เต็มที่แต่เมื่อระยะเวลาออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

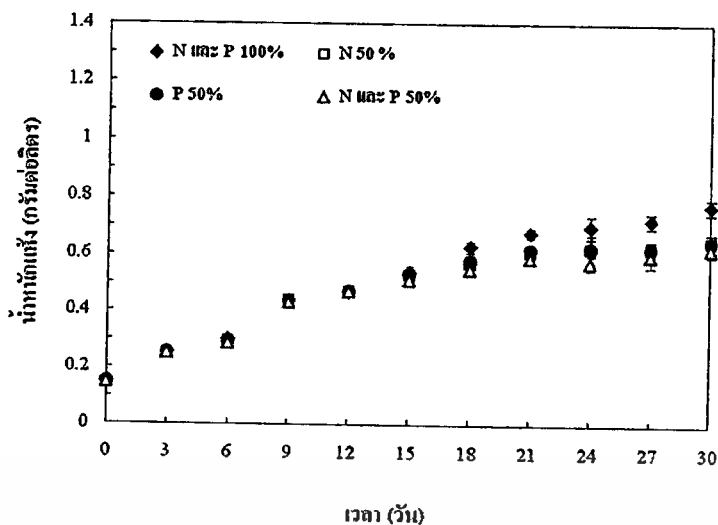
มากขึ้นเซลล์ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำสารอาหารไปใช้ได้ลดลงเนื่องจากมีความเข้มข้นของสารอาหารในระดับต่ำส่งผลให้ไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป (Schluter. 1998) ซึ่งสารอาหารมีผลต่อสรีรวิทยาของสาหร่ายขนาดเล็กรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเจริญเติบโต ขนาดของเซลล์ องค์ประกอบทางชีวเคมี (Lewitus and Caron. 1990) ปริมาณของรงควัตถุ (Sciandra *et al.* 2000) การสังเคราะห์แสงและเมตาบอลิซึมของคาร์บอน (Turpin. 1991) ในการทดลองนี้มีการลดระดับสารอาหารทุกตัวจากสูตรอาหารปกติ ดังนั้นปริมาณสารอาหารจึงสัมพันธ์ในทางเดียวกันกับอัตราการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช (Kozłowska-Szerenos *et al.* 2004) และในการทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของสารอาหารลดลงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากการลดความเข้มข้นของสารอาหารทำให้การเจริญเติบโตถูกจำกัด (Andersen *et al.* 1991) เช่นมีรายงานว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในสาหร่าย *Rhodomonas* sp. พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกันกับความเข้มข้นของสารอาหารหลังจากวันที่ 3 (1.35 ± 0.15 พิโคกรัมต่อเซลล์) ของการเพาะเลี้ยง และสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเซลล์ในวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 7) ซึ่งมีอิทธิพลมาจากความเข้มข้นของสารอาหาร โดยปริมาณผลผลิตสูงสุด ($1.53 \pm 0.07 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร) เมื่อเลี้ยงในความเข้มข้นของอาหารสูงสุด (De la Cruz *et al.* 2006) เมื่อเลี้ยงสาหร่าย *Nannochloropsis gaditana* ในอาหารที่มีคาร์บอนในระดับต่ำทำให้มีปริมาณน้ำหนักรวมสุดท้ายลดลงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับปกติ (Huertas. 2000) การลดแคลเซียมและแมงกานีสจากสารอาหารระดับปกติทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Lyngbya* ลดลง (Tubea *et al.* 1981) นอกจากนี้ในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Chlorococcum humicola* ที่เลี้ยงในสูตรอาหาร Bold' Basal medium ที่มีการลดระดับโซเดียมคลอไรด์ในอาหารจาก 100 มิลลิโมล ถึง 0 มิลลิโมล จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง (Abdel-Rahman *et al.* 2005)

4.1.1.3 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

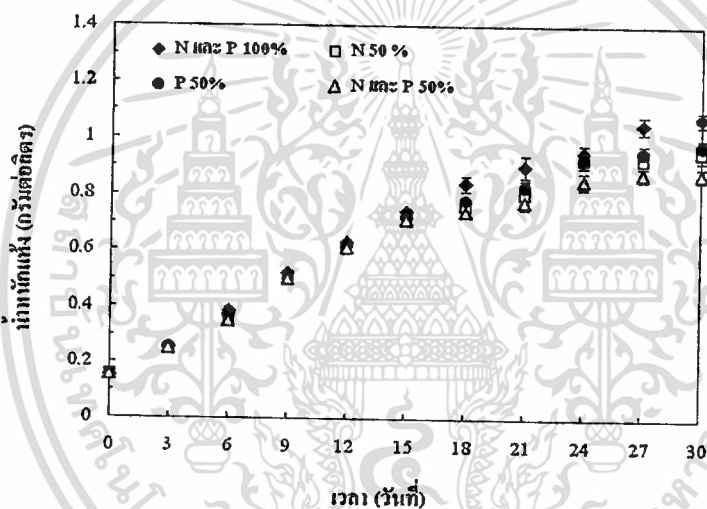
โดยเลี้ยงสาหร่ายในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ (ไนเตรทและฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นชุดควบคุม) และผันแปรสภาวะคือ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าน้ำหนักแห้งสูงสุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ มีค่าเท่ากับ 0.78 ± 0.03 , 1.08 ± 0.02 และ 1.15 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.11, 4.12 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 4.13) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) และ น้ำหนักแห้งสูงสุดของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ มีค่าเท่ากับ 0.85 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.14) ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) โดยน้ำหนักแห้งสูงสุดของสาหร่ายที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ การลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ของ *Phormidium* sp. เท่ากับ 0.65 ± 0.03 , 0.65 ± 0.03 และ 0.63 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.11) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 0.95 ± 0.03 , 0.98 ± 0.03 และ 0.88 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.12) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 0.98 ± 0.03 , 0.98 ± 0.03 และ 0.88 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.13) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 0.78 ± 0.02 , 0.78 ± 0.03 และ 0.75 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.14)

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่ต่างกัน การเจริญเติบโต (น้ำหนักแห้ง) เข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยการเลี้ยงที่มีความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ การลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ การลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 30, 21, 21 และ 21 วัน ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 24, 24 และ 24 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 27, 24 และ 21 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 24, 15, 15 และ 15 วัน ตามลำดับ

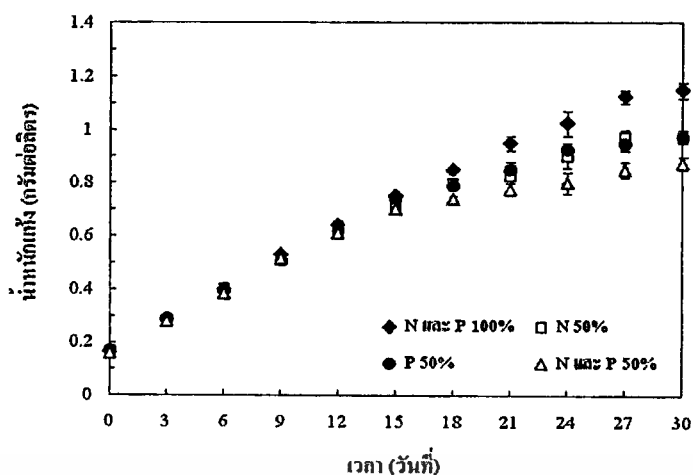


ภาพที่ 4.11 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

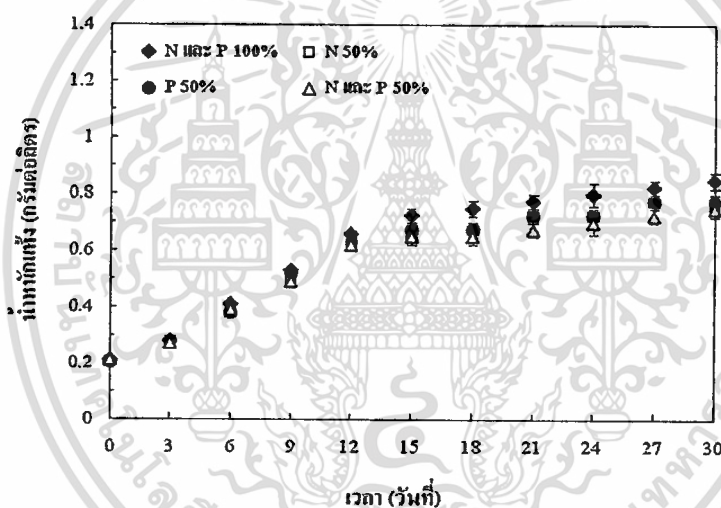


ภาพที่ 4.12 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

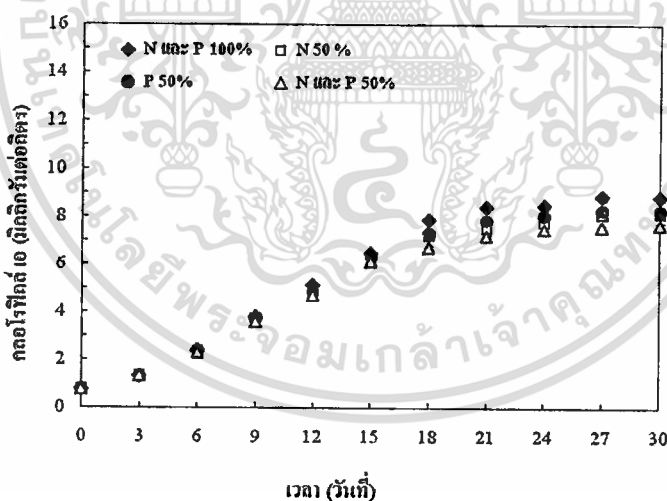


ภาพที่ 4.14 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

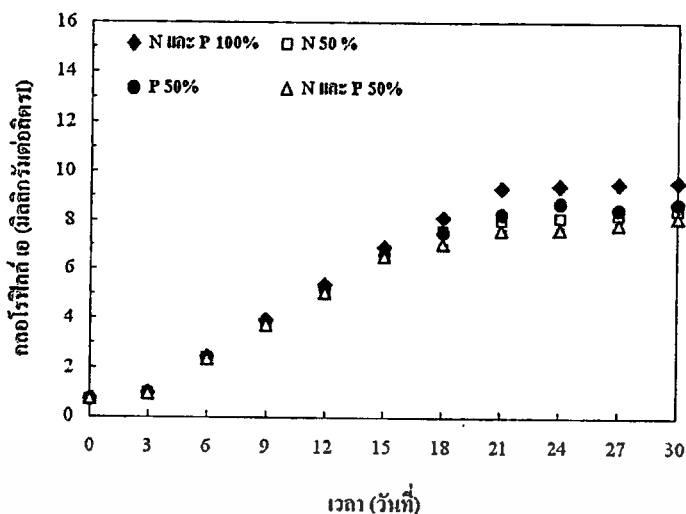
ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟตพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., และ *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ เท่ากับ 8.86 ± 0.16 , 9.60 ± 0.08 , 11.32 ± 0.11 และ 14.10 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30, 30 และ 30 ของการทดลองตามลำดับ (ภาพที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และลดความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ ของ *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 8.16 ± 0.06 , 8.29 ± 0.08 และ 7.67 ± 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.15) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 8.48 ± 0.13 , 8.68 ± 0.11 และ 8.16 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.16) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 10.04 ± 0.09 , 10.40 ± 0.07 และ 9.12 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.17) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 12.65 ± 0.16 , 12.70 ± 0.23 และ 11.69 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.18)

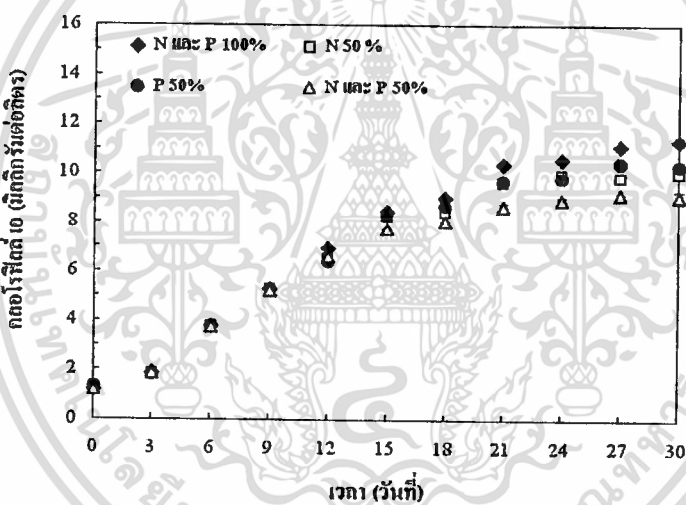
Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่แตกต่างกัน การเจริญเติบโต (คลอโรฟิลล์ เอ) จะเข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยการเลี้ยงที่มีความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ ลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 24, 24 และ 24 วัน ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 21, 21, 21 และ 21 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27, 21, 21 และ 21 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 21, 18, 18 และ 18 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 4.15 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

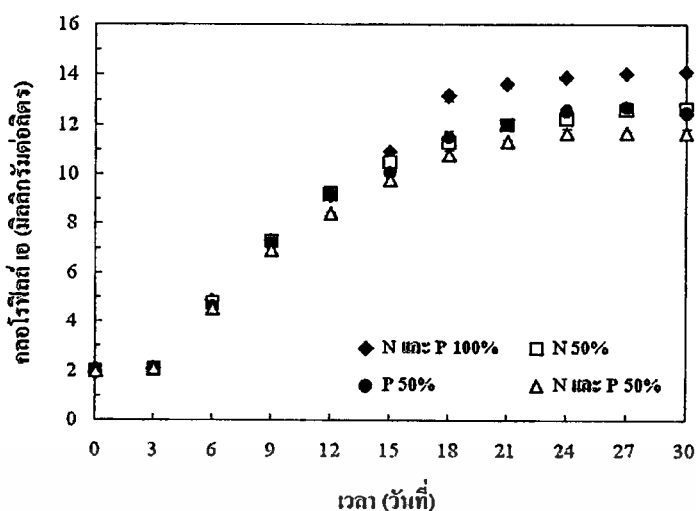


ภาพที่ 4.16 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต



ภาพที่ 4.17 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีความสามารถในการเจริญเติบโตที่สูงสุดเมื่อเลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ (ไนโตรเจนและฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์) และพบว่าเซลล์สาหร่ายกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการเจริญเติบโตลดลง ตามลำดับ โดยกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงแรกของการทดลองใกล้เคียงกัน คือมีการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และน้ำหนักแห้งที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากในช่วงแรกเซลล์ของสาหร่ายสามารถนำสารอาหารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและฟอสเฟตไปใช้ได้เต็มที่ แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นเซลล์ที่เลี้ยงในสารอาหารที่มีการลดไนโตรเจนและฟอสเฟตสามารถนำไนโตรเจนและฟอสเฟตไปใช้ได้ลดลง เนื่องจากมีสารอาหารอยู่จำกัดโดยปกติแล้วไนโตรเจน มีหน้าที่หลักคือการสังเคราะห์ด้วยแสง สร้างรงควัตถุ กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ โดยทั่วไปไนโตรเจนมีประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ ส่วนฟอสฟอรัส เกี่ยวข้องกับขบวนการใช้พลังงาน ขบวนการสร้างกรดนิวคลีอิกของสาหร่าย ถ้าขาดฟอสฟอรัสจะทำให้ปริมาณโปรตีน คลอโรฟิลล์ เอ RNA หรือ DNA ของสาหร่ายลดลง (Xin *et al.* 2010) โดยการใช้ไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงสาหร่ายจะใช้ในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ยูเรีย และรูปอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ไนเตรต ไนไตรท์ แอมโมเนีย เป็นต้น (สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549) จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงในอาหารที่มีการลดไนโตรเจนและฟอสเฟต หรือลดทั้งไนโตรเจนและฟอสเฟตทำให้มีการเจริญเติบโตลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนและฟอสเฟตมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะลดปริมาณผลผลิตของสาหร่ายจึงทำให้มีการเจริญเติบโตลดลง (Malone *et al.* 1996) เช่นมีรายงานของ Eriksen and Iversen (1995) ซึ่งศึกษาการตอบสนองของเซลล์สาหร่าย *Rhodomonas* sp. ต่อการขาดไนโตรเจน พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.5 พิโคกรัมต่อเซลล์ ในช่วง 23 ชั่วโมงแรกของการเลี้ยง แต่หลังจากที่ไนโตรเจนในอาหารหมดไป พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงถึง 0.3 พิโคกรัมต่อเซลล์ Richardson *et al.* (1969) รายงานการศึกษาการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sorokiniana* ในอาหารที่มีปริมาณไนเตรท 20, 10 และ 5 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่าสาหร่ายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ 5.1, 2.0 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การเลี้ยงสาหร่าย *Phaeodactylum tricornutum* ในอาหารที่ลดไนเตรทจาก 5 ถึง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดฟอสเฟต 0.5 ถึง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง โดยมีปริมาณเซลล์สูงสุดเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีไนเตรท 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสเฟต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Okay *et al.* 1997) การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ในสูตรอาหารปกติ และเลี้ยงในสภาวะที่ไม่ได้รับไนเตรท เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่ามีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.9 ± 0.3 และ 1.0 ± 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Ruangsomboon *et al.* 2006b) การเลี้ยงสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* และ *Microcystis wesenbergii* ด้วยอาหารปกติ (ควบคุม) และเลี้ยงในอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน ในอาหารที่ไม่มีฟอสฟอรัส และในอาหารที่ไม่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่าความหนาแน่นของเซลล์ของ *Microcystis* ทั้ง 2 ชนิดในอาหารปกติสูงกว่าในอาหารอื่นๆ และ *M. aeruginosa* และ *M. wesenbergii* มีอัตราการเจริญเติบโตในอาหารปกติ ในอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน ในอาหารที่ไม่มีฟอสฟอรัส และในอาหารที่ไม่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.27 ± 0.01 , 0.23 ± 0.05 , 0.16 ± 0.08 และ 0.15 ± 0.08 ต่อวัน และ 0.24 ± 0.02 , 0.19 ± 0.06 , 0.09 ± 0.03 และ 0.18 ± 0.09 ต่อวัน ตามลำดับ (Imai *et al.* 2009) การเลี้ยงสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ในอาหารที่มีการลดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยลดไนโตรเจนจาก 25 ถึง 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดฟอสฟอรัสจาก 2.0 ถึง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงจาก 1.34 ± 0.08 ถึง $0.32 \pm 0.02 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ 0.98 ± 0.12 ถึง $0.26 \pm 0.01 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และพบว่าความหนาแน่นของเซลล์สูงสุดเมื่อความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเริ่มต้นในอาหารสูงสุด (Xin *et al.* 2010)

การเพิ่มสารอาหารจะทำให้ปริมาณผลผลิตของแพลงก์ตอนพืชเพิ่มมากขึ้น ในสาหร่ายกลุ่ม diatom และ dinoflagellate พบว่าการเพิ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จะเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ถึง 19 และ 35 ไมโครกรัมต่อลิตร จากระดับปกติ (Schluter. 1998) ในสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus obliquus* และไซยาโนแบคทีเรีย *Anacystis nidulans*, *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria rubescens* และ *Spirulina platensis* ที่เจริญเติบโตในอาหารที่มีปริมาณของไนโตรเจนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อมีการเพิ่มระดับไนโตรเจนสาหร่ายทุกชนิดจะมีการเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

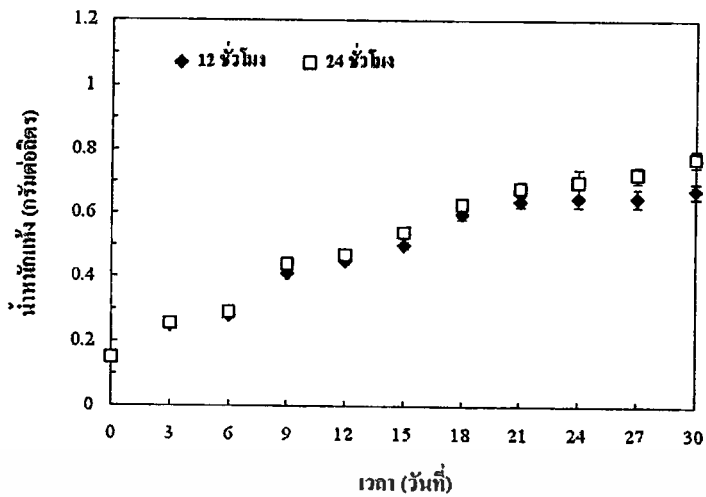
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักแห้งจาก 8 ถึง 450 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Piorreck *et al.* 1984) การเพิ่มไนโตรเจนให้กับสาหร่าย *Lyngbya* จะทำให้เพิ่มการเจริญเติบโต (Tubea *et al.* 1981) ในสาหร่ายบางชนิดอาจตอบสนองต่อการขาดสารอาหารต่างกันในการเจริญเติบโตแม้จะเป็นสกุลเดียวกัน เช่น ความเข้มข้นของไนเตรทในอาหารที่ต่ำทำให้ *Microcystis aeruginosa* และ *Microcystis viridis* มีการเจริญเติบโตลดลง ในขณะที่ฟอสเฟตในอาหารที่ต่ำทำให้ *Microcystis ichthyoblabe* มีการเจริญเติบโตลดลง (Honma and Park. 2005)

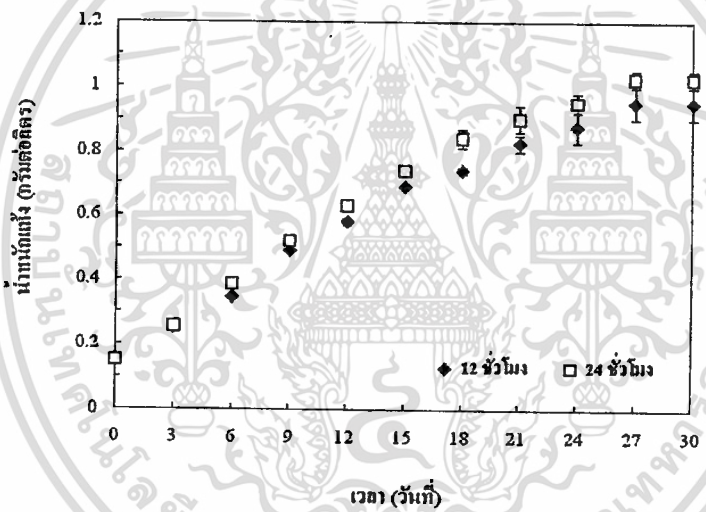
4.1.1.4 น้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน

โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง (24 ชั่วโมงต่อวัน) และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12 (12 ชั่วโมงต่อวัน) พบว่าน้ำหนักแห้งสูงสุดของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง เท่ากับ 0.78 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.19) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร ($p < 0.05$) ส่วนน้ำหนักแห้งสูงสุดของ *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง เท่ากับ 1.03 ± 0.03 , 1.03 ± 0.03 และ 0.83 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.20, 4.21 และ 4.22) แต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร โดยน้ำหนักแห้งสูงสุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร เท่ากับ 0.68 ± 0.03 , 0.95 ± 0.05 , 1.03 ± 0.03 และ 0.80 ± 0.04 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 27, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในการเลี้ยงที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน พบว่าการเจริญเติบโตพิจารณา (น้ำหนักแห้ง) เข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร พบว่า *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 30 และ 21 วัน ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27 และ 27 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 24 และ 30 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 21 และ 24 วัน ตามลำดับ

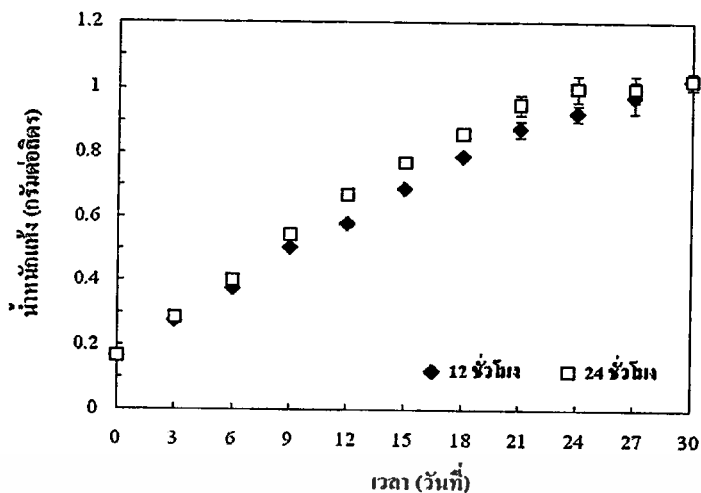


ภาพที่ 4.19 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันที่ได้รับแสงที่แตกต่างกัน

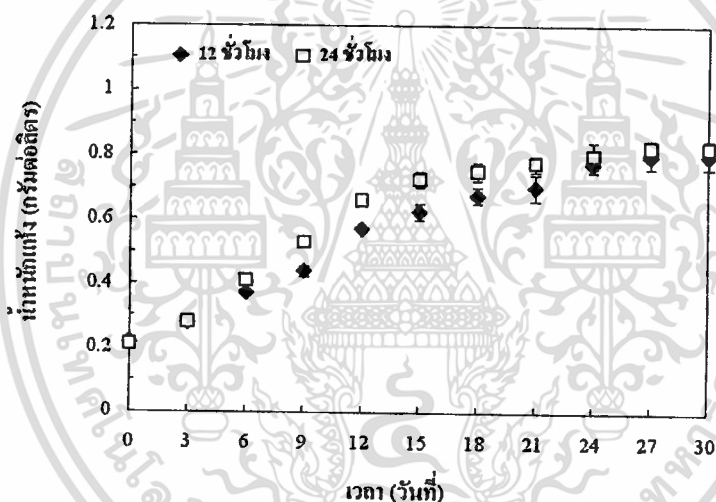


ภาพที่ 4.20 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางวันที่ได้รับแสงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 ปริมาณน้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



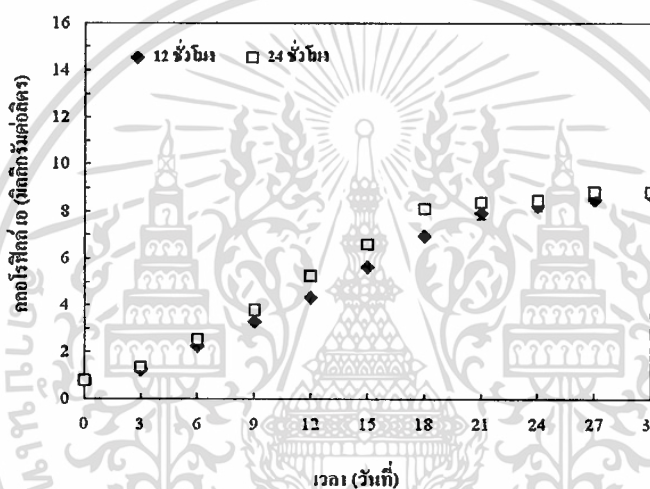
ภาพที่ 4.22 น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน

ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง เท่ากับ 8.86 ± 0.16 , 9.60 ± 0.08 และ 10.53 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.23, 4.24 และ 4.25) แต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร และคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร เท่ากับ 14.41 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.26) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ($p < 0.05$) โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีค่าเท่ากับ 8.67 ± 0.15 , 9.28 ± 0.16 และ 10.52 ± 0.23

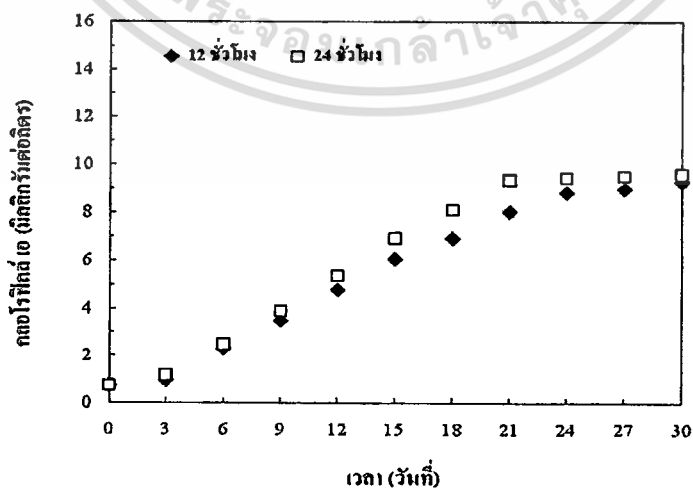
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในวันที่ 30 ของการทดลอง และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ 14.10 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 30 ของการทดลอง

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในการเลี้ยงที่มีช่วงเวลาได้รับแสงที่แตกต่างกัน การเจริญเติบโต (คลอโรฟิลล์ เอ) เข้าสู่ช่วงคงที่ที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่องและกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร พบว่า *Phormidium* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 24 และ 24 ตามลำดับ *Mastigocladopsis* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 21 และ 24 วัน ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27 และ 30 วัน ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เข้าสู่ช่วงคงที่ที่ 27 และ 21 วัน ตามลำดับ



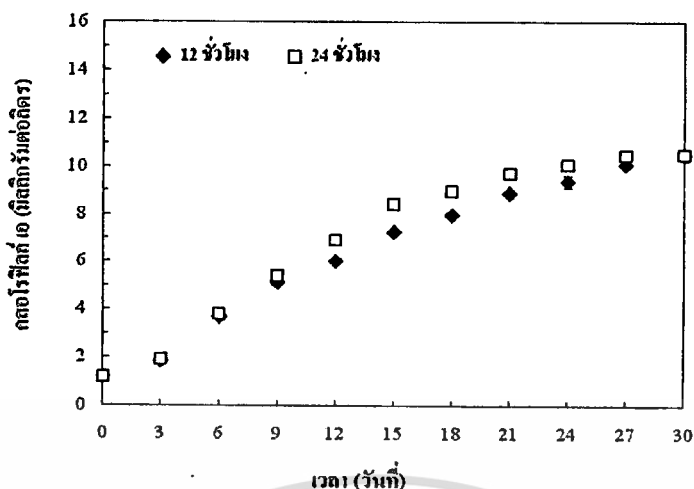
ภาพที่ 4.23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน



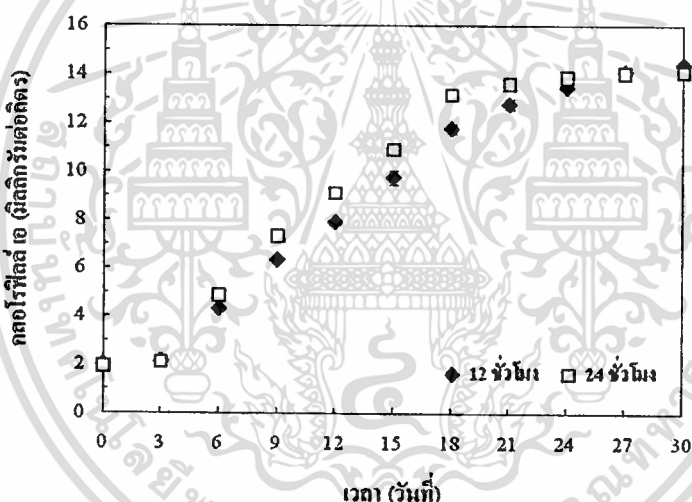
ภาพที่ 4.24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้

สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.26 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในการเลี้ยงที่มีช่วงเวลารับแสงที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาทั้งจากปริมาณน้ำหนักแห้งและคลอโรฟิลล์ เอ พบว่าในช่วงแรกจนกระทั่งวันที่ 6-9 ของการทดลอง จะมีการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกัน และพบว่าโดยรวมสาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะได้รับแสงแบบต่อเนื่องเข้าสู่ช่วงคงที่ที่เร็วกว่าสาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะได้รับแสงแบบวัฏจักร เนื่องจากสาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่อง มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่ามีการรวบรวมการนำสารอาหารมาใช้มากกว่า สารอาหารจึงลดลงเร็วกว่า เพื่อสังเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี และการแบ่งเซลล์เพื่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจริญเติบโต ซึ่งแสงมีผลต่อการดูดซึมสารอาหาร (Sciandra *et al.* 2000) และถ้ามีแสงอย่างต่อเนื่อง ทำให้สารอาหารถูกนำมาใช้อย่างเนื่องเช่นกัน ส่งผลให้สาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะได้รับแสงแบบต่อเนื่องมีสารอาหารลดลงรวดเร็วกว่าสภาวะได้รับแสงแบบวัฏจักร เพราะเซลล์สาหร่ายที่ได้รับแสงแบบวัฏจักรมีทั้งช่วงไม่ได้รับแสงซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงที่สาหร่ายไม่มีการดูดซึมสารอาหารไปใช้ทำให้การนำสารอาหารไปใช้ต่ำกว่า จึงเข้าสู่ช่วงคงที่ช้ากว่าและมีการเจริญเติบโตช้ากว่าด้วย ทั้งนี้แสงและสารอาหาร มีผลต่อสรีรวิทยาของสาหร่ายขนาดเล็กรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเจริญเติบโต ขนาดของเซลล์ องค์ประกอบทางชีวเคมี (Lewitus and Caron. 1990) และปริมาณของรงควัตถุ (Sciandra *et al.* 2000) เช่น การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Parietochloris incisa* ที่ความเข้มแสง 35, 200 และ 400 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 14 วัน พบว่าที่ความเข้มแสงสูงมีการเจริญเติบโตสูงกว่าที่ความเข้มแสงต่ำ โดยพบว่ามีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 4.2, 7 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Solovchenko *et al.* 2008) ในสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* และ *Microcystis wesenbergii* ที่เลี้ยงด้วยความเข้มแสง 60, 30 และ 0 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าความหนาแน่นของเซลล์ของ *Microcystis* ทั้ง 2 ชนิดที่ความเข้มแสง 60 และ 30 สูงกว่า 0 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที และพบว่า *M. aeruginosa* และ *M. wesenbergii* มีอัตราการเจริญเติบโตที่ความเข้มแสง 60, 30 และ 0 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.20 ± 0.04 , 0.21 ± 0.08 และ 0.12 ± 0.01 ต่อวัน และ 0.17 ± 0.09 , 0.15 ± 0.08 และ 0.06 ± 0.04 ต่อวัน ตามลำดับ (Imai *et al.* 2009) นอกจากนี้ในการศึกษาของ Meeson and Sweeney (1982) พบว่าการเจริญเติบโตโดยอัตราการแบ่งเซลล์ของ *Ceratium furca* เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงจาก 500 ถึง 1500 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (20 ถึง 68 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที) แต่แตกต่างจากการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียว *Haematococcus pluvialis* ภายใต้อุณหภูมิและความเข้มแสงระดับ 40, 50 และ 60 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยได้รับแสงต่อเนื่อง พบว่าที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิและความเข้มแสง 40 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที มีเจริญเติบโตสูงสุดเท่ากับ 9.50×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแสงที่ 40 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงาน และความเข้มแสงที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดสาหร่ายด้วย (Imanoglu *et al.* 2007) ซึ่งอาจมาจากถิ่นที่อยู่ที่แตกต่างกันในธรรมชาติ

การลดลงของรงควัตถุเกิดขึ้นโดยกระบวนการควบคุมอัตโนมัติ (autoregulation) ของระบบการสังเคราะห์แสงซึ่งจะสมดุลระหว่างปริมาณแสงที่ได้รับ ช่วงเวลาที่ได้รับแสงต่อความต้องการใช้พลังงานที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก (Falkowski and La Roche. 1991) ระยะเวลาที่มีแสงในธรรมชาติเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง และความเข้มแสงก็ผันแปรในระหว่างวัน อย่างไรก็ตาม ในหลายๆ การศึกษาพบว่าความต้องการพลังงานในการสังเคราะห์แสงต่อการเจริญเติบโตที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายต่อความเหมาะสมของช่วงเวลาที่ได้รับแสง (Loogman *et al.* 1980) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ควบคุมความเข้มแสงที่เท่ากันแต่แตกต่างที่ช่วงเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับแสงของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. การเจริญเติบโตของสาหร่ายทุกชนิดแสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาที่ได้รับแสงนานกว่ามีความสามารถในการเจริญเติบโตมากกว่าจนกระทั่งในช่วงวันที่ 27-30 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องในหลายรายงาน เช่น การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ภายใต้สภาวะที่ความเข้มแสง 400 ไมโครไฮสไตน์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ได้รับแสง 24 ชั่วโมง และ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าปริมาณน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.9 ± 0.3 และ 0.6 ± 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Ruangsomboon *et al.* 2006b) การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Nostoc* sp. Mac ภายใต้แสงสีขาวที่ความเข้มแสง 30 ไมโครไฮสไตน์ต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยได้รับแสงแบบต่อเนื่อง และแบบวัฏจักร 14:10 เป็นเวลา 18 วัน พบว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร 14:10 มีกิจกรรมการสังเคราะห์แสงของคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่อง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสาหร่ายที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่องมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงกว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร (Austin *et al.* 1996) การเลี้ยงสาหร่าย *Ceratium furca* และ *Ceratium fusus* ที่ความเข้มแสงเหมาะสมแต่แตกต่างกันที่ช่วงเวลาได้รับแสง 14:10, 12:12 และ 10:14 พบว่าสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดนี้ที่มีช่วงเวลาได้รับแสง 14:10 และ 12:12 มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.72 ต่อวัน และ 0.56 ต่อวัน ตามลำดับ โดยมากกว่าและแตกต่างกับช่วงเวลาได้รับแสง 10:14 (Baek *et al.* 2008) การศึกษาช่วงเวลาที่ได้รับแสงของ *Tetraselmis chui* (strain PLY 429) เป็นเวลา 28 วัน โดยช่วงเวลาที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร (24:0, 16:8, 12:12 และ 8:16) พบว่าช่วงเวลาที่ได้รับแสงนานจะให้ผลผลิตสูงกว่าช่วงเวลาที่ได้รับแสงสั้น (Meseck *et al.* 2005)

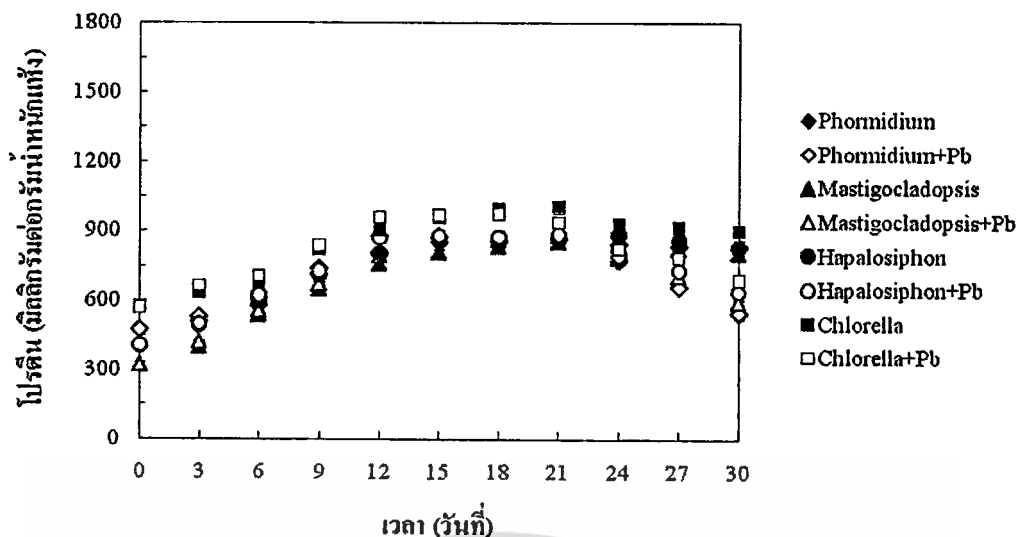
นอกจากนี้ ธิดารัตน์ น้อยรักษา และคณะ (2547) ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก *Nitzschia cf. ovalis* ภายใต้ระยะเวลาการให้แสงสว่าง 12 และ 16 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน แสงฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสง 143 ไมโครไฮสไตน์ต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าระยะเวลาการให้แสง 16 ชั่วโมง มีการเจริญเติบโตดีกว่า โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 1.74 ต่อวัน และจำนวนเซลล์สูงสุด 8.09×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สมถวิล จริตควร และอมรรัตน์ ชมรุ่ง (2550) ศึกษาการเจริญเติบโตของ *Nannochloropsis oculata* ระยะเวลาการให้แสง : ไม่ให้แสง ที่ 24:0, 18:6, 14:10 และ 12:12 พบว่าสาหร่ายที่ได้รับแสง 24:0 มีการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.47 ต่อวัน อย่างไรก็ตามปริมาณแสงและช่วงเวลาได้รับแสงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ทั้งนี้บางชนิดต้องการช่วงมืดเพื่อการเจริญเติบโตปกติ

4.1.2 ผลของปริมาณโปรตีนของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

4.1.2.1 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

โดยเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระดับพีเอช 4.5 (ชุดควบคุม) และในอาหารที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 0 – 9 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 9 – 18 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 3 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 จนกระทั่งสาหร่ายตาย (วันที่ 18 – 30 ของการทดลอง) พบว่า *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วมีโปรตีนสูงที่สุด ในวันที่ 21 ของการทดลอง เท่ากับ 1007.50 ± 27.66 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว (ภาพที่ 4.27) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. มีโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 871.23 ± 23.56 , 855.58 ± 11.85 และ 882.93 ± 5.29 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 21 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของสาหร่ายในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Chlorella* sp. มีโปรตีนสูงที่สุดในวันที่ 18 ของการทดลอง เท่ากับ 972.70 ± 16.85 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่ไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) โดย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. มีโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 878.41 ± 16.40 , 884.28 ± 6.28 และ 887.83 ± 17.22 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 15 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ



ภาพที่ 4.27 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

จากการทดลองพบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วในช่วงแรกจนถึงวันที่ 15, 21, 21 และ 15 ของการทดลองตามลำดับ มีปริมาณ โปรตีนมากกว่าที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว การที่สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วในช่วงแรกที่มีปริมาณ โปรตีนมากกว่าที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วอาจเนื่องมาจากกลไกการลดพิษของโลหะหนัก โดยสาหร่ายมีกลไกการลดพิษอย่างหนึ่งคือ กลไกการสร้างลิแกนด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีนเพื่อให้ลิแกนด์นำโลหะหนักออกนอกเซลล์หรือปล่อยลิแกนด์ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อให้ออกกับโลหะหนักที่อยู่ภายนอกเซลล์ซึ่งทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โลหะหนักเหล่านั้นเข้ามาในเซลล์ได้ ซึ่งกลไกการสร้างลิแกนด์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อต้องการตอบสนองต่อโลหะที่เป็นพิษ (Stockes, 1983) นอกจากนี้พบว่าสาหร่ายหลายชนิดสามารถใช้โปรตีนบริเวณผนังเซลล์ในการจับโลหะหนัก จากการศึกษาขององค์ประกอบของเมือกที่หุ้มเซลล์สาหร่ายชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* พบว่ามีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ 28.2 เปอร์เซ็นต์ (Ruangsomboon *et al.* 2006b) ส่วนสาหร่ายชนิด *Calothrix marchica* โปรตีนเป็นองค์ประกอบ 34.7 เปอร์เซ็นต์ (Ruangsomboon *et al.* 2006a) และการแพร่กระจายโลหะหนักไปในส่วนต่างๆ ของเซลล์นั้น โลหะหนักอาจมีการจับกับโปรตีน และไลโปโปรตีน (lipoprotein) ในเซลล์ทำให้โลหะหนักนั้นไม่เป็นพิษกับเซลล์ หรือเป็นวิธีการลดความเป็นพิษของโลหะหนักของเซลล์ด้วยวิธีหนึ่ง จากการศึกษาครั้งนี้ในช่วงแรกของการเจริญเติบโตของสาหร่ายภายใต้อาหารที่มีตะกั่วจึงส่งผลให้มีการเพิ่มปริมาณโปรตีน จากการศึกษาของ Osmar *et al.* (2004) ศึกษาปริมาณโปรตีนในรูปที่ละลายได้ (soluble protein) ในสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของโคบอลต์ที่แตกต่างกัน พบว่าโคบอลต์

ที่ความเข้มข้นสูงกว่าสามารถกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์ทางชีวภาพของกรดอะมิโนใน *Scenedesmus obliquus* ได้สูงกว่า และการศึกษาของ Omar (2002) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสังกะสี 0.0 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อปริมาณกรดอะมิโนในสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* และ *Scenedesmus quadricauda* ที่ระยะเวลาในการสัมผัสสังกะสี 10 วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดอะมิโนรวมของ *S. obliquus* และ *S. quadricauda* มีค่าเท่ากับ 86.7 และ 99.7 เปอร์เซ็นต์ และ 88.9 และ 98.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในการทดลองนี้พบว่าหลังจากที่สาหร่ายทุกชนิดได้มีการเพิ่มปริมาณโปรตีนในช่วงแรกแล้วในเวลาต่อมา พบว่าสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วมีโปรตีนต่ำกว่าที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว เนื่องจากโลหะหนักมีผลในการทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์หรือทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ทำงานผิดปกติ ทำให้เกิดการบวมหรือการขยายขนาดของออร์แกเนลล์ต่างๆ หากมีการสะสมที่ออร์แกเนลล์ส่วนหนึ่งส่วนใดมากเกินไป ออร์แกเนลล์นั้นๆ จะถูกทำลายได้ และอาจทำให้หยุดการสังเคราะห์สารต่างๆ หรืออาจทำให้เซลล์ตายในที่สุด จึงส่งผลให้โปรตีนลดลงในที่สุด

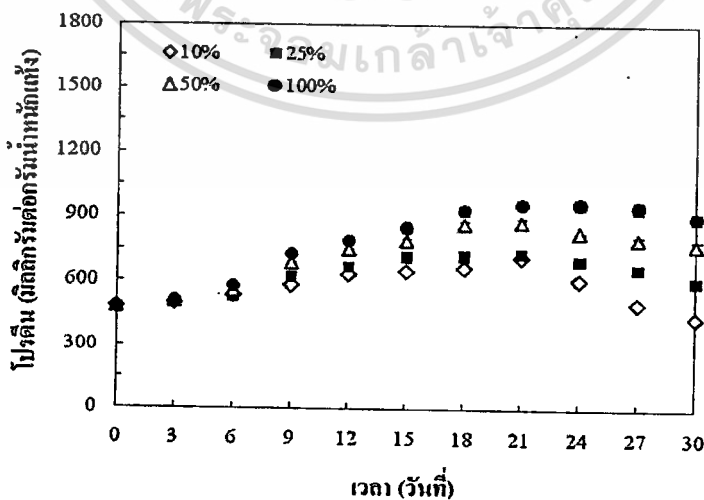
โดยปกติโลหะหนักที่จะนำเข้าสู่เซลล์ได้ต้องอยู่ในรูปของไอออนหรือรูปอิสระ จากนั้นไอออนของโลหะหนักจะผ่านเข้าผนังเซลล์หรือถูกดูดซับ จากการศึกษาครั้งนี้ได้เลี้ยงสาหร่ายที่พีเอชต่ำ (4.5) ในอาหารที่มีตะกั่ว จึงยังส่งผลทำให้ตะกั่วสามารถเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้น โดยค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของโลหะหนัก เช่น ตะกั่วในแหล่งน้ำสามารถปรากฏอยู่ในรูปไอออนอิสระ Pb^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำ (Schuthess and Huang, 1990) และตะกั่วจะแตกตัวอยู่ในรูปไอออนอิสระที่พีเอชไม่เกิน 4.5 ทำให้ตะกั่วอยู่ในรูปที่เข้าสู่เซลล์ได้ เซลล์จึงต้องตอบสนองในการสร้างองค์ประกอบของโปรตีนในเบื้องต้นเพื่อป้องกันตัวเองมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายที่พีเอชต่ำในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว เช่น จากการศึกษาของ Franklin *et al.* (2000) ศึกษาผลของคอปเปอร์และยูเรเนียม ที่ระดับพีเอช 5.7 และ 6.5 ต่อความไวในการดูดซับ ในสาหร่ายสีเขียว *Chlorella sp.* พบว่าความเข้มข้นของโลหะเท่ากันแต่แตกต่างกันที่ระดับพีเอชจะทำให้ *Chlorella sp.* มีความไวต่อคอปเปอร์เพิ่มขึ้น 20 เท่า หรือดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.7 เป็น 14 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6.5 และ 5.7 ตามลำดับ และมีความไวต่อยูเรเนียม หรือดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 13 เป็น 34 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6.5 และ 5.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อพีเอชต่ำลงจะกระตุ้นให้ไอออนของโลหะหนักถูกดูดซับเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อเลี้ยง ไปสักระยะหนึ่งแม้มีการเปลี่ยนถ่ายอาหารใหม่แต่ความเข้มข้นของตะกั่วมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้กลไกการทนพิษมีขอบเขตจำกัด ทำให้ปริมาณโปรตีนเข้าสู่ช่วงคงที่หรือไม่เพิ่มขึ้นและหลังจากนั้นลดลงในที่สุดซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์มีการตายเกิดขึ้นแล้วเมื่อพิจารณาจากการเจริญเติบโตร่วมด้วยจะเห็นว่าเป็นช่วงการเจริญเติบโตที่คงที่ ดังนั้นข้อจำกัดโดยรวมของการนำสาหร่ายที่มีชีวิต ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักนอกห้องปฏิบัติการ คือเซลล์สาหร่ายไม่

สามารถทนต่อพีเอชต่ำ ไม่สามารถทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูงเกินไป (Donmez *et al.* 1999)

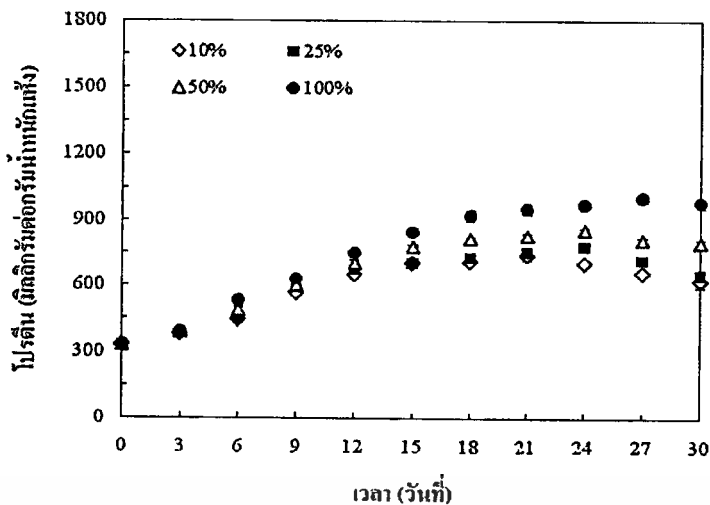
4.1.2.2 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

โดยเลี้ยงสาหร่ายภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า โปรตีนสูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 963.07 ± 23.67 , 1004.67 ± 20.95 , 1301.45 ± 19.26 และ 1654.31 ± 24.83 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 24, 27, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณโปรตีนสูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 876.21 ± 21.01 , 730.78 ± 19.64 และ 715.68 ± 8.98 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 21, และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.28) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 856.55 ± 6.68 , 780.31 ± 3.90 และ 737.21 ± 20.75 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 24, 24 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.29) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 1103.69 ± 19.48 , 930.06 ± 20.83 และ 803.31 ± 13.92 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 27 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.30) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 1365.56 ± 28.63 , 1110.53 ± 31.28 และ 1051.18 ± 34.52 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 24 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.31)

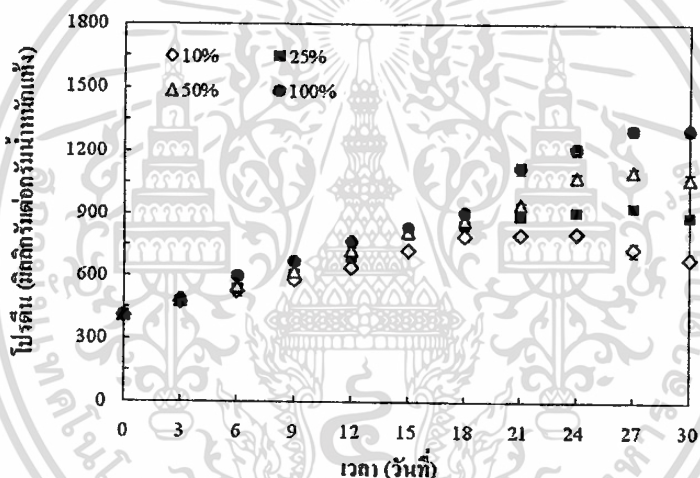


ภาพที่ 4.28 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

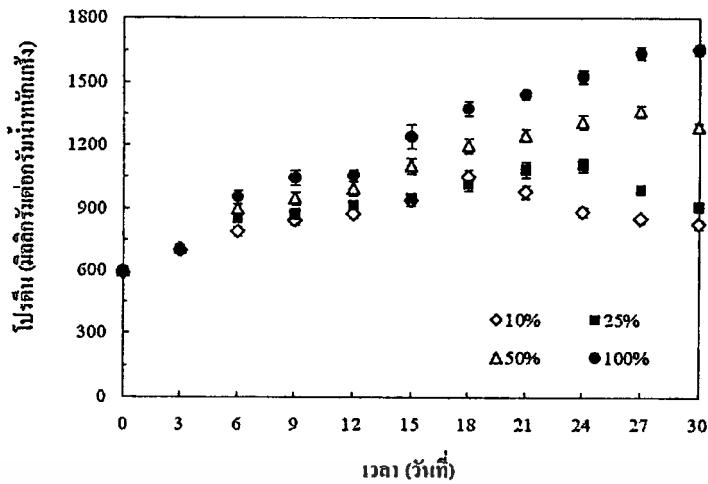
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.30 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.31 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

ในการทดลองนี้พบว่าปริมาณโปรตีนในสาหร่ายทุกชนิดมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารอาหาร และมีค่าใกล้เคียงกันเพียง 3 วันแรกของการทดลองเท่านั้น และหลังจากนั้นปริมาณโปรตีนเริ่มแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารอาหาร เนื่องจากอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่สาหร่ายนำมาสังเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์หรือเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานที่เพียงพอต่อการสังเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีต่อกิจกรรมต่างๆ ภายในเซลล์ให้เป็นปกติแล้วยังต้องใช้พลังงานเหล่านั้นเพื่อการดำรงชีวิต การเจริญเติบโตหรือการแบ่งเซลล์ (Schluter, 1998) ดังนั้นจากการทดลองนี้พบว่าเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์จึงมีปริมาณโปรตีนลดลง ตามลำดับ แต่พบว่าปริมาณโปรตีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งวันที่ 15 - 18 ของการทดลอง แต่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารอาหาร เพราะสาหร่ายพยายามรักษาสมดุลระหว่างสารอาหารที่อยู่ภายนอกเซลล์กับระดับกิจกรรมที่ใช้ภายในเซลล์เพื่อการสังเคราะห์โปรตีน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปเซลล์ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำสารอาหารไปใช้ได้ลดลงเนื่องจากมีความเข้มข้นของสารอาหารในระดับต่ำส่งผลให้ไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในสังเคราะห์โปรตีนต่อไป (Lewitus and Caron, 1990) ดังนั้นปริมาณโปรตีนจึงมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับการเจริญเติบโตด้วย เช่นมีรายงานว่า การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในสาหร่าย *Neochloris oleoabundans*, *Bracteacoccus grandis* และ *Phaeodactylum tricornutum* พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดอยู่ในช่วง 55-70% ของน้ำหนักรวมที่ระยะปลายการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (late log phase) และมีปริมาณลดลงในช่วงปลายระยะคงที่ (late stationary phase) (Gatenby et al. 2003)

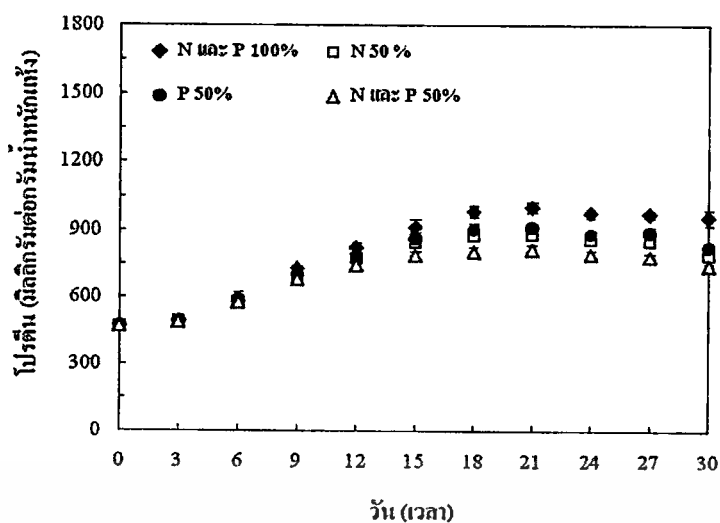
การเลี้ยงสาหร่าย *Alexandrium tamareuse* ภายใต้เหล็กที่เข้มข้นแตกต่างกันจากระดับ 1 ไมโครโมล, 10 และ 1 นาโนโมล ตามลำดับ พบว่าปริมาณโปรตีนต่อเซลล์เพิ่มขึ้นในช่วงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

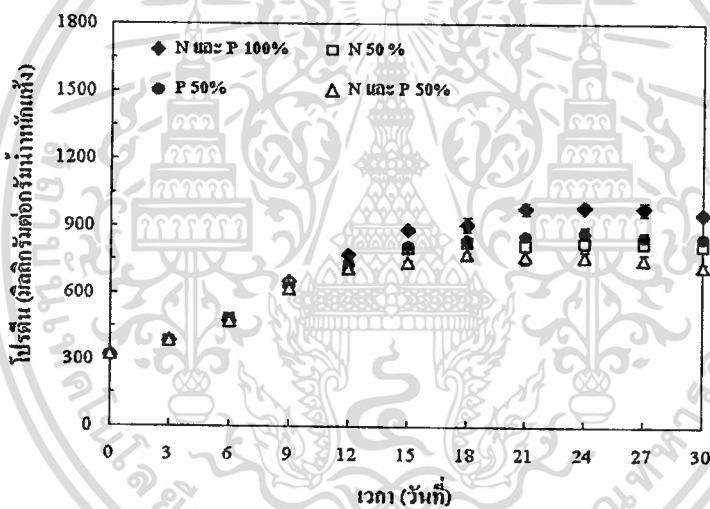
เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (log phase) และลดลงในช่วงการเจริญเติบโตคงที่ (stationary phase) และที่เลี้ยงภายใต้เหล็กที่เข้มข้น 1 ไมโคร โมล มีปริมาณโปรตีนต่อเซลล์สูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.186 ± 0.006 นาโนกรัมต่อเซลล์ (He *et al.* 2010) ในสาหร่ายขนาดเล็ก *Rhodella reticulata* ที่เลี้ยงภายใต้ไนเตรทที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อลดไนเตรทในอาหารจะลดการดูดซึมซัลเฟตเข้าสู่เซลล์สาหร่ายด้วย ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนและการเจริญเติบโต (Arad *et al.* 1992)

4.1.2.3 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

โดยเลี้ยงสาหร่ายในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ (ไนเตรทและฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นชุดควบคุม) และผันแปรสภาวะคือ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของ ฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของ ไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ มีโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 1001.63 ± 24.54 , 985.68 ± 20.30 , 1263.92 ± 28.94 และ 1643.39 ± 27.26 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 24, 27 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.32, 4.33, 4.34 และ 4.35) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเมื่อเลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ของ *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 858.07 ± 10.77 , 912.92 ± 19.00 และ 815.59 ± 18.85 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 24, 21 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.32) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 828.76 ± 21.42 , 872.73 ± 27.37 และ 777.04 ± 8.17 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18, 24 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.33) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 1035.49 ± 26.70 , 1126.49 ± 28.03 และ 910.30 ± 20.37 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 27 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.34) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 1356.67 ± 20.20 , 1486.43 ± 39.49 และ 1297.96 ± 30.65 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18, 24 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.35)

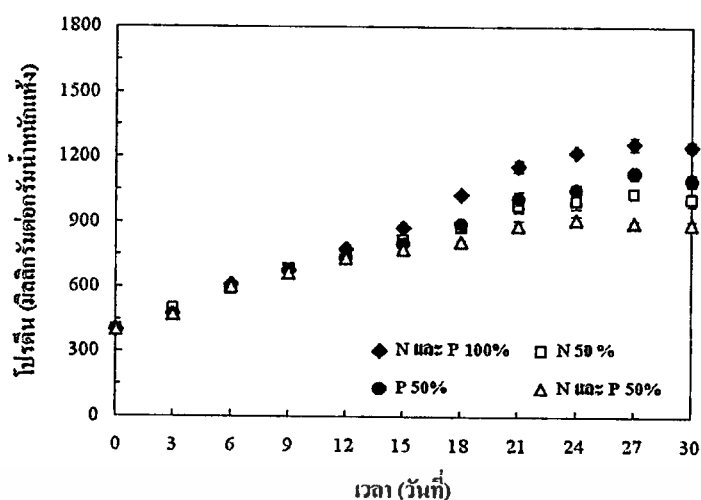


ภาพที่ 4.32 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณ ไนโตรเจนและฟอสเฟต

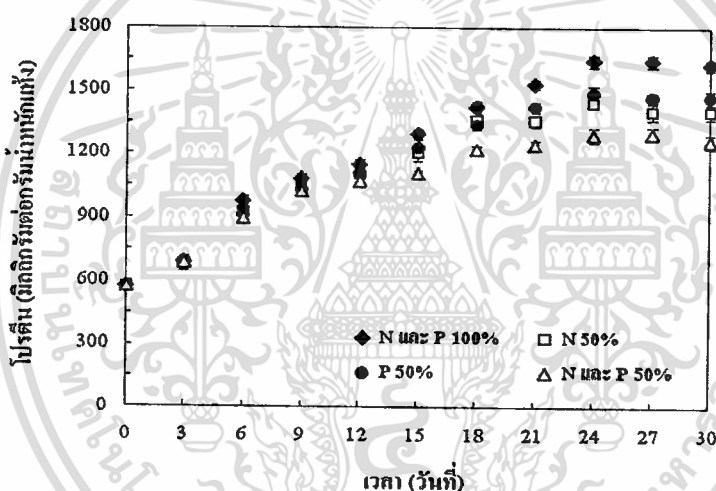


ภาพที่ 4.33 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.34 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต



ภาพที่ 4.35 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

การศึกษาปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต พบว่าปริมาณโปรตีนในสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงในอาหารที่มีการลดไนโตรเจนและฟอสเฟตหรือลดทั้งไนโตรเจนและฟอสเฟตมีปริมาณโปรตีนต่ำลง ตามลำดับ โดยไนโตรเจนสามารถเหนี่ยวนำการควบคุมการสร้างโปรตีนชนิดต่างๆ และโปรตีนเหล่านั้นได้แก่พาหะขนส่งไนโตรเจนซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ไนโตรเจน นอกจากนั้นไนโตรเจนยังเหนี่ยวนำให้ยับยั้งการควบคุมการสร้างโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ซึ่งเร่งปฏิกิริยารีดักชัน ส่งผลต่อเอนไซม์ในวิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) และไกลโคไลซิส (glycolysis) เพื่อเบนจากการสังเคราะห์น้ำตาลและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้ง มาสู่การสังเคราะห์กรดอินทรีย์ (Tsujiimoto *et al.* 2007) โดยไนเตรทจะเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ และแอมโมเนียม ต่อจากนั้นแอมโมเนียมจึงถูกนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโน ดังนั้นการงดให้ ไนเตรททำให้การสังเคราะห์กลูโคโรฟิลล์ การสังเคราะห์แสง และการสังเคราะห์โปรตีนในพลา สทิดลดลง (Valdivia *et al.* 2008) และเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของโปรตีนเกิดขึ้น ได้ดีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยการเติมหมู่ฟอสเฟตหรือปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชัน (phosphorylation) ฟอสฟอรัสจึงทำหน้าที่ปรับสภาพของโปรตีนโดย ATP ทำปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชันกับโปรตีน มี เอ็นไซม์โปรตีนไคเนส (protein kinase) เร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มหมู่ฟอสเฟตที่หมู่ไฮดรอกซิลของ โปรตีน (Epastein and Bloom. 2005) ดังนั้นการที่มีปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตไม่เพียงพอจึง ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ลดลงด้วย เช่นมีรายงานว่า การเลี้ยงสาหร่าย *Emiliania huxleyi* ภายใต ความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตเริ่มต้น 20 และ 400 ไมโครโมล พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้ ความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตเริ่มต้น 400 ไมโครโมล มีปริมาณโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 3.1 ± 0.4 พิโคกรัมต่อเซลล์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตสูงสุดด้วย (Fernandez *et al.* 1996) สาหร่ายเซลล์เดียวสีแดง *Porphyridium sp.* ที่เจริญเติบโตภายใต้ความเข้มข้นของไนเตรทในอาหาร ที่แตกต่างกัน พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของไนเตรทสูงสุดมีปริมาณโปรตีน สูงสุดซึ่งส่งผลในทางบวกต่อปริมาณเซลล์สูงสุดด้วย (Adda *et al.* 1986) การเลี้ยงสาหร่าย *Tetraselmis suecica* ในความเข้มข้นของสารอาหารที่ปริมาณโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) 2 ถึง 16 มิลลิโมล พบว่าที่ 16 มิลลิโมล มีปริมาณโปรตีนสูงสุด 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร หรือ 59.8 พิโค กรั่มต่อเซลล์ (Fabregas *et al.* 1985)

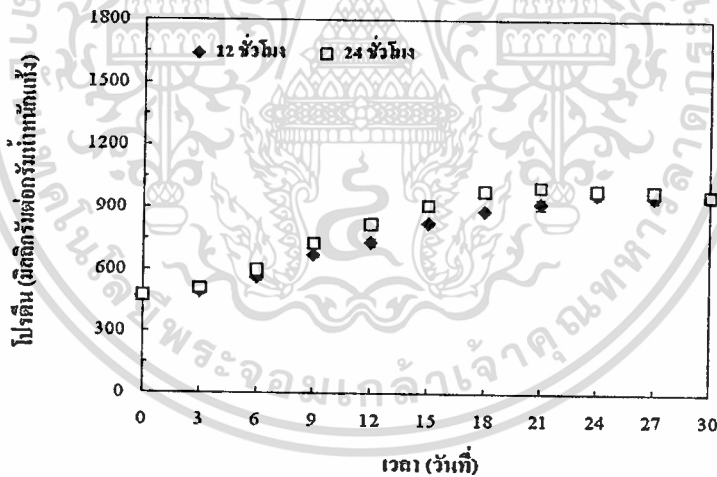
สาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* และ *Scenedesmus obliquus* และสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anacystis nidulans*, *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria rubescens* และ *Spirulina platensis* ที่ เจริญเติบโตในระดับไนโตรเจนแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มระดับไนโตรเจนจะทำให้ มีโปรตีนเพิ่มขึ้นจาก 8 ถึง 54 เปอร์เซ็นต์ (Pioerck *et al.* 1984) การเลี้ยงสาหร่าย *Prorocentrum lima* ภายใต้อาหาร ระดับปกติและลดฟอสเฟตลง 50 เท่า พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า เท่ากับ 1.93 ถึง 1.37 นาโนกรัมต่อเซลล์ (Vanucci *et al.* 2010) การเลี้ยงสาหร่าย *Isochrysis galbana* ภายใตความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) 2 ถึง 4 มิลลิโมล พบว่ามีปริมาณโปรตีนมากที่สุด 374 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อเลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรท 4 มิลลิโมล (Fabregas *et al.* 1986)

4.1.2.4 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Phormidium sp.*, *Mastigocladopsis sp.*, *Hapalosiphon sp.* และ *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน

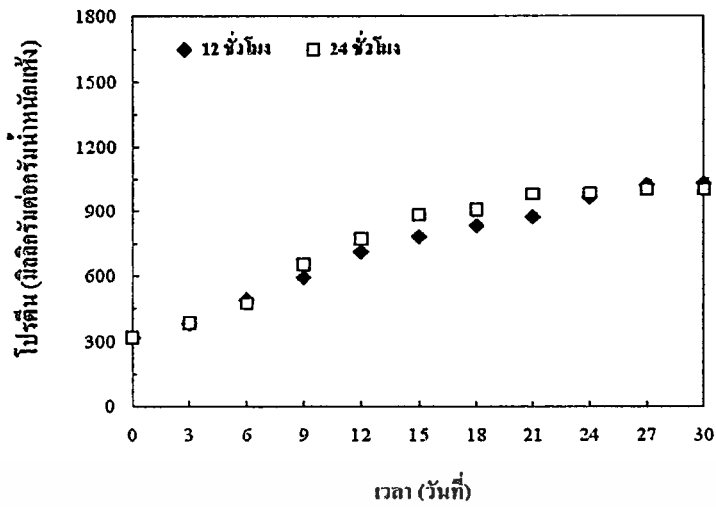
โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบต่อเนื่อง (24 ชั่วโมงต่อวัน) และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จักร 12 : 12 (12 ชั่วโมงต่อวัน) พบว่า *Phormidium* sp. และ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 1001.63 ± 24.54 และ 1382.35 ± 27.01 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.36 และ 4.38) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 1032.22 ± 23.91 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.37) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 1671.99 ± 12.68 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.39) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร ($p < 0.05$)

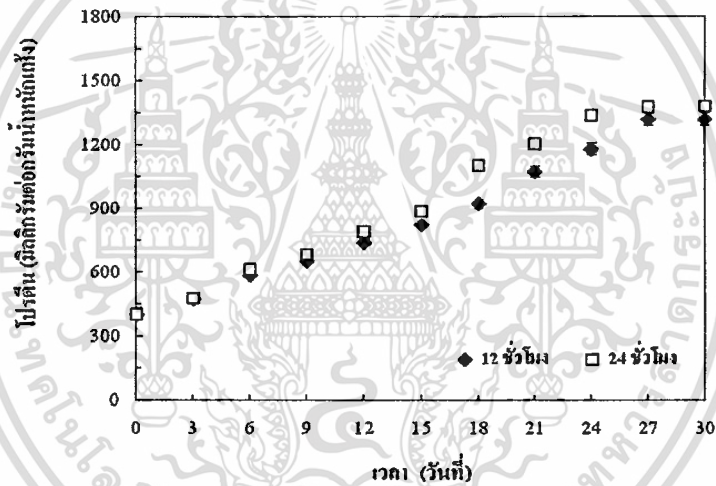
ส่วน *Phormidium* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงวัฏจักร มีโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 966.94 ± 19.85 , 1320.87 ± 28.39 และ 1561.45 ± 23.52 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 24, 24 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ และ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีโปรตีนสูงสุดเท่ากับ 1003.84 ± 22.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27 ของการทดลอง



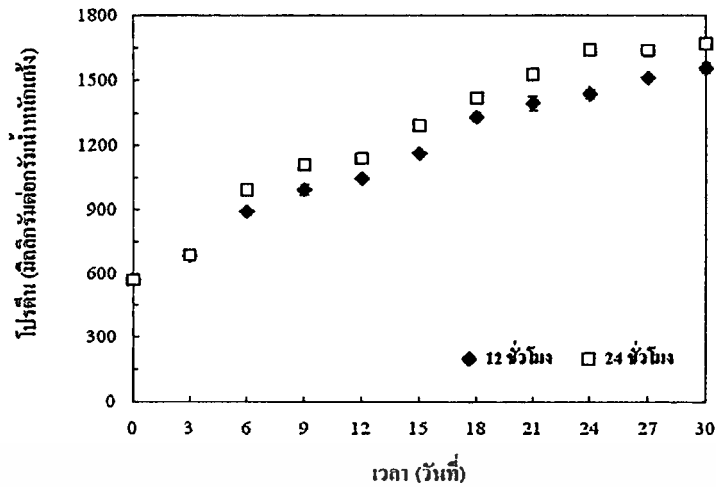
ภาพที่ 4.36 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาการได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.37 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.38 ปริมาณ โปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.39 ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาผลของปริมาณโปรตีนของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน พบว่า *Phormidium* sp. และ *Mastigocladopsis* sp. ในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง *Hapalosiphon* sp. ในช่วง 9 วันแรกของการทดลอง และ *Chlorella* sp. ในช่วง 3 วันแรกของการทดลองเท่านั้น ที่มีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกัน หลังจากนั้น *Phormidium* sp. และ *Mastigocladopsis* sp. ในช่วง 9-21 วันของการทดลอง *Hapalosiphon* sp. ในช่วง 12-24 วันของการทดลอง และ *Chlorella* sp. ในช่วง 6-30 ของการทดลอง ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่องมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร (ภาพที่ 4.36, 4.37, 4.38 และ 4.39) เนื่องจากในช่วงแรกมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและความต้องการใช้แสงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างองค์ประกอบทางชีวเคมีของเซลล์ เมื่อการเลี้ยงสาหร่ายยาวนานมากขึ้น สาหร่ายที่เลี้ยงในสภาวะที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่องจึงสามารถดูดซึมสารอาหารได้มากกว่าจึงทำให้มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบวัฏจักรเพราะมีช่วงเวลาที่ได้รับแสงสั้นกว่าจึงมีการใช้พลังงานจากแสงและการดูดซึมสารอาหารในช่วงเวลาที่ได้รับแสงเท่านั้น (Meseck *et al.* 2005) และเมื่อเข้าสู่ช่วงสิ้นสุดการทดลองสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักรมีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกันเนื่องจากสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่องสารอาหารเริ่มหมดไปในขณะที่สาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงแบบวัฏจักรยังคงเหลือสารอาหารมากกว่า ความแตกต่างของช่วงเวลากการได้รับแสงดังกล่าวจึงส่งผลต่อการดูดซึมสารอาหารเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้วย (Cloem. 1977) จากการศึกษากของ สมถวิล จริตควร และอมรรรัตน์ ชมรุ่ง (2550) ศึกษาปริมาณโปรตีนของ *Nannochloropsis oculata* ที่ระยะเวลาการให้แสง : ไม่ให้แสง ที่ 24:0, 18:6, 14:10 และ 12:12 พบว่าที่ 24:0 มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 27.89 ± 7.26 ของน้ำหนักแห้ง และ 18:6, 14:10 และ 12:12 มีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 27.05 ± 7.99 , 23.76 ± 6.33 และ 21.49 ± 5.75 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และแสงยังมีผลต่อปริมาณของรงควัตถุซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน (Sciandra *et al.* 2000) เช่น ไฟโคบิลิน (phycobilin) เป็นรงควัตถุที่รวมอยู่กับโปรตีนในรูปไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliprotein) พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง หน้าทีของไฟโคบิลินคือมีหน้าที่รับแสงและส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ (ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542) จากการเลี้ยงสาหร่าย *Nostoc sp.* Mac ภายใต้แสงสีขาว 30 ไมโครไอสโตลต์ต่อตารางเมตรต่อวินาที แบบต่อเนื่อง แบบวัฏจักร 14:10 และไม่ได้รับแสงแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 18 วัน พบว่าปริมาณไฟโคบิลิโปรตีนต่อคลอโรฟิลล์ ที่เลี้ยงโดยได้รับแสงแบบต่อเนื่องมีอัตราส่วนของไฟโคบิลิโปรตีนต่อคลอโรฟิลล์สูงสุด มีค่าเท่ากับ 7.4 มิลลิกรัม โปรตีนต่อมิลลิกรัมคลอโรฟิลล์ (Austin *et al.* 1996)

นอกจากนี้ Heat shock protein เป็นโปรตีนกลุ่มหนึ่งที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเนื่องจากการตอบสนองต่อการถูกชักนำโดยความร้อน แสงเป็นตัวเร่งความร้อนแม้จะเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายแต่การทำงานของ heat shock protein ยังคงเกิดขึ้นระดับเซลล์และภายในเซลล์จะมีกลไกในการป้องกันตัวอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งจะชักนำให้ heat shock protein หลายชนิดเพิ่มปริมาณการสังเคราะห์ พบว่าลักษณะโดยทั่วไปในการตอบสนองต่อการแสดงออกของยีน heat shock จะเกิดขึ้น โดยทันทีทันใด รุนแรง และชั่วคราว (Narberhaus. 1999) ส่งผลต่อการสังเคราะห์ heat shock protein เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Asadulghani and Nakamoto (2003) ศึกษาผลของแสงต่อการตอบสนองต่อ heat shock protein ในสาหร่าย *Synechocystis sp.* PCC 6803. พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงแม้จะไม่มากนักแต่ยังส่งผลทำให้การมีการเพิ่มของ heat shock protein และพบว่ายังมีการสะสมเป็นระยะเวลาหนึ่ง

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณ โปรตีนของสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่องมีปริมาณโปรตีนสูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในสาหร่าย *Hapalosiphon sp.* และ *Chlorella sp.* และจนกระทั่งวันที่ 24 ของการทดลอง ในสาหร่าย *Phormidium sp.* และ *Mastigocladopsis sp.* หลังจากนั้นใกล้เคียงกันกับกลุ่มที่เลี้ยงแบบวัฏจักร ทั้งนี้ปริมาณโปรตีนในสาหร่ายขึ้นกับชนิดและความต้องการพลังงานที่เหมาะสมของสาหร่ายในการตอบสนองต่อระยะเวลาการได้รับแสงไม่ว่าจะเป็น รงควัตถุ การนำสารอาหารไปใช้ประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมี เพื่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโต หรือการตอบสนองในระดับยีน เป็นต้น

4.1.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (พอลิแซ็กคาไรด์) ของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตหรือพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (พอลิแซ็กคาไรด์ทั้งภายในเซลล์และส่วนที่เคลือบเซลล์รวมกัน) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ

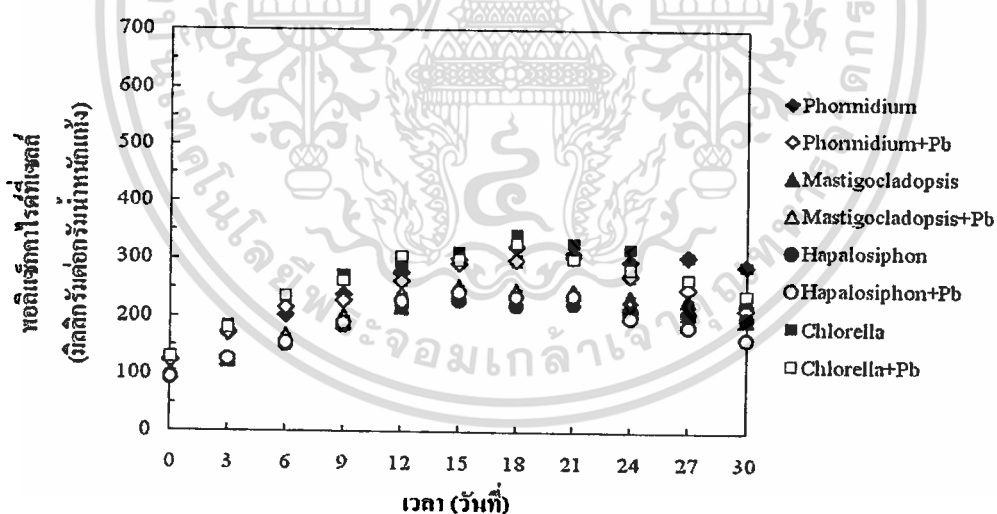
4.1.3.1 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

โดยเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระดับพีเอช 4.5 (ชุดควบคุม) และในอาหารที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 0 – 9 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 9 – 18 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 3 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 4.5 จนกระทั่งสาหร่ายตาย (วันที่ 18 – 30 ของการทดลอง) พบว่า *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุด ในวันที่ 18 ของการทดลอง เท่ากับ 344.09 ± 2.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว (ภาพที่ 4.40) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 321.67 ± 12.88 , 246.20 ± 1.66 และ 229.26 ± 2.00 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18, 18 และ 15 ของการทดลอง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ของสาหร่ายในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 303.88 ± 6.97 , 252.93 ± 2.02 , 242.71 ± 1.46 และ 327.93 ± 3.84 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 15, 15 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ

ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5) พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุด ในวันที่ 21 ของการทดลอง เท่ากับ 238.49 ± 5.22 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.41) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 192.03 ± 2.21 , 138.21 ± 2.92 และ 111.18 ± 2.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18, 18 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของสาหร่ายในอาหารที่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 234.03 ± 3.70 , 179.16 ± 3.75 ,

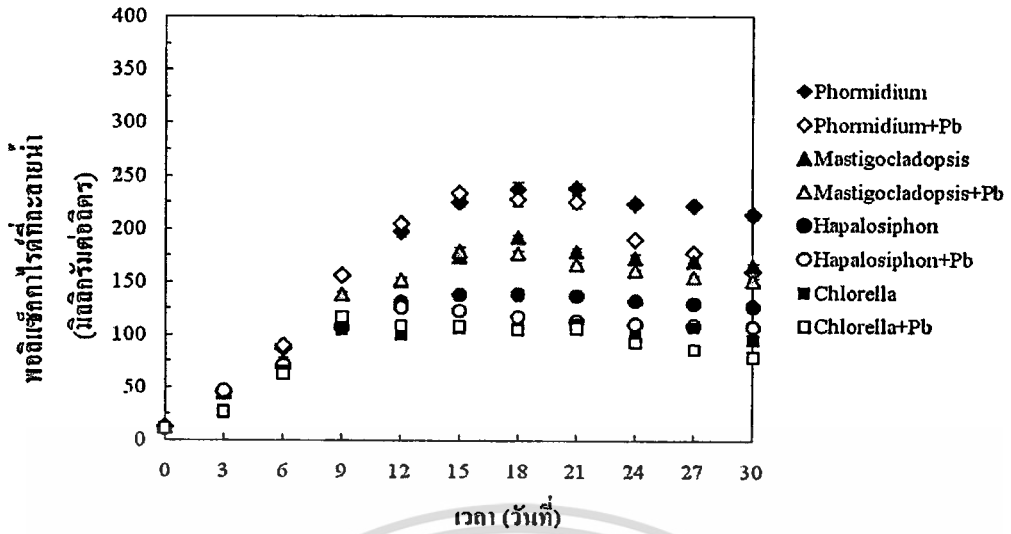
126.14±1.38 และ 116.69±3.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 15, 15, 12 และ 9 ของการทดลอง ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5) พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุด ในวันที่ 30 ของการทดลอง เท่ากับ 517.65±16.65 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4.42) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วน *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 375.13±12.21, 205.24±10.31 และ 210.43±8.33 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 9 และ 9 ของการทดลอง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของสาหร่ายในอาหารที่ไม่มีตะกั่วทุกชุดการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 450.96±13.89, 278.82±6.62, 221.40±1.97 และ 192.51±3.11 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 15, 9, 12 และ 9 ของการทดลอง ตามลำดับ

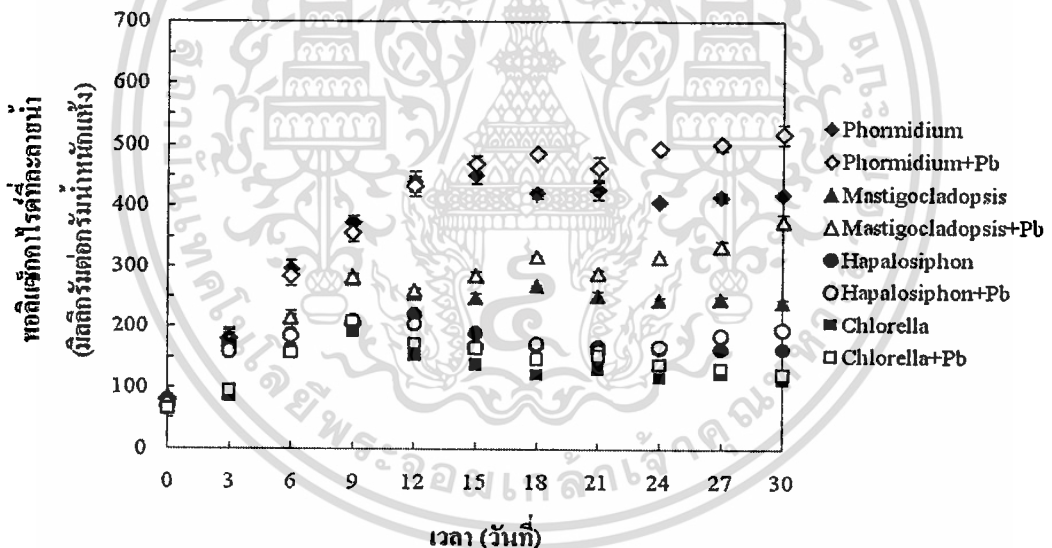


ภาพที่ 4.40 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)



ภาพที่ 4.41 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)



ภาพที่ 4.42 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

จากการทดลองพบว่าในช่วง 6-9 วันของการทดลอง สาหร่ายทุกชนิดมีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะในอาหารที่มีตะกั่วสูงกว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่วเล็กน้อย และหลังจากนั้นสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงภายใต้สภาวะในอาหารที่ไม่มีตะกั่วมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ใกล้เคียงกับสาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วและสูงกว่าจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง แต่พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในช่วง 0-9 วันของการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกันและหลังจากนั้นสาหร่ายทุกชนิดภายใต้สภาวะในการเลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วที่มีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) สูงกว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในการทดลองนี้พบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (ภาพที่ 4.40 และ 4.42) โดย *Phormidium* sp. และ *Mastigocladopsis* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และส่วนที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเช่นเดียวกัน จนกระทั่งวันที่ 15-18 ของการทดลอง หลังจากนั้นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์มีแนวโน้มลดลงในขณะที่พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของสาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วยังคงเพิ่มขึ้นและสาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วค่อนข้างคงที่ ส่วน *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และส่วนที่ละลายน้ำมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่อนข้างไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้โดยทั่วไประหว่างที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตจะมีการปล่อยพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์ โดยมีส่วนหนึ่งที่ละลายน้ำที่ล้อมรอบเซลล์หรือละลายอยู่ในอาหารที่ใช้ในการเลี้ยง และอีกส่วนหนึ่งที่ยังคงเคลือบเกาะอยู่ที่เซลล์ ลักษณะเป็นเมือกหุ้มเซลล์ ส่วนนี้อาจเกิดการจับตัวเป็นสารเชิงซ้อนกับประจุบวกของแร่ธาตุต่างๆ ได้ ซึ่งลักษณะเหล่านี้เป็นลักษณะสำคัญ ที่ทำให้สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดี (สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549) ในการทดลองครั้งนี้พบว่าในช่วงแรกสาหร่ายมีการตอบสนองต่อตะกั่วที่มีในอาหาร ได้สูงกว่าที่ไม่มีตะกั่ว จึงส่งผลให้สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วมีพอลิแซ็กคาไรด์ที่สูงกว่าเล็กน้อย

จากการศึกษาผลของนิกเกิล คอปเปอร์ และปรอท ต่อการสังเคราะห์พอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำในสาหร่าย *Nostoc spongiaeforme* โดยศึกษาจากปริมาณกลูโคส พบว่านิกเกิล คอปเปอร์ และปรอท ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5, 2 และ 0.05 ไมโครโมล สามารถชักนำให้มีการสังเคราะห์ exopolymer metal-specific สูงสุด ซึ่งมีปริมาณกลูโคสเท่ากับ 80, 26 และ 48 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และกลุ่มควบคุมมีปริมาณกลูโคส 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งการกระตุ้นการสังเคราะห์ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ออกสู่นอกเซลล์ในครั้งนี้ จะเพิ่มมากในระยะแรกในสาหร่ายชนิดนี้ (Singh et al. 1999) ซึ่งคล้ายคลึงกับแบคทีเรีย *Pseudomonas syringae* โดยคอปเปอร์จะกระตุ้นการผลิตพอลิเมอร์ออกสู่นอกเซลล์ได้มากกว่าที่อยู่ภายในเซลล์ โดยกลุ่มประจุบวก เช่น As^{2+} , Co^{2+} , Li^{2+} , Rb^{2+} , Mo^{2+} และ Hg^{2+} ใน *P. syringae* บ่งชี้ว่ากระบวนการจำเพาะของคอปเปอร์กระตุ้นให้เพิ่มกิจกรรมการคัดลอกรหัสของยีนที่สังเคราะห์อัลจินเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบพอลิเมอร์ (Kidambi. 1995) การผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้มากกว่าปกติในการตอบสนองต่อโลหะเป็นหนึ่งในกระบวนการเพื่อความอยู่รอด ซึ่งพอลิเมอร์ที่อยู่นอกเซลล์ดังกล่าวมีศักยภาพในการจับกับประจุบวกได้อย่างเสถียร (Asthana. 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายสีเขียว *Trebouxia impressa* เมื่อนำมาสัมผัสในแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 0, 9, 18, 36 ไมโครโมล เป็นเวลา 6, 18, 48 ชั่วโมง พบว่าที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียม 9 ไมโครโมล มีการเพิ่มเม็ดแป้งมากที่สุดตามระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและเซลล์ยังเป็นปกติอยู่ในระดับการสะสม แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้เซลล์มีการตาย (Di Toppi *et al.* 2008)

4.1.3.2 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

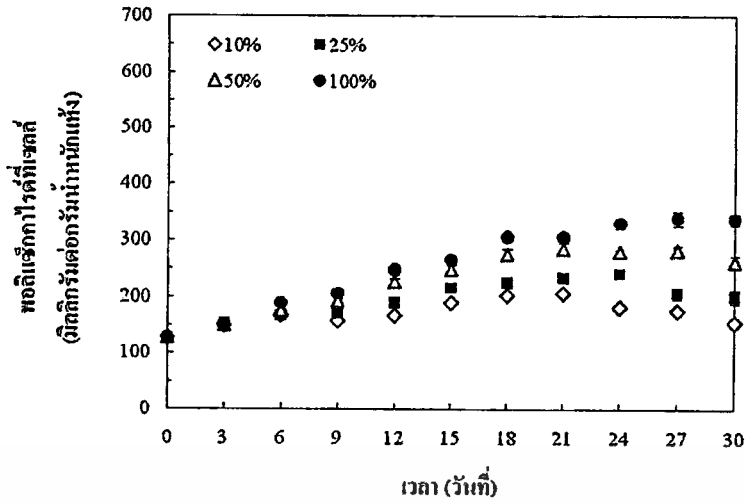
โดยเลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 338.87 ± 12.68 , 299.66 ± 10.05 , 277.93 ± 4.76 และ 554.61 ± 23.91 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 30, 24 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.43, 4.46, 4.49 และ 4.52) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดเมื่อเลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ของ *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 285.40 ± 10.39 , 242.09 ± 3.02 และ 207.38 ± 4.16 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 24, และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.43) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 240.99 ± 6.67 , 203.56 ± 8.01 และ 170.16 ± 5.07 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 24 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.46) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 231.51 ± 6.56 , 189.68 ± 1.35 และ 174.68 ± 7.73 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21, 24 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.49) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 478.90 ± 22.30 , 394.07 ± 19.58 และ 320.13 ± 8.10 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 24 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.52)

ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 352.69 ± 2.41 , 253.63 ± 1.32 , 298.86 ± 3.25 และ 210.34 ± 1.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 24, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.44, 4.47, 4.50 และ 4.53) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเมื่อเลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 314.68 ± 9.64 , 294.97 ± 4.72 และ 261.12 ± 12.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 21, 27, และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.44) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ

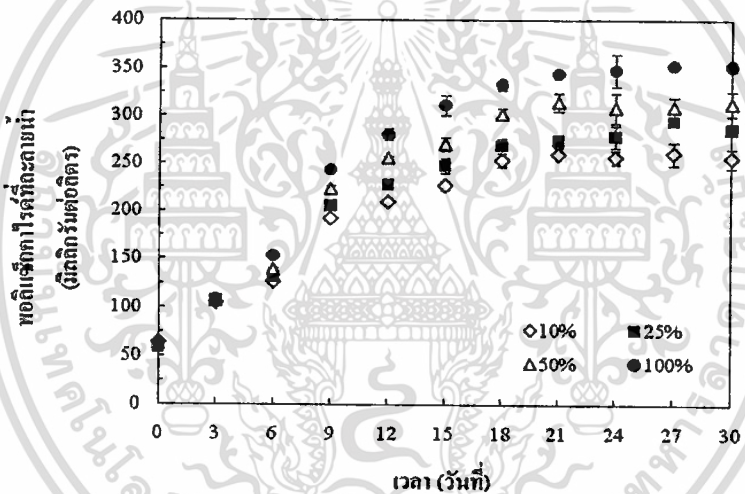
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

224.21±1.36, 203.40±1.5 และ 183.97±1.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 24 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.47) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 264.17±1.20, 248.08±2.95 และ 223.66±1.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.50) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 195.07±1.14, 175.09±0.95 และ 161.77±5.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.53)

เมื่อพิจารณาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของสาหร่ายแต่ละชนิดคือ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 605.20±11.23 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.45) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 345.81±12.63 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 15 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.48) แต่ไม่แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 361.67±8.69 และ 312.72±9.20 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.51 และ 4.54) แต่ไม่แตกต่างกับที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) โดยปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเมื่อเลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100, 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 575.06±16.52, 557.40±16.32 และ 576.90±22.24 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 12, และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.45) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 335.70±9.14, 333.29±6.11 และ 338.43±6.57 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 12 และ 15 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.48) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 331.01±12.73, 332.82±5.28 และ 345.77±11.23 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 15, 15 และ 15 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.51) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 264.50±16.58, 256.34±9.72 และ 289.55±11.30 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18, 21 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.54)

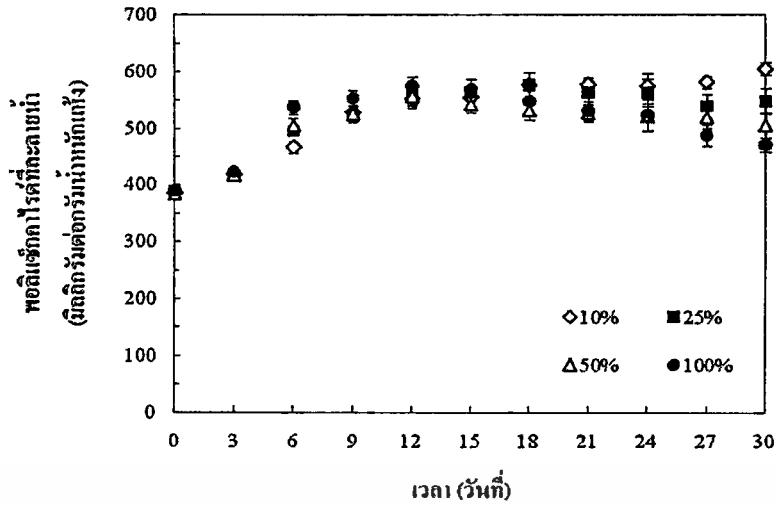


ภาพที่ 4.43 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

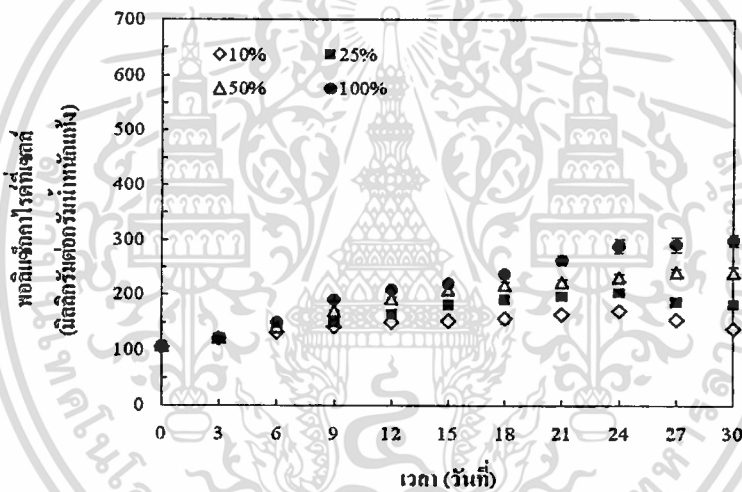


ภาพที่ 4.44 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

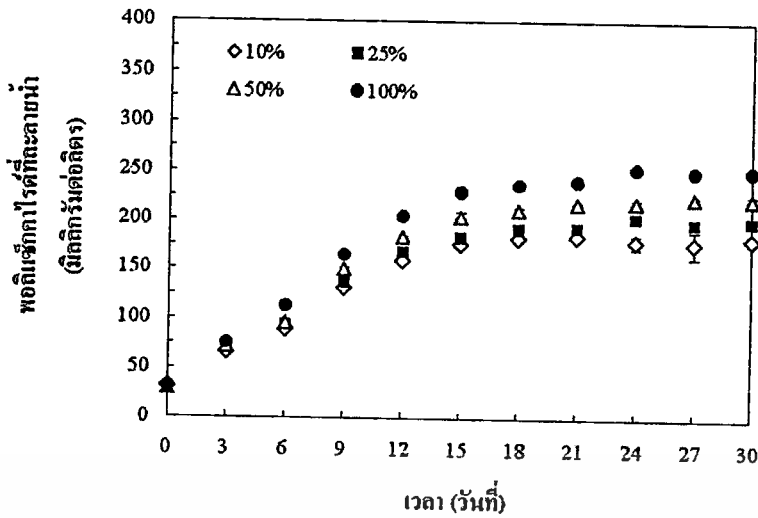


ภาพที่ 4.45 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

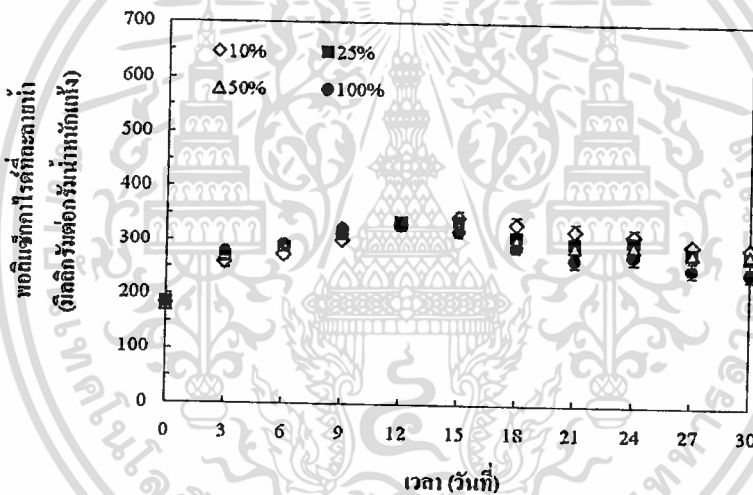


ภาพที่ 4.46 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

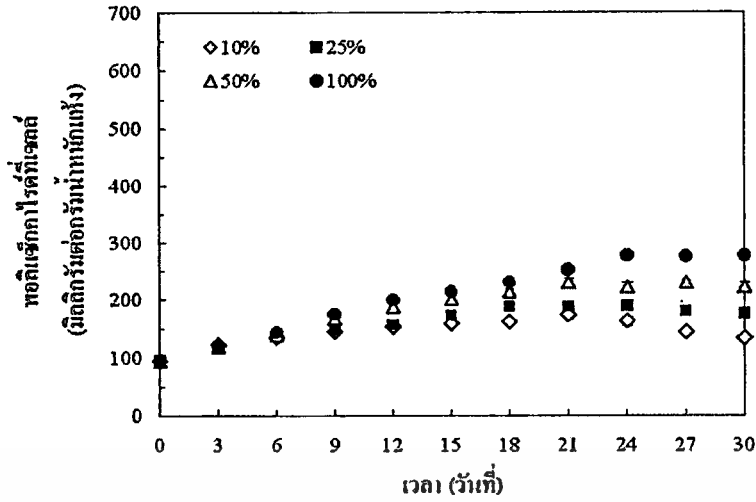


ภาพที่ 4.47 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

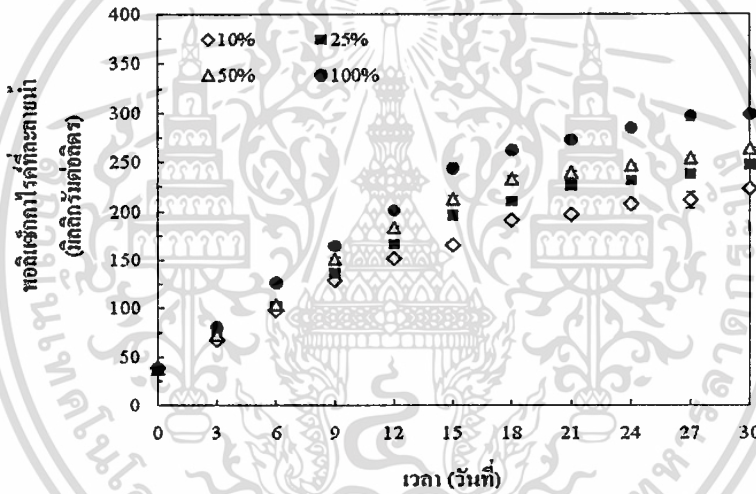


ภาพที่ 4.48 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

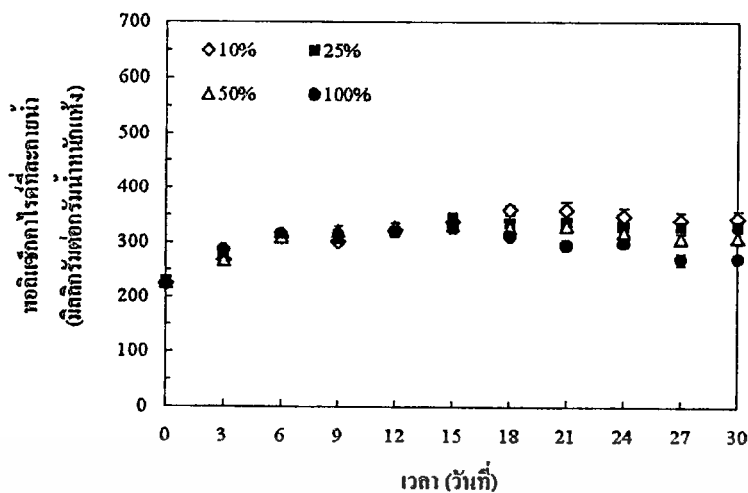


ภาพที่ 4.49 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

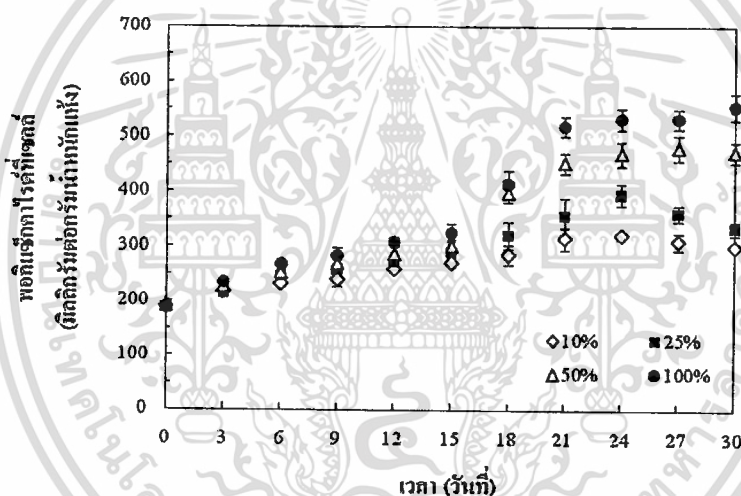


ภาพที่ 4.50 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

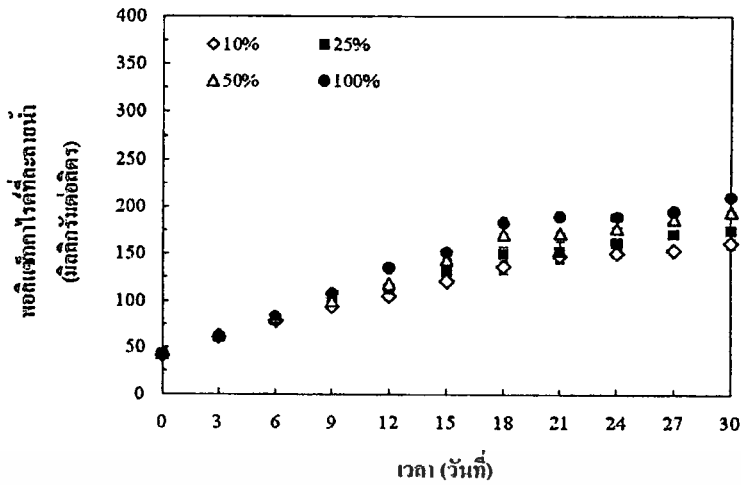


ภาพที่ 4.51 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

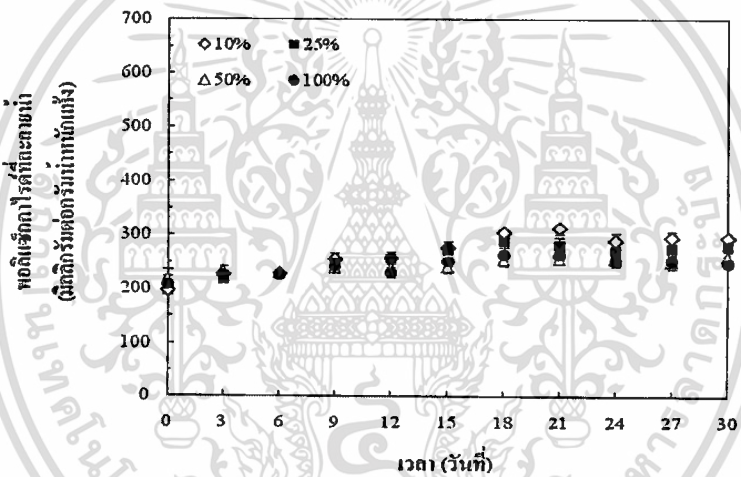


ภาพที่ 4.52 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.53 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.54 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสาหร่ายทุกชนิดเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารอาหารที่เพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกันเพียง 3 วันแรกของการทดลองเท่านั้น และหลังจากนั้นปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำเริ่มแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารอาหารเนื่องจากอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่สาหร่ายนำมาสังเคราะห์สารโมเลกุลใหญ่ (macromolecule) ต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เพื่อนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ ภายในเซลล์ ถ้าเหลือใช้อาจนำไปเก็บสะสมเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำรองสำหรับการดำรงชีวิต การแบ่งเซลล์ เป็นต้น โดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์แสงร่วมกับการดูดซึมสารอาหารเข้าไปสู่กระบวนการสังเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีของเซลล์ (Schluter, 1998) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเข้มข้นของสารอาหารจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบางครั้งการลดสารอาหารบางชนิด อาจส่งผลต่อการเพิ่มองค์ประกอบบางชนิดในสาหร่ายเช่นกัน แต่จากการทดลองนี้ลดสารอาหาร ทุกตัวทำให้สาหร่ายดูดซึมสารอาหารที่อยู่ล้อมรอบเซลล์เข้าสู่เซลล์ในปริมาณที่แตกต่างกันตาม ความเข้มข้นของสารอาหารด้วย จากการทดลองพบว่าเซลล์สาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงในสารอาหาร เข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ ลดลง ตามลำดับ โดยพบว่าแนวโน้มของการเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น จนกระทั่งวันที่ 18 -21 ของการทดลอง และเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน และเมื่อระยะเวลามากขึ้นเซลล์ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำ สารอาหารไปใช้ได้ลดลงเนื่องจากอาจนำสารอาหารที่เหลืออยู่ไปใช้เพื่อกิจกรรมการดำรงชีวิต เท่านั้นส่งผลให้ไม่เพียงพอต่อการสะสมพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (Lewitus and Caron. 1990) เช่น การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Gloeocapsa gelatinosa* ภายใต้สภาวะสารอาหารที่ เหมาะสมและเลี้ยงในสภาวะอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน เลี้ยงเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าปริมาณ พอลิแซ็กคาไรด์ที่ติดกับเซลล์มีค่าเท่ากับ 35.4 และ 15.8 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Ruangsomboon *et al.* 2006b) การเลี้ยงสาหร่าย *Alexandrium tamareuse* ภายใต้ความเข้มข้นของ เหล็ก (Fe) ที่ 1 ไมโครโมล และ 10 ไมโครโมล พบว่าเหล็กในอาหารเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณ คาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 0.475 ± 0.022 และ 0.529 ± 0.015 นาโนกรัมต่อเซลล์ ตามลำดับ (He *et al.* 2010)

เมื่อพิจารณาพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในสาหร่าย ทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารอาหารที่เพิ่มขึ้น ในช่วง 9-12 วันของการทดลอง เท่านั้น หลังจากนั้นใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลง แต่สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้น ของสารอาหารสูงทำให้มีการลดลงของพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำมากกว่าที่เลี้ยงในความ เข้มข้นของสารอาหารที่ต่ำ ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่ความเข้มข้นไม่เพียงพอทำให้ สาหร่ายมีการสังเคราะห์พอลิแซ็กคาไรด์และมีการปลดปล่อยสู่ภายนอกเซลล์ได้มากกว่าในอาหาร ที่เข้มข้นเพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนต่อเซลล์ อาจเนื่องมาจากสภาพพลังงานที่เพียงพอ โดยจะ ไม่ไปลดวิถีเมตาบอลิซึมอื่นที่เกี่ยวข้องกับคาร์โบไฮเดรต (Barker and Bryson. 2007) ดังนั้นการ เลี้ยงสาหร่ายที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำจึงส่งผลให้มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงกว่า แต่ในการทดลองครั้งนี้ พอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) เพิ่มขึ้นตามความ เข้มข้นของสารอาหารที่เพิ่มขึ้นแต่ตรงข้ามกับพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอาหารที่ลดลง แสดงว่าสาหร่ายทุกชนิดในการ ทดลองครั้งนี้มีความสามารถในการสร้างพอลิแซ็กคาไรด์และปลดปล่อยออกสู่นอกเซลล์หรือส่วน ที่มีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้มากกว่า จึงทำให้เหลือส่วนที่สะสมที่เซลล์ได้น้อยกว่านั่นเอง (Staats *et al.* 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

โดยเลี้ยงสาหร่ายในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ (ไนเตรทและฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นชุดควบคุม) และผันแปรสภาวะคือ กลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารที่มีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุด ในวันที่ 30 ของการทดลอง เท่ากับ 380.43 ± 14.50 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4.55) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ ส่วนปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดของ *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในสารอาหารที่มีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 328.11 ± 10.54 , 330.69 ± 8.06 และ 616.32 ± 15.50 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 24 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.58, 4.61 และ 4.64) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$)

ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดของสาหร่ายเมื่อเลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ ลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 346.42 ± 14.86 , 357.54 ± 5.59 และ 290.07 ± 13.55 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 24 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.55) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 296.73 ± 7.57 , 322.59 ± 6.01 และ 260.92 ± 6.70 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.58) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 291.58 ± 8.12 , 327.06 ± 10.68 และ 236.66 ± 14.39 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 27 และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.61) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 554.28 ± 20.30 , 609.43 ± 13.18 และ 488.84 ± 17.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.64)

ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุด ในวันที่ 24 ของการทดลอง เท่ากับ 323.56 ± 12.46 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.56) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ ส่วน *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดในวันที่ 30 ของการทดลอง เท่ากับ 281.10 ± 1.23 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.59) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดในวันที่ 30 ของการทดลอง เท่ากับ 287.20 ± 1.53 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.62) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดในวันที่ 27 ของการทดลอง เท่ากับ 218.11 ± 2.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.65) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$)

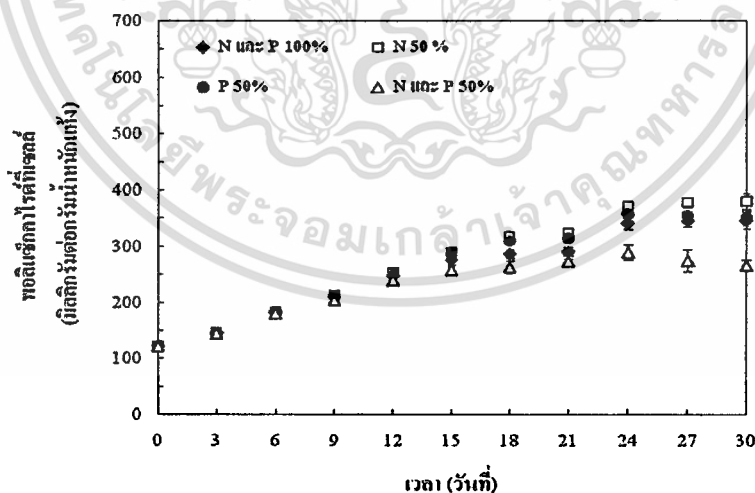
ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 305.80 ± 2.24 , 317.73 ± 2.95 และ 275.55 ± 3.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 27, และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 263.62 ± 5.29 , 282.21 ± 4.16 และ 221.16 ± 4.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 181.20 ± 2.28 , 207.56 ± 6.41 และ 167.88 ± 1.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ สำหรับ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงในอาหารความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุด เท่ากับ 254.46 ± 3.46 , 280.82 ± 2.97 และ 224.21 ± 2.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30, 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต พบว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดในวันที่ 24 ของการทดลอง เท่ากับ 522.71 ± 22.12 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4.57) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีความเข้มข้นของสารอาหารระดับ

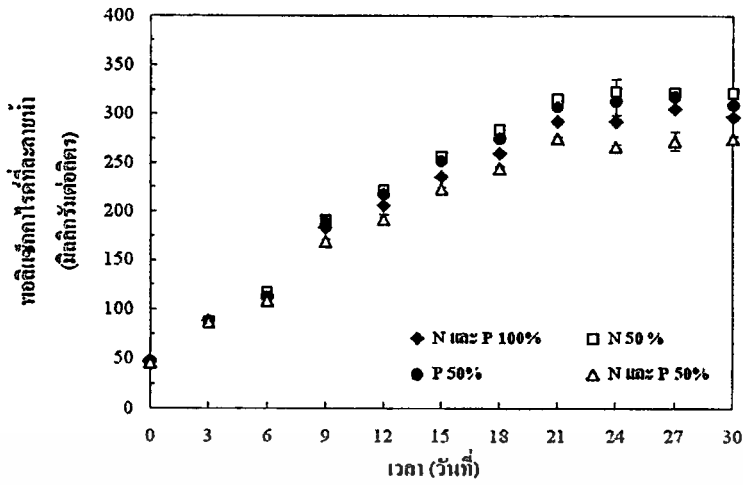
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ ส่วน *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 324.65 ± 6.87 , 319.04 ± 9.54 และ 288.49 ± 10.19 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 18, 21, และ 24 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.60, 4.63 และ 4.66) และไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$)

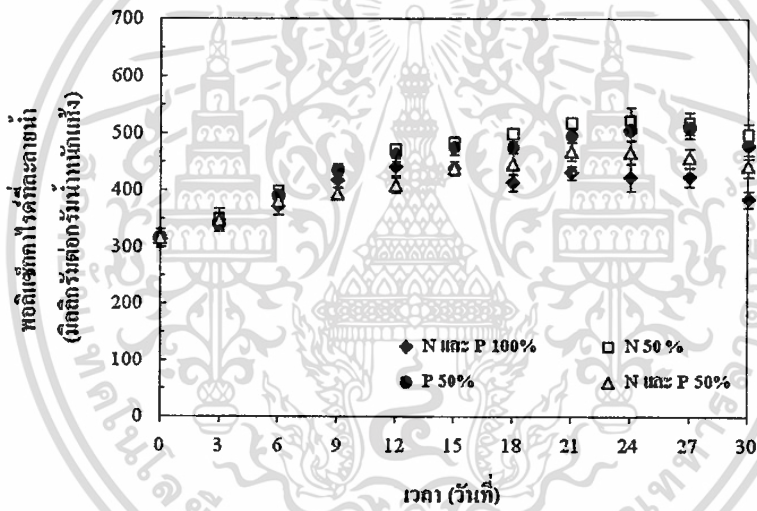
ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดของสาหร่ายแต่ละชนิดที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของ ไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า *Phormidium* sp. มีค่าเท่ากับ 440.50 ± 15.15 , 510.52 ± 18.58 และ 468.53 ± 15.63 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 27, และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.57) *Mastigocladopsis* sp. เท่ากับ 297.08 ± 6.49 , 311.33 ± 5.58 และ 292.28 ± 9.14 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 15 และ 9 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.60) *Hapalosiphon* sp. เท่ากับ 268.91 ± 7.97 , 300.55 ± 7.60 และ 257.08 ± 7.39 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 15, 24 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.63) และ *Chlorella* sp. เท่ากับ 224.36 ± 5.41 , 270.20 ± 11.03 และ 231.65 ± 8.71 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 21 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.66)



ภาพที่ 4.55 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

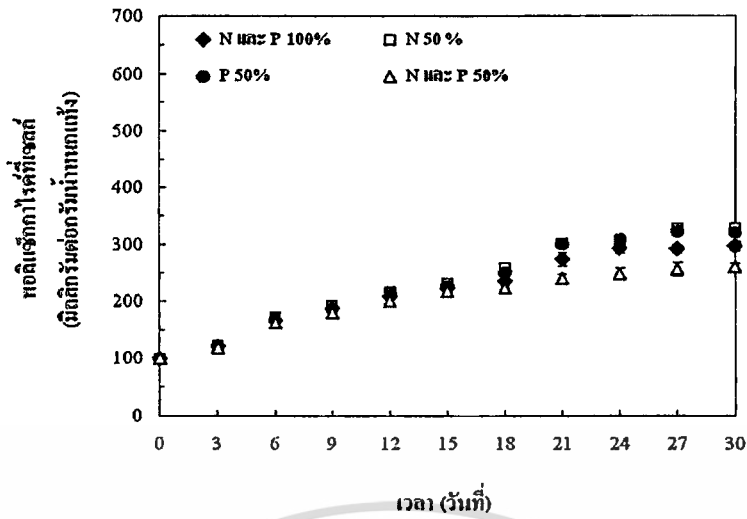


ภาพที่ 4.56 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

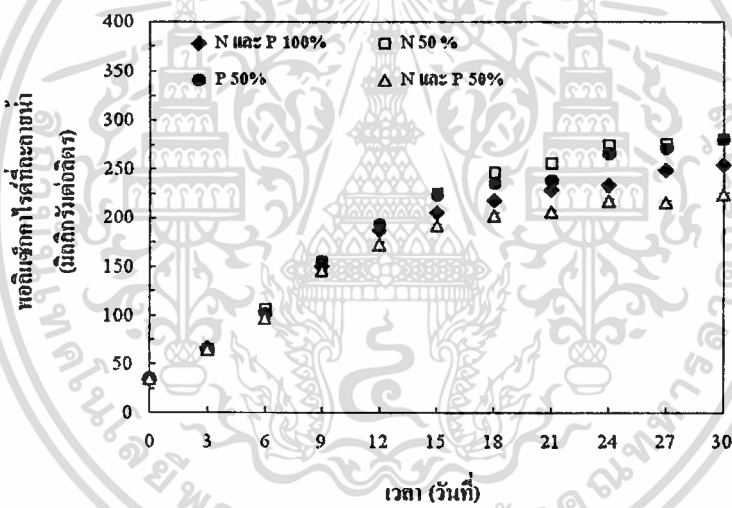


ภาพที่ 4.57 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

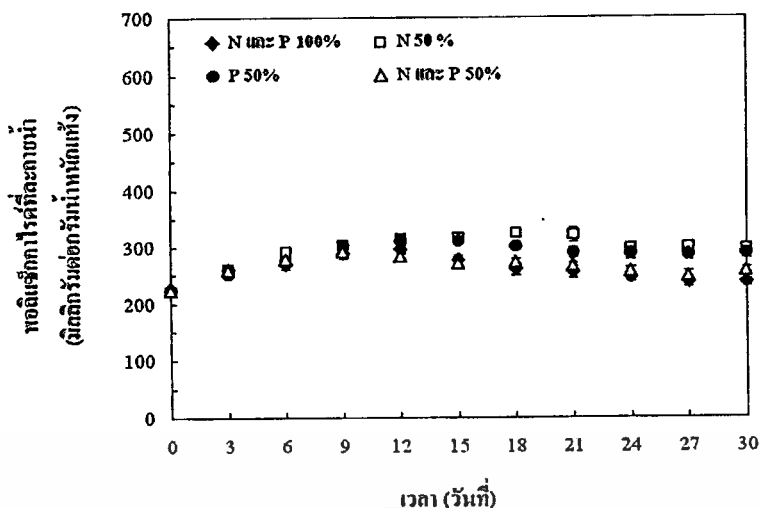


ภาพที่ 4.58 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

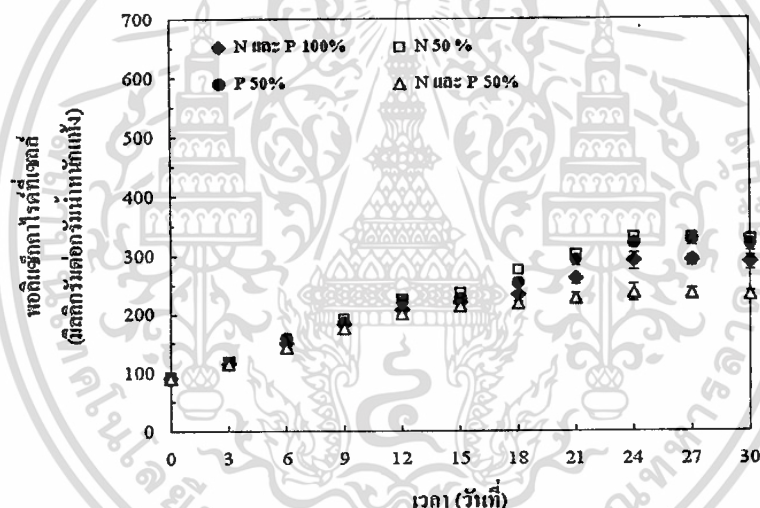


ภาพที่ 4.59 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

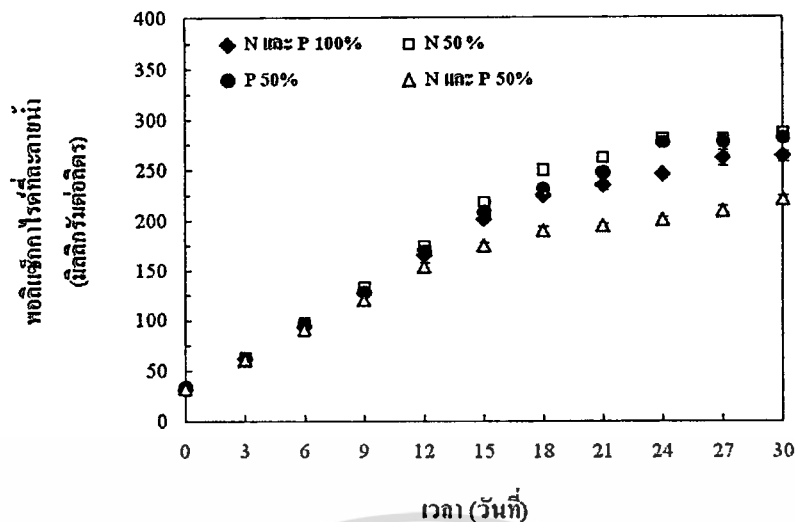


ภาพที่ 4.60 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

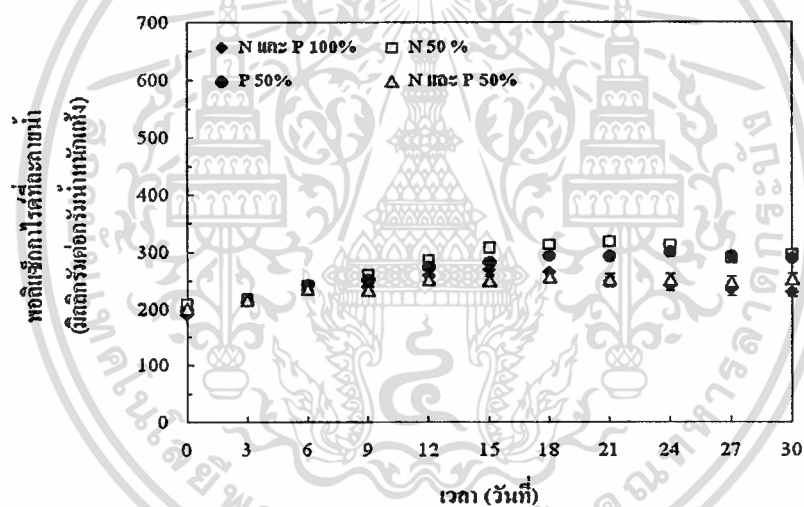


ภาพที่ 4.61 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

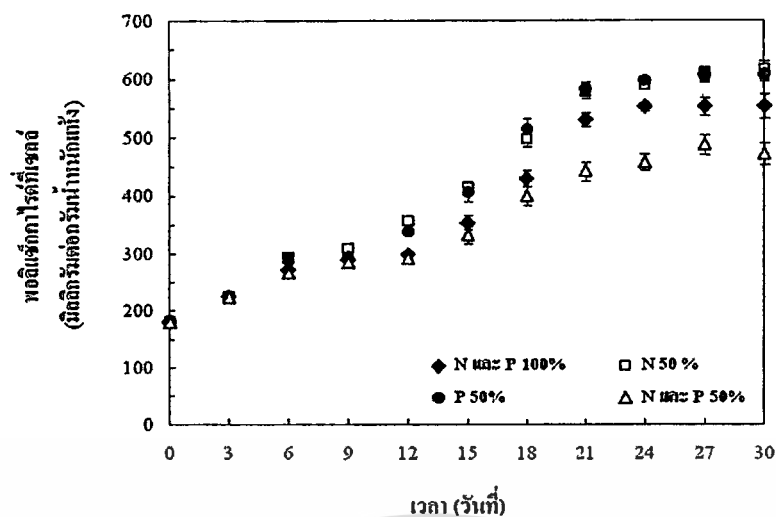


ภาพที่ 4.62 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

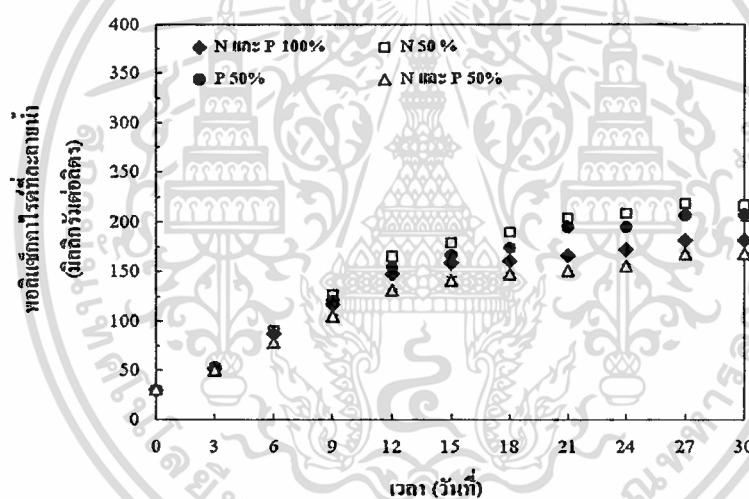


ภาพที่ 4.63 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

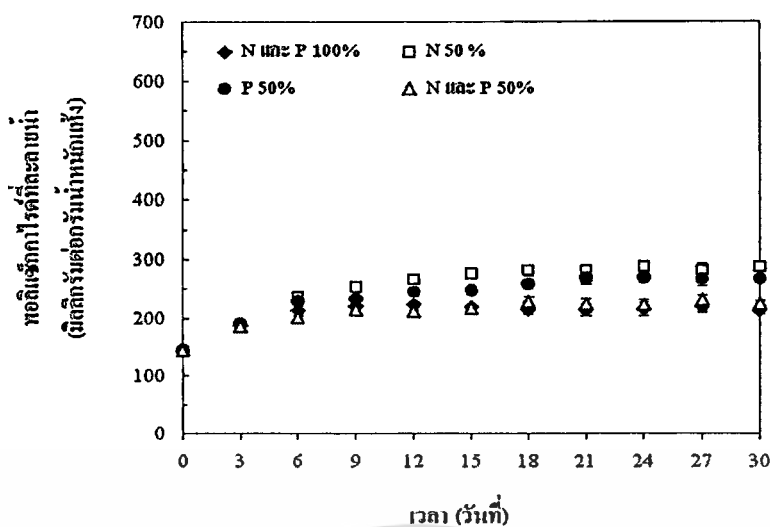
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.64 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต



ภาพที่ 4.65 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต



ภาพที่ 4.66 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella sp.* ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต

ในการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสาหร่ายทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกันเพียง 6-9 วันแรกของการทดลอง และหลังจากนั้นปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำเริ่มแตกต่างกัน สาหร่ายที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าและใกล้เคียงกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติและกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำลดลง ตามลำดับ แต่จากการทดลองพบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในช่วงแรกของการทดลองการเพิ่มขึ้นของพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) มีความคล้ายคลึงกับพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่พบว่าภายหลังจากวันที่ 15-18 ของการทดลอง พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) กลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติลดลงต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ เพราะการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางชีวเคมีจากการเพิ่มไนโตรเจนจะส่งผลต่อวิถีเมตาบอลิซึม เนื่องจากการแย่งใช้สารที่ได้จากการสังเคราะห์แสง เพราะไนโตรเจนส่งผลให้เหี่ยวนำไปให้ขึ้นควบคุมการสร้างโปรตีนซึ่งเร่งปฏิกิริยารีดักชัน รวมทั้งเอนไซม์ในวิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) และไกลโคไลซิส (glycolysis) เพื่อเบนจากการสังเคราะห์น้ำตาลและแป้ง มาสู่การสังเคราะห์กรดอินทรีย์ (Tsujimoto *et al.* 2007) ดังนั้นถ้าลดการให้ไนโตรเจนทำให้การสังเคราะห์โปรตีนลดลง (Valdivia *et al.* 2008) แต่จะทำให้มีการเพิ่มคาร์โบไฮเดรตและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไปลดวิถีเมตาบอลิซึมของกระบวนการสลายโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับคาร์โบไฮเดรต เพราะจะยับยั้งเอนไซม์ในวิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) และไกลโคไลซิส (glycolysis) จึงทำให้การสังเคราะห์น้ำตาลและแป้งเพิ่มมากขึ้นเพราะในเตรทที่มีปริมาณต่ำส่งผลให้ให้ยีนควบคุมการสร้างโปรตีนยับยั้งปฏิกิริยารีดักชัน รวมทั้งเอนไซม์ในวิถีเมตาบอลิซึมที่สลายคาร์โบไฮเดรต (Barker and Bryson. 2007)

นอกจากนี้สารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญในการควบคุมเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตและการสังเคราะห์แสง หากได้รับฟอสเฟตมากเกินไปอัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการสังเคราะห์แป้งจะลดลง ถ้าหากมีปริมาณฟอสเฟตในระดับต่ำหรือไม่เพียงพอเซลล์จะรักษาระดับพลังงานต่อสารอาหารที่จำกัดโดยลดการใช้ ATP เพื่อไม่ให้เกิดกระบวนการสลายน้ำตาลหรือแป้งจึงส่งผลให้มีการสะสมแป้งและน้ำตาลมากกว่าที่จะนำมาใช้ นอกจากนี้สารอนินทรีย์ฟอสเฟตยังมีอิทธิพลต่อเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต และกระบวนการสังเคราะห์เฮลิโอส เช่น กลูโคส ต้องการใช้ฟอสเฟตพลังงานสูง เช่น ATP จึงต้องมีฟอสฟอรัสเพียงพอ (Epastein and Bloom. 2005) เช่นรายงานว่าการเลี้ยงสาหร่าย *Cylindrotheca closterium* ในช่วงการเจริญเติบโตคงที่ พบว่าเมื่อไนโตรเจนถูกเติมเข้าไปในช่วงการเจริญเติบโตคงที่นี้การสะสมพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำจะช้าลง และเมื่อไนโตรเจนลดลงจะกระตุ้นการสะสมพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ การสะสมพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำถูกกระตุ้นเช่นกันเมื่อเซลล์ถูกเติมอาหารที่มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสในปริมาณต่ำ (Staates *et al.* 2000) ในสาหร่ายสีแดง *Porphyridium* sp. เจริญเติบโตภายใต้ความเข้มข้นของไนเตรทที่แตกต่างกัน พบว่าการลดไนเตรทในอาหารจะทำให้เพิ่มพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผนังเซลล์ มีผลทำให้มีการผลิตพอลิแซ็กคาไรด์สูงสุดที่ผนังเซลล์ และส่วนที่ละลายในอาหารสูงด้วย (Adda *et al.* 1986) สาหร่ายสีแดง *Rhodella reticulata* ถูกเลี้ยงภายใต้ไนเตรทที่แตกต่างกันเมื่อไนเตรทลดลงในอาหารพบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ต่อเซลล์สูงสุด ได้จากการลดลงของไนเตรทและมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีปลดปล่อยออกนอกเซลล์ก็คือส่วนที่ละลายน้ำสูงด้วย (Arad *et al.* 1992)

การเลี้ยงสาหร่าย *Prorocentrum lima* ภายใต้สภาวะไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจำกัด ที่ความเข้มข้นไนโตรเจนปกติ (ควบคุม) และลดไนโตรเจนลง 50 เท่า พบว่าอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตในเซลล์ต่อส่วนที่ละลายน้ำ สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญกว่าควบคุม โดยชุดควบคุมและลดไนโตรเจนลง 50 เท่า มีอัตราส่วนเท่ากับ 1.50 และ 3.87 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสปกติ (ควบคุม) และลดฟอสฟอรัสลง 50 เท่า พบว่าปริมาณของคาร์โบไฮเดรตในเซลล์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อลดระดับของฟอสฟอรัสซึ่งมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 1.25 และ 4.25 นาโนกรัมต่อเซลล์ โดยอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตภายในเซลล์ต่อส่วนที่ละลายน้ำลดลงเมื่อลดระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่าการลดฟอสฟอรัสใน

สาหร่ายชนิดนี้มีการเพิ่ม พอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำก่อนข้างสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตภายใน เซลล์ (Vanucci *et al.* 2010)

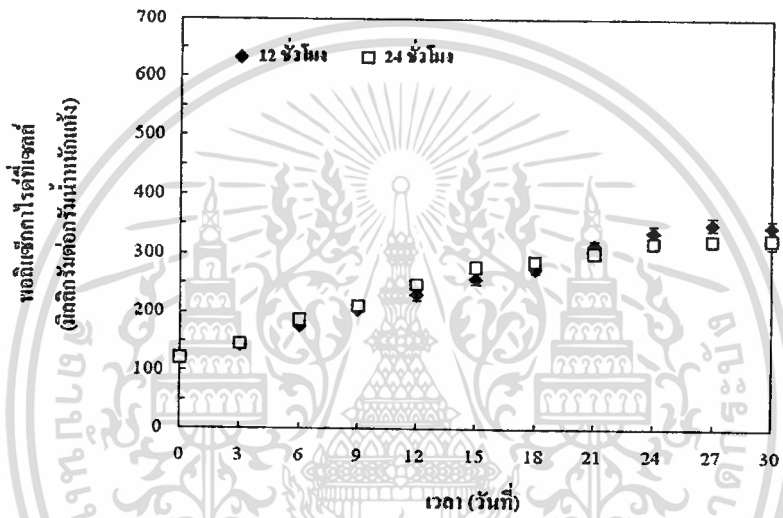
4.1.3.4 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน

โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง (24 ชั่วโมงต่อวัน) และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12 (12 ชั่วโมงต่อวัน) พบว่า *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 350.57 ± 13.36 , 306.62 ± 15.12 , 310.45 ± 20.23 และ 583.72 ± 25.64 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 27, 30, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.67, 4.70, 4.73 และ 4.76) แต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง โดย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 324.87 ± 14.12 , 278.57 ± 5.46 , 288.97 ± 14.37 และ 540.16 ± 16.24 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 30, 30, 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ

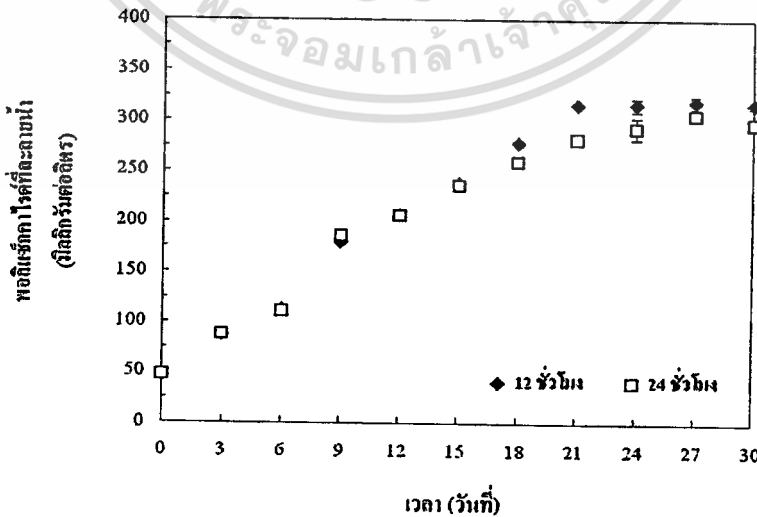
ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน พบว่า *Phormidium* sp. และ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 319.12 ± 6.09 และ 265.56 ± 3.46 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.68 และ 4.71) แต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง สำหรับ *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 263.62 ± 5.29 และ 182.03 ± 0.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 30 และ 30 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.74 และ 4.77) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ($p < 0.05$) ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 305.80 ± 2.24 , 254.46 ± 3.46 , 230.59 ± 2.66 และ 167.32 ± 3.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 27, 30, 30 และ 27 ของการทดลอง ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน พบว่า *Phormidium* sp. และ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 494.27 ± 11.40 และ 291.97 ± 3.06 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 21 และ 15 ของการทดลอง ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

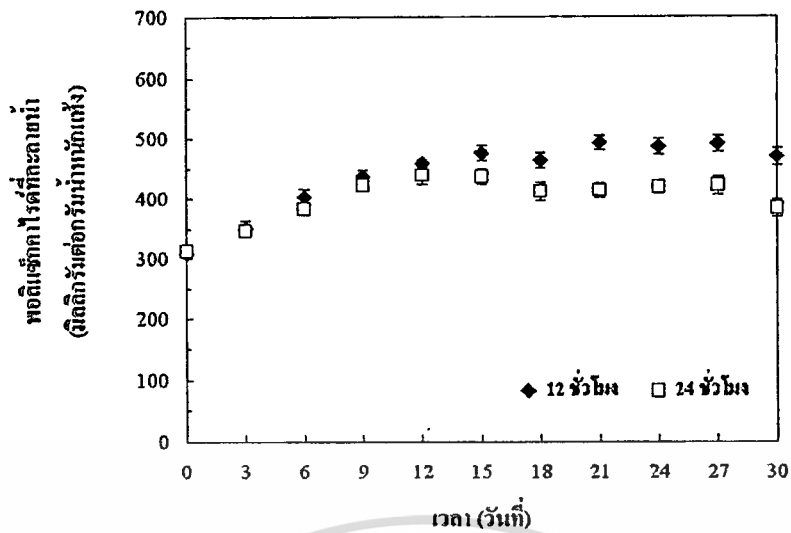
(ภาพที่ 4.69 และ 4.75) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ($p < 0.05$) สำหรับ *Mastigocladopsis* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 317.26 ± 9.25 และ 231.10 ± 11.98 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.72 และ 4.78) แต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ส่วน *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง มีพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 440.50 ± 15.15 , 297.08 ± 6.49 , 273.59 ± 7.26 และ 215.99 ± 12.23 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 12, 12, 9 และ 18 ของการทดลอง ตามลำดับ



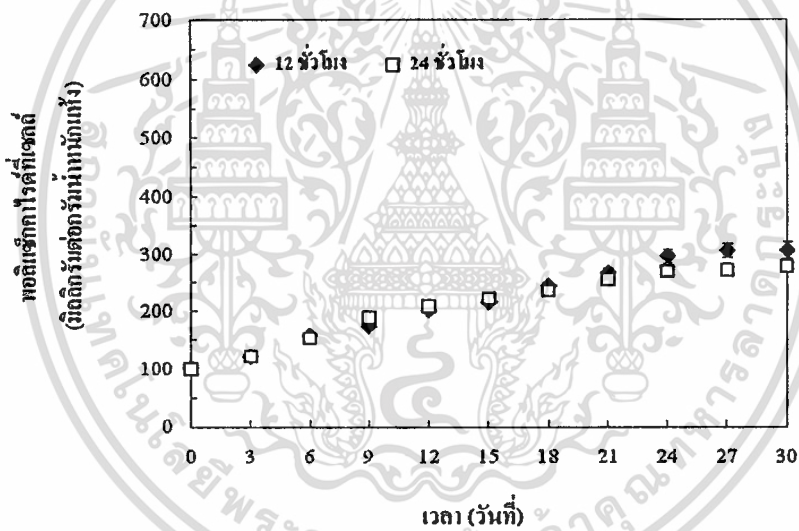
ภาพที่ 4.67 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลาย (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



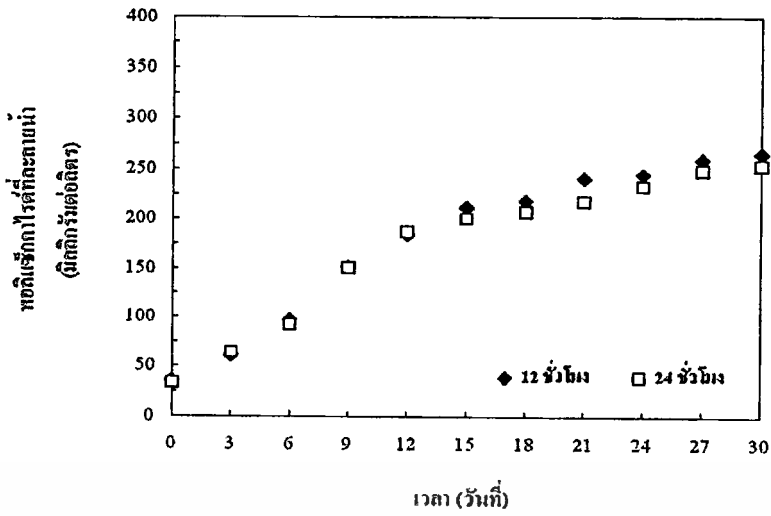
ภาพที่ 4.68 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



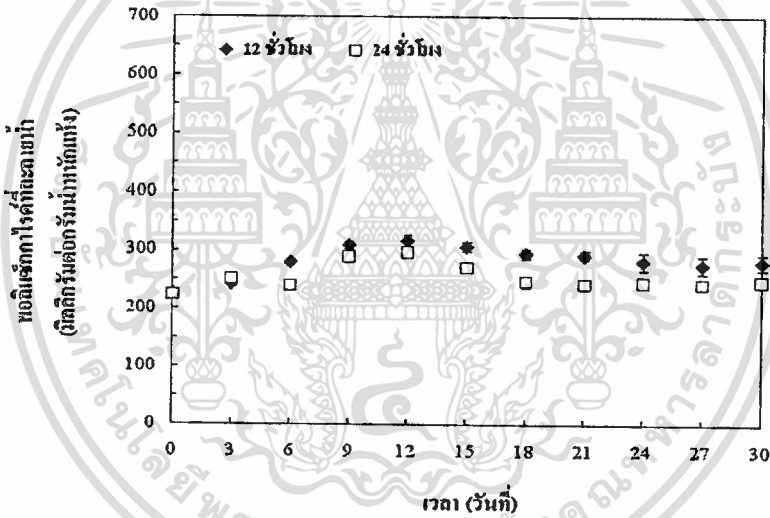
ภาพที่ 4.69 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน



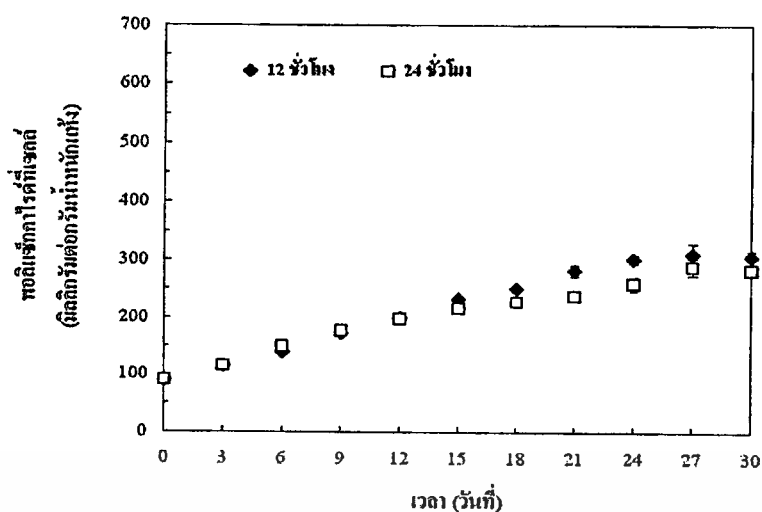
ภาพที่ 4.70 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน



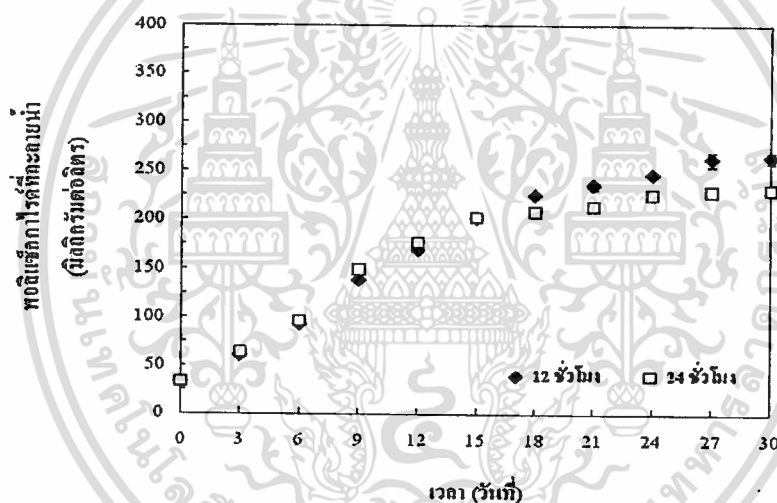
ภาพที่ 4.71 ปริมาณพอลิแอครีลาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



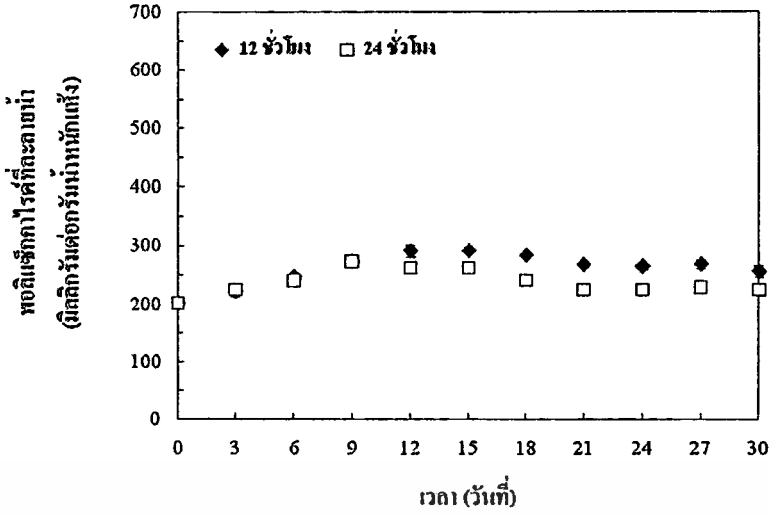
ภาพที่ 4.72 ปริมาณพอลิแอครีลาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



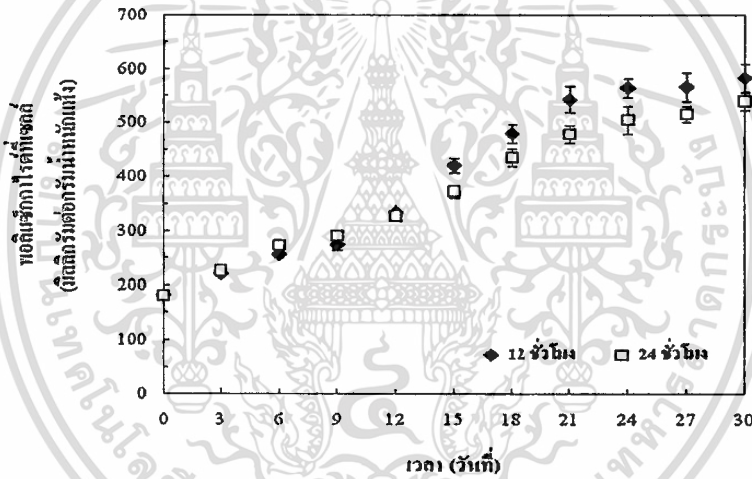
ภาพที่ 4.73 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางที่ได้รับแสงที่แตกต่างกัน



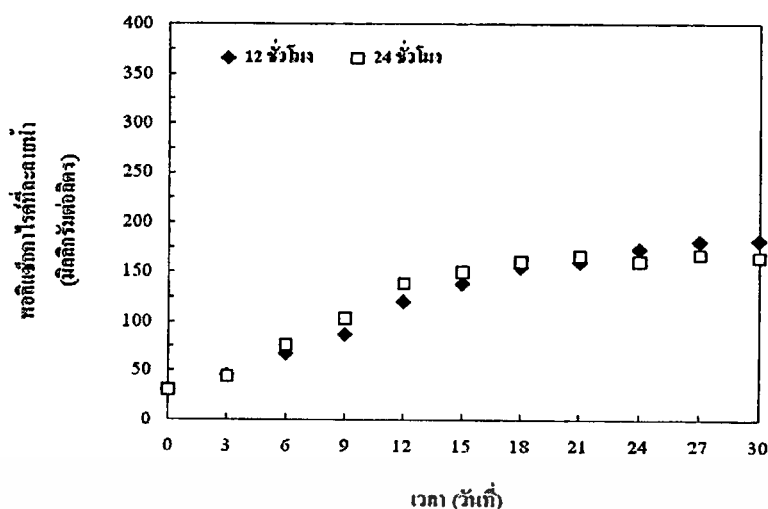
ภาพที่ 4.74 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางที่ได้รับแสงที่แตกต่างกัน



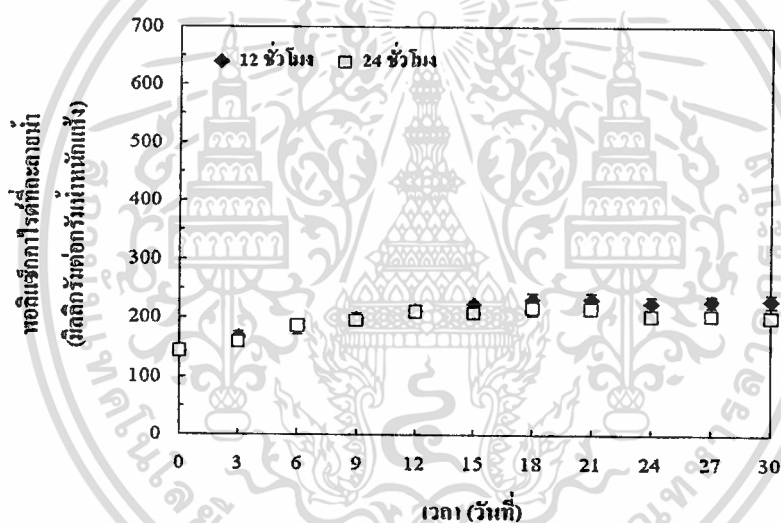
ภาพที่ 4.75 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.76 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.77 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมลิตร) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.78 ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากลางได้รับแสงที่แตกต่างกัน

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรพลาสต์ เอ เป็นรงควัตถุหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง และได้คาร์โบไฮเดรตกับออกซิเจนเป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์แสง (Larkum *et al.* 2003) ในการทดลองครั้งนี้พบว่าในช่วงแรกของการทดลองสาหร่ายมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ใกล้เคียงกันพอถึงช่วงวันที่ 12-18 ของการทดลองสาหร่ายกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่องมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์สูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร แต่หลังจากนั้นพบว่าปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรสูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในวันที่ 9-12 ของการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรสูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากผลผลิตหลักที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงคือคาร์โบไฮเดรตในขณะเดียวกันคาร์โบไฮเดรตเองต้องถูกนำมาใช้ในการสลายเพื่อให้ได้พลังงานในกระบวนการต่างๆ ของเซลล์ ทั้งการเจริญเติบโต การแบ่งเซลล์ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงของแสงทั้งช่วงเวลาที่ได้รับแสงและความเข้มแสงส่งผลต่อการดูดซึมสารอาหาร (Cloem. 1977) ซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีของเซลล์สาหร่ายด้วย ดังนั้นกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรมีพอลิแซ็กคาไรด์สูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง เพราะมีการสลายคาร์โบไฮเดรตเพื่อให้ได้พลังงานต่ำกว่าเพื่อให้สมดุลกับช่วงเวลาที่ได้รับแสง แต่กลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่องแม้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงอยู่ตลอดเวลา แต่มีการสลายเพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอต่อการดูดซึมสารอาหารในช่วงสังเคราะห์แสงเพื่อกิจกรรมของเซลล์นั้นสูงด้วย แต่ก็พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์มีช่วงที่สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับแสงแบบวัฏจักรแสดงว่าช่วงนั้นสารอาหารยังคงเพียงพอและหลังจากนั้นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เซลล์ลดลงเพราะว่าสารอาหารลดลงแม้แสงยังคงมากอยู่ก็ตามแต่การใช้พลังงานยังคงเกิดขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการสลายคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าการสังเคราะห์

ปริมาณแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจึงมักประเมินจากปริมาณผลผลิตที่ได้ (Tzovenis *et al.* 2003) จากการศึกษาเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *Emiliania huxleyi* ภายใต้ความเข้มแสง 10 ถึง 40 ไมโครไฮสโตลต์ต่อตารางเมตร พบว่าเมื่ออัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.35- 0.75 ต่อวัน จะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงจาก 20.9 ± 2.3 ถึง 13.1 ± 0.8 เปอร์เซ็นต์ (Fernandez *et al.* 1996) ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของแสงในสาหร่ายเซลล์เดียว 2 ชนิด *Porphyridium sp.* และ *Porphyridium aerugineum* เมื่อเลี้ยงภายใต้การตกกระทบของโฟตอน ที่ความหนาแน่น 75 , 150 และ 300 ไมโครโมลควินตัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์รวมของเซลล์ใน *P. aerugineum* มากกว่า *Porphyridium sp.* โดยพอลิแซ็กคาไรด์ในเซลล์ของ *P. aerugineum* เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการตกกระทบของโฟตอน แต่จำนวนเซลล์ค่อนข้างคงที่ (Friedman *et al.* 1991) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการปริมาณแสงที่เหมาะสมในสาหร่ายแต่ละชนิดแตกต่างกันไป แต่ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้มีความเข้มแสงที่เท่ากันแต่แตกต่างกันช่วงเวลาที่ได้รับแสงนั่นคือปริมาณแสงที่ได้รับแตกต่างกัน เช่นรายงานว่า การเลี้ยง *Skeletonema costatum* ภายใต้ระยะเวลาได้รับแสงแตกต่างกันโดยได้รับแสงแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร 12:12 พบว่าเซลล์สาหร่ายที่ได้รับแสงแบบต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพกิจกรรมของเอนไซม์ในการตรึงอินทรีย์คาร์บอนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร 12:12 การรวมตัวกันของคาร์บอนไดออกไซด์จากภายนอกเซลล์ผ่านเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นผลผลิตเป็นคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นประสิทธิภาพของกิจกรรมเอนไซม์ในการตรึงคาร์บอนจึงส่งผลต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตพบว่าเปอร์เซ็นต์กิจกรรมของเอนไซม์ในการตรึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนของเซลล์ที่ได้รับแสงต่อเนื่องมี 12 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์ที่ได้รับแสงแบบวัฏจักร 12:12 มี 8 เปอร์เซ็นต์ ของประสิทธิภาพการตรึงอนินทรีย์คาร์บอนต่อเซลล์ (Bertrand *et al.* 1987)

4.1.4 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุดของสาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

4.1.4.1 การกำจัดตะกั่วโดยสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5)

โดยเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระดับพีเอช 4.5 (ชุดควบคุม) และในอาหารที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 0 – 9 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 เป็นเวลา 9 วัน (วันที่ 9 – 18 ของการทดลอง) แล้วแยกเซลล์สาหร่ายย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ที่มีตะกั่ว 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5 จนกระทั่งสาหร่ายตาย (วันที่ 18 – 30 ของการทดลอง) โดยทุก 9 วัน ก่อนแยกเซลล์ย้ายไปเลี้ยงในอาหารใหม่ แล้วนำมาดูดซับตะกั่ว พบว่าการดูดซับตะกั่วของ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 9-27 วัน มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) สูงที่สุดที่อายุ 18 วัน (ตารางที่ 4.1) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 9 วัน ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับที่อายุ 27 วัน และการดูดซับตะกั่วของ *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 9-27 วัน ในแต่ละชุดการทดลอง มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) สูงที่สุดที่อายุ 18 วัน และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอายุ 9 และ 27 วัน ($p < 0.05$) นอกจากนี้ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 9-27 วัน ในแต่ละชุดการทดลอง มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) สูงที่สุดที่อายุ 9 วัน ซึ่งไม่แตกต่างกับที่อายุ 18 วัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 27 วัน ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบสาหร่ายที่อายุเท่ากันทุกชุดการทดลองที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีและมีตะกั่วที่อายุ 9 วัน พบว่า *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว มีค่าการดูดซับสูงกว่า *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว และ *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีและมีตะกั่วซึ่งไม่แตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) และที่อายุ 18-27 วัน พบว่า *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว มีค่าการดูดซับสูงกว่า *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่วซึ่งไม่แตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) โดย *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว ที่อายุ 18 วัน มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 96.23 ± 1.69 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว ที่อายุ 18 วัน มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 93.96 ± 2.10 , 52.10 ± 0.70 และ 40.59 ± 0.69 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว ที่อายุ 9 วัน มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 90.57 ± 2.94 , 50.98 ± 1.49 , 38.69 ± 0.82 และ 92.09 ± 2.44 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp.,

Mastigocladopsis sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในอาหารที่แตกต่างกันที่พีเอชต่ำ (4.5) (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สาหร่าย	อายุสาหร่าย (วัน)/ตะกั่วในอาหาร		
	9 (1 มิลลิกรัมต่อลิตร)	18 (2 มิลลิกรัมต่อลิตร)	27 (3 มิลลิกรัมต่อลิตร)
<i>Phormidium</i>	87.50 ± 2.35^{Ac}	93.96 ± 2.10^{Bcd}	89.15 ± 0.54^{ABF}
<i>Phormidium</i> +ตะกั่ว	90.57 ± 2.94^{Bc}	89.26 ± 2.94^{Bc}	57.24 ± 2.02^{Ad}
<i>Mastigocladopsis</i>	46.46 ± 1.56^{Ab}	52.10 ± 0.70^{Bb}	47.97 ± 1.29^{Ac}
<i>Mastigocladopsis</i> +ตะกั่ว	50.98 ± 1.49^{Bb}	49.85 ± 0.82^{Bb}	29.83 ± 0.61^{Aa}
<i>Hapalosiphon</i>	35.82 ± 0.98^{Aa}	40.59 ± 0.69^{Ba}	37.11 ± 0.82^{Ab}
<i>Hapalosiphon</i> +ตะกั่ว	38.69 ± 0.82^{Ba}	38.15 ± 1.09^{Ba}	26.55 ± 0.59^{Aa}
<i>Chlorella</i>	90.17 ± 0.68^{Ac}	96.23 ± 1.69^{Bd}	90.17 ± 0.40^{Af}
<i>Chlorella</i> +ตะกั่ว	92.09 ± 2.44^{Bc}	90.30 ± 2.44^{Bc}	72.58 ± 2.48^{Ac}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการทดลองในครั้งนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่ว ที่อายุการเลี้ยง 9 วัน จะมีค่าการดูดซับตะกั่วสูงกว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว เนื่องจากเซลล์สาหร่ายได้รับการสัมผัสตะกั่วที่ความเข้มข้นต่ำๆ มาก่อน สาหร่ายมีการปรับตัวโดยกลไกการป้องกันตัว เช่น การตกตะกอนที่ผนังเซลล์สาหร่าย สาหร่ายยังมีการปล่อยสารพอลิแซ็กคาไรด์ออกนอกเซลล์ ซึ่งมีพอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ พอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถช่วยจับตะกั่วทำให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรือทำให้ตะกั่วเหล่านี้ตกตะกอนได้ (สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2549) ซึ่งผนังเซลล์ของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยส่วนเมือกที่สามารถละลายน้ำได้ ประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ (Kreger. 1962) และนอกจากนี้เมื่อไอออนของโลหะหนักถูกขนส่งข้ามผนังเซลล์เข้าไปในไซโตพลาสซึม และจับอยู่กับ โปรตีนหรือตำแหน่งยึดจับภายในเซลล์อื่นๆ ที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก การขนส่งโลหะหนักเข้าภายในเซลล์ อาจเกี่ยวข้องกับขบวนการบริโภคไอออนของแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุอื่นๆ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของสาหร่าย และอาจเกี่ยวข้องกับการสะสมโลหะหนักไว้ในเซลล์ คือ โลหะหนักอาจตกตะกอนด้วยสารที่ถูกหลั่งออกมาจากเซลล์ซึ่งเป็นสารประกอบทุติยภูมิ (secondary metabolite) ของสาหร่ายก็ได้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะขึ้นกับการทำงานภายในเซลล์ขึ้นกับการใช้พลังงาน (Cho *et al.*, 1994; Vymazal. 1995) โดยสาหร่ายมีกลไกเหล่านี้เพื่อปกป้องตัวเองจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นพิษทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตอยู่ได้ในภาวะไม่เหมาะสม และยังมีผลต่อเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ในอาหารที่มีตะกั่ว คือมีคุณสมบัติในการทนต่อตะกั่วมากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อสภาวะแวดล้อมใหม่และอยู่รอดต่อไปได้ โดยในแหล่งน้ำธรรมชาติพบว่าสาหร่ายพวกที่อาศัยบริเวณชายฝั่งสามารถทนต่อโลหะหนักมากกว่าพวกที่อยู่ห่างจากฝั่ง เพราะบริเวณชายฝั่งเป็นบริเวณที่ได้รับ โลหะหนักจากแผ่นดินมากกว่านั่นเอง (Ahner *et al.* 1994) จึงทำให้ในการทดลองครั้งนี้เมื่อมีการนำเซลล์เหล่านี้แยกออกมาดูระดับตะกั่วส่งผลให้มีความสามารถมากกว่าเซลล์ที่ไม่เคยสัมผัสตะกั่วมาก่อน แต่เมื่อนำเซลล์ที่อายุการเลี้ยง 18 วัน พบว่า เซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารที่มีตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วดีกว่าในอาหารที่ไม่มีตะกั่ว และยิ่งต่ำกว่ามากในเซลล์สาหร่ายที่อายุการเลี้ยง 27 วัน ที่มีปริมาณตะกั่วในอาหารเพิ่มขึ้น 2 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

การดูดซับหรือการกำจัด โลหะหนักแบบระบบที่มีชีวิต คือการใช้สาหร่ายที่ยังคงมีชีวิตอยู่ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นสาหร่ายที่ยังคงมีขบวนการการทำงานของเซลล์ต่างๆ อยู่อย่างปกติ โดยใช้ในรูปแบบของ growing cell คือให้เซลล์สาหร่ายนั้นเจริญเติบโตอยู่ในระบบบำบัด และนิยมใช้บำบัดในขั้นตอนที่สาม หรือ tertiary treatment คือในขั้นตอนสุดท้ายที่มีโลหะหนักเข้มข้นไม่สูงส่วนใหญ่คือไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่อยู่ในน้ำที่มีปริมาณมาก โดยพบรายงานว่าการเลี้ยงสาหร่ายในสารละลายแคดเมียม พบว่าปริมาณแคดเมียมในเซลล์สาหร่ายมีมากกว่าที่ถูกดูดซับภายนอกเซลล์สาหร่าย (Matsunaga *et al.* 1999; Perez-Rama *et al.* 2002) โดยทั่วไปสาหร่ายขนาดเล็กมีวงจรชีวิตสั้นเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตร่วมด้วยพบว่า ที่อายุการเลี้ยง 18-27 วัน เซลล์อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตคงที่และลดลงในที่สุดแสดงว่าเซลล์มีการตายเกิดขึ้น เนื่องจากเซลล์สาหร่ายในการทดลองครั้งนี้อาจทนต่อระยะเวลาในการปรับตัวที่สั้นไป เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของตะกั่วที่สูงขึ้นตะกั่วอาจเข้าสู่เซลล์มากจนเซลล์สาหร่ายไม่สามารถดูดซับตะกั่วได้เพิ่มขึ้น ทำให้หยุดการดูดซับและตายไปในที่สุดจึงส่งผลให้ความสามารถลดลงในที่สุด

สาหร่ายที่มีชีวิตมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ หรือลักษณะผนังเซลล์ของสาหร่าย โดยพบว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายกับเซลล์แต่ไม่ทำให้สาหร่ายตาย (sublethal) จะทำให้สาหร่ายเพิ่มปริมาณความหนาของเมือกที่คลุมเซลล์และเชื้อหุ้มไซโตพลาสซึม ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนองค์ประกอบไปด้วย

4.1.4.2 การกำจัดตะกั่วโดยสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

โดยเก็บเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุแตกต่างกันทุก 1 สัปดาห์ นำมาดูดซับตะกั่ว พบว่าการดูดซับตะกั่วของ *Phormidium* sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละระดับความเข้มข้นของสารอาหาร 100, 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.2) แต่ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ ให้ค่าการดูดซับต่ำสุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ *Phormidium* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน และที่อายุ 2-3 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ 10 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) โดยในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 93.89 ± 3.56 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และในสารอาหารความเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 86.58 ± 5.24 , 83.28 ± 0.35 และ 78.87 ± 2.25 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นของสารอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	อายุสาหร่าย (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
100	83.39 ± 4.68^{Aa}	89.41 ± 3.58^{Ab}	90.70 ± 3.20^{Ab}	93.89 ± 3.56^{Ac}
50	81.60 ± 5.47^{Aa}	83.30 ± 4.45^{Aab}	86.58 ± 5.24^{Aab}	81.38 ± 4.96^{Ab}
25	81.91 ± 4.13^{Aa}	81.65 ± 4.28^{Aab}	83.28 ± 0.35^{Aab}	80.64 ± 2.36^{Ab}
10	78.38 ± 2.47^{Ba}	76.12 ± 2.32^{ABa}	78.87 ± 2.25^{Ba}	69.30 ± 2.42^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Mastigocladopsis sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหาร 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.3) โดยอายุ 1 สัปดาห์ ให้ค่าการดูดซับต่ำสุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ที่เลี้ยงในแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ *Mastigocladopsis* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เพียงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน และที่อายุ 2-3 สัปดาห์ ที่เพียงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) โดยในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 51.24 ± 0.97 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และในสารอาหารความเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 47.83 ± 1.90 , 45.59 ± 1.43 และ 44.36 ± 1.24 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นของสารอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
100	44.77 ± 1.18^{Aa}	49.70 ± 0.15^{Bb}	50.65 ± 0.40^{Bb}	51.24 ± 0.97^{Bc}
50	44.15 ± 1.27^{Aa}	47.03 ± 1.14^{Aab}	47.83 ± 1.90^{Aab}	46.89 ± 1.13^{Ab}
25	43.23 ± 1.91^{Aa}	43.65 ± 1.89^{Aa}	45.59 ± 1.43^{Aa}	43.40 ± 1.14^{Aab}
10	42.03 ± 1.80^{Aa}	43.37 ± 1.37^{Aa}	44.36 ± 1.24^{Aa}	41.49 ± 1.79^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Hapalosiphon sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เพียงในความเข้มข้นของสารอาหาร 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.4) โดยอายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-3 สัปดาห์ ($p < 0.05$) แต่ที่เพียงในและระดับสารอาหารเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ *Hapalosiphon* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เพียงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกันที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน และที่อายุ 2 สัปดาห์ ที่เพียงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับสูงกว่า แต่ไม่แตกต่างกับ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ 10 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) และที่อายุ 3 สัปดาห์ ที่เพียงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าซึ่งไม่แตกต่างกับ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) โดยในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 42.75 ± 0.70 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห้ง และในสารอาหารความเข้มข้น 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3, 4 และ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 37.55 ± 1.40 , 34.64 ± 1.34 และ 33.47 ± 1.11 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Haplosiphon* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นของสารอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
100	34.15 ± 0.94^{Aa}	37.73 ± 1.31^{Bb}	38.50 ± 0.84^{Bb}	42.75 ± 0.70^{Cc}
50	33.35 ± 1.27^{Aa}	36.87 ± 1.56^{Ab}	37.55 ± 1.40^{Ab}	37.31 ± 1.52^{Ab}
25	32.50 ± 1.26^{Aa}	32.79 ± 1.39^{Ab}	33.68 ± 1.17^{Aa}	34.64 ± 1.34^{Ab}
10	32.99 ± 1.30^{Aa}	32.63 ± 1.30^{Aa}	33.47 ± 1.11^{Aa}	33.02 ± 1.21^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นของสารอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
100	96.09 ± 4.76^{Aa}	99.02 ± 5.17^{Aa}	108.22 ± 3.19^{Ab}	108.10 ± 3.87^{Ab}
50	96.02 ± 5.04^{Aa}	96.14 ± 4.74^{Aa}	97.39 ± 4.54^{Aab}	94.61 ± 4.30^{Aa}
25	95.77 ± 5.03^{Aa}	95.58 ± 4.44^{Aa}	96.05 ± 3.81^{Aab}	94.45 ± 4.35^{Aa}
10	94.87 ± 3.18^{Aa}	94.46 ± 4.24^{Aa}	94.81 ± 4.29^{Aa}	93.20 ± 4.36^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Chlorella sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละระดับความเข้มข้นของสารอาหาร 100, 50, 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับตะกั่ว (q) ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.5) เมื่อเปรียบเทียบ *Chlorella* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน ที่อายุ 1-2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน ที่อายุ 3 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับต่ำกว่าและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นของสารอาหารระดับอื่นๆ ($p < 0.05$) และที่อายุ 4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในสารอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับสูงกว่า และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นของสารอาหารระดับอื่นๆ ($p < 0.05$) โดยในสารอาหารความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 108.22 ± 3.19 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และในสารอาหารเข้มข้น 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3 สัปดาห์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 97.39 ± 4.54 , 96.05 ± 3.81 และ 94.87 ± 3.18 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

4.1.4.3 การกำจัดตะกัวโดยสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต

โดยเก็บเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ (ไนเตรทและฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นชุดควบคุม) และผันแปรสภาวะคือ กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์, กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุแตกต่างกันทุก 1 สัปดาห์ นำมาดูดซับตะกัวพบว่า *Phormidium* sp. ที่อายุการเลี้ยงเท่ากันแต่เลี้ยงภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและ ฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยที่อายุ 1-2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับ (q) ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.6) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ *Phormidium* sp. ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกัน 1-4 สัปดาห์ พบว่ากลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติและที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 2-3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1 สัปดาห์ ($p < 0.05$) โดยกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 102.01 ± 2.47 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และกลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ, กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3, 4 และ 2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 93.70 ± 2.28 , 98.93 ± 2.07 และ 89.79 ± 2.90 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณ ไนเตรทและฟอสเฟต (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไนเตรทและฟอสเฟต (เปอร์เซ็นต์)	อายุสัปดาห์ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
ไนเตรทและฟอสเฟต (100)	83.92 ± 3.99^{Aa}	88.79 ± 2.99^{Aa}	93.70 ± 2.28^{Ab}	92.66 ± 3.50^{Ab}
ไนเตรท (50)	84.59 ± 4.32^{Aa}	90.01 ± 3.15^{Aa}	101.83 ± 2.33^{Bc}	102.01 ± 2.47^{Bc}
ฟอสเฟต (50)	82.71 ± 4.85^{Aa}	90.31 ± 3.55^{ABa}	98.64 ± 2.10^{Bbc}	98.93 ± 2.07^{Bbc}
ไนเตรทและฟอสเฟต (50)	83.97 ± 3.92^{Aa}	89.79 ± 2.90^{Aa}	87.76 ± 2.40^{Aa}	82.74 ± 2.18^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Mastigocladopsis sp. ที่อายุการเลี้ยงเท่ากันแต่เลี้ยงภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยที่อายุ 1-2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.7) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ *Mastigocladopsis* sp. ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกัน 1-4 สัปดาห์ พบว่ากลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ ที่อายุ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 2 และ 4 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1 สัปดาห์ ($p < 0.05$) กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-3 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุแตกต่างกัน 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 63.43 ± 0.83 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และกลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ, กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3, 4 และ 2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 53.55 ± 1.91 , 61.94 ± 0.75 และ 49.16 ± 1.10 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไนเตรทและฟอสเฟต (เปอร์เซ็นต์)	อายุสัปดาห์ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
ไนเตรทและฟอสเฟต (100)	46.26 ± 1.41^{Aa}	49.29 ± 0.68^{ABa}	53.55 ± 1.91^{Bb}	51.14 ± 1.05^{Bb}
ไนเตรท (50)	47.22 ± 1.59^{Aa}	51.64 ± 1.74^{Ba}	58.80 ± 1.08^{Cc}	63.43 ± 0.83^{Dc}
ฟอสเฟต (50)	47.37 ± 1.25^{Aa}	50.55 ± 1.16^{Ba}	58.21 ± 0.85^{Cc}	61.94 ± 0.75^{Dc}
ไนเตรทและฟอสเฟต (50)	45.20 ± 1.14^{Aa}	49.16 ± 1.10^{Aa}	48.02 ± 1.72^{Aa}	47.16 ± 0.61^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Hapalosiphon sp. ที่อายุการเลี้ยงเท่ากันแต่เลี้ยงภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยที่อายุ 1-2 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.8) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 3-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ *Hapalosiphon* sp. ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกัน 1-4 สัปดาห์ กลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ, กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับต่ำกว่าและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-3 สัปดาห์ ($p < 0.05$) โดยกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 45.71 ± 0.53 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และกลุ่มที่เลี้ยงโดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ, กลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยงโดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4, 4 และ 2 สัปดาห์ มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับสูงสุดเท่ากับ 42.41 ± 1.29 , 44.44 ± 0.60 และ 38.35 ± 0.98 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่มีอายุแตกต่างกัน ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไนเตรทและฟอสเฟต (เปอร์เซ็นต์)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
ไนเตรทและฟอสเฟต (100)	34.67 ± 0.57^{Aa}	38.45 ± 0.94^{Ba}	40.94 ± 0.33^{BCb}	42.41 ± 1.29^{Cb}
ไนเตรท (50)	34.73 ± 0.91^{Aa}	39.55 ± 0.18^{Ba}	44.08 ± 0.36^{Cc}	45.71 ± 0.53^{Cc}
ฟอสเฟต (50)	35.01 ± 0.55^{Aa}	39.00 ± 0.44^{Ba}	43.16 ± 0.44^{Cc}	44.44 ± 0.60^{Cbc}
ไนเตรทและฟอสเฟต (50)	34.09 ± 0.56^{Aa}	38.35 ± 0.98^{Ba}	37.61 ± 0.61^{Ba}	38.04 ± 0.87^{Ba}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Chlorella sp. ที่อายุการเลี้ยงเท่ากันแต่เลี้ยงภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.9) และกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 2-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ *Chlorella* sp. ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกัน 1-4 สัปดาห์ กลุ่มที่เลี้ยง โดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 2-3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1 สัปดาห์ ($p < 0.05$) กลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 119.17 ± 3.17 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และกลุ่มที่เลี้ยง โดยความเข้มข้นของสารอาหารระดับปกติ, กลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่เลี้ยง โดยมีการลดความเข้มข้นของไนเตรทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และฟอสเฟตในสารอาหารเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 4, 4 และ 3 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 107.02 ± 2.61 , 118.67 ± 3.09 และ 99.50 ± 4.18 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่มีอายุแตกต่างกัน ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไนเตรทและฟอสเฟต (เปอร์เซ็นต์)	อายุสัปดาห์ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
ไนเตรทและฟอสเฟต (100)	96.78 ± 4.62^{Aa}	100.10 ± 1.60^{ABa}	106.24 ± 2.65^{ABa}	107.02 ± 2.61^{Ba}
ไนเตรท (50)	95.70 ± 3.19^{Aa}	109.59 ± 1.87^{Bb}	116.76 ± 3.09^{BCb}	119.17 ± 3.17^{Cb}
ฟอสเฟต (50)	93.92 ± 3.88^{Aa}	108.26 ± 1.54^{Bb}	116.74 ± 2.47^{BCb}	118.67 ± 3.09^{Cb}
ไนเตรทและฟอสเฟต (50)	96.57 ± 4.38^{Aa}	99.04 ± 4.28^{Aa}	99.50 ± 4.18^{Aa}	99.09 ± 5.35^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.1.4.4 การดูดซับตะกั่วโดยสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะการได้รับช่วงเวลารับแสงแตกต่างกัน

โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบต่อเนื่อง (24 ชั่วโมงต่อวัน) และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบวัฏจักร 12 : 12 (12 ชั่วโมงต่อวัน) โดยเก็บเซลล์สาหร่ายที่อายุแตกต่างกันทุก 1 สัปดาห์ นำมาดูดซับตะกั่ว พบว่าการดูดซับตะกั่ว (q) ของ *Phormidium* sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.10) มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบ *Phormidium* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 94.03 ± 2.83 และ 92.09 ± 3.78 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

การดูดซับตะกั่วของ *Mastigocladopsis* sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.11) โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับต่ำกว่าและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 2-4 สัปดาห์ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ *Mastigocladopsis* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในช่วงเวลาที่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 53.94 ± 1.67 และ 50.72 ± 1.39 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ช่วงเวลาได้รับแสง (ต่อวัน)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
12 ชั่วโมง	83.95 ± 4.18^{Aa}	88.72 ± 2.76^{Aa}	91.06 ± 2.98^{Aa}	94.03 ± 2.83^{Aa}
24 ชั่วโมง	83.92 ± 3.99^{Aa}	87.37 ± 1.66^{Aa}	90.22 ± 2.94^{Aa}	92.09 ± 3.78^{Aa}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.11 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Mastigocladopsis* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากการได้รับแสงที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ช่วงเวลาได้รับแสง (ต่อวัน)	อายุสำหรับ (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
12 ชั่วโมง	45.07 ± 1.29^{Aa}	49.10 ± 0.79^{Ba}	53.04 ± 0.50^{Ca}	53.94 ± 1.67^{Ca}
24 ชั่วโมง	46.26 ± 1.41^{Aa}	49.29 ± 0.68^{Ba}	51.62 ± 1.43^{Ba}	50.72 ± 1.39^{Ba}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การดูดซับตะกั่วของ *Hapalosiphon* sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1- 4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.12) โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรและกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ *Hapalosiphon* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 43.28 ± 0.53 และ 42.41 ± 1.29 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Hapalosiphon* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากาได้รับแสงที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ช่วงเวลารับแสง (ต่อวัน)	อายุสาหร่าย (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
12 ชั่วโมง	34.08±0.57 ^{Aa}	39.02±1.39 ^{ABa}	40.62±0.90 ^{BCa}	43.28±0.53 ^{Ca}
24 ชั่วโมง	34.67±0.57 ^{Aa}	37.88±1.55 ^{ABa}	39.20±0.28 ^{BCa}	42.41±1.29 ^{Ca}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การดูดซับตะกั่วของ *Chlorella* sp. ที่อายุแตกต่างกันระหว่าง 1-4 สัปดาห์ ที่เลี้ยงในแต่ละช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.13) โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรและกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับที่อายุ 3 สัปดาห์ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่อายุ 1-2 สัปดาห์ ($p < 0.05$) สำหรับ *Chlorella* sp. ที่อายุเท่ากันแต่เลี้ยงในช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักร และกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง ที่อายุ 4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 113.18±3.05 และ 112.17±3.54 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่มีอายุแตกต่างกันที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลากาได้รับแสงที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ช่วงเวลารับแสง (ต่อวัน)	อายุสาหร่าย (สัปดาห์)			
	1	2	3	4
12 ชั่วโมง	96.25±4.58 ^{Aa}	97.64±2.17 ^{ABa}	107.63±3.58 ^{BCa}	113.18±3.05 ^{Ca}
24 ชั่วโมง	96.78±4.62 ^{Aa}	98.46±3.08 ^{Aa}	106.59±3.24 ^{ABa}	112.17±3.54 ^{Ba}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การกำจัดตะกั่วโดยเซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่ความเข้มข้นของสารอาหารแตกต่างกัน พบว่าสาหร่ายชนิดเดียวกันที่เลี้ยงด้วยสารอาหารที่เข้มข้นแตกต่างกัน ส่งผลต่อการดูดซับที่แตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการดูดซับตะกั่วของเซลล์ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของสารอาหารทุกระดับ ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5) เพราะในช่วงสัปดาห์แรกความเข้มข้นของสารอาหารที่มีนั้นมากพอต่อการเจริญเติบโตจึงมีการสร้างและสะสมอาหารได้ในปริมาณที่เท่าๆ กัน ดังนั้นเมื่อนำมาดูดซับตะกั่วจึงมีความสามารถใกล้เคียงกัน เมื่อสาหร่ายอายุมากขึ้นความเข้มข้นของสารอาหารจึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารสะสมจึงมีผลต่อการดูดซับตะกั่ว ทำให้สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารเข้มข้นต่ำมีความสามารถในการดูดซับลดลงเพราะว่าสารอาหารไม่เพียงพอที่จะใช้ในการเจริญเติบโต สะสมอาหาร กระบวนการสังเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีรวมถึงการสร้างโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ได้ (Schluter. 1998) ดังนั้นเซลล์ที่เลี้ยงในความเข้มข้นสารอาหารแตกต่างกันจึงส่งผลต่อปริมาณโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ได้แตกต่างกัน โดยพบว่าสารอาหารมากจะทำให้มีการสังเคราะห์โปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์มากขึ้นด้วยเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับตะกั่วกับผลของปริมาณโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ในการทดลองนี้สอดคล้องกัน

การกำจัดตะกั่วโดยเซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ภายใต้สภาวะในการเลี้ยงที่มีการลดปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตพบว่า การดูดซับตะกั่วของเซลล์ที่เลี้ยงในสารอาหารทุกระดับ ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9) เพราะในช่วงสัปดาห์แรกสารอาหารที่มีความเข้มข้นของไนเตรทและฟอสเฟตนั้นเพียงพอต่อการเจริญเติบโตจึงมีการสร้างและสะสมอาหารได้ในปริมาณที่เท่าๆ กัน ดังนั้นจึงมีการดูดซับตะกั่วใกล้เคียงกัน และเมื่อสาหร่ายอายุมากขึ้นพบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สูงขึ้นเนื่องมาจากมีความสัมพันธ์กับปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่สูงขึ้นเนื่องจากการลดไนโตรเจนและลดฟอสฟอรัส เพราะการลดไนเตรทและฟอสเฟตในอาหารทำให้การสังเคราะห์โปรตีนลดลงแต่จะทำให้มีการเพิ่มคาร์โบไฮเดรต (Stehfest et al. 2005) ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายภายใต้การลดไนเตรทและฟอสเฟตในครั้งนี้ส่งผลให้พอลิแซ็กคาไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับตะกั่วที่สูงขึ้นด้วย

การกำจัดตะกั่วของของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาได้รับแสงแตกต่างกัน โดยการดูดซับตะกั่วของเซลล์สาหร่ายทุกชนิดที่เลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีช่วงเวลาได้รับแสงแตกต่างกัน ที่อายุ 1-4 สัปดาห์ มีค่าการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13) และพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่สูงขึ้นและปริมาณโปรตีนที่ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแสงทั้งช่วงเวลาที่ได้รับแสงและความเข้มแสงส่งผลต่อการดูดซึมสารอาหาร (Cloem. 1977) ซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีของเซลล์สาหร่ายด้วยโดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์แสง ดังนั้นกลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบวัฏจักรมีพอลิแซ็กคาไรด์สูง

กว่ากลุ่มที่เลี้ยงภายใต้แสงแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามจากการทดลองนี้พบว่าสาหร่ายมีปริมาณโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ไม่แตกต่างกันมากจึงทำให้ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกันมากนัก

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับศักยภาพของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ในการจับกับไอออนของโลหะหนัก เช่น หมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล ฟอสฟอริล และเอไมด์ (Acharya *et al.* 2009) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแตกตัวและเกิดประจุได้ในสารละลายที่มีพีเอชต่างกัน โดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิล ที่แตกตัวเป็นประจุลบที่ พีเอช 1.7-4.7 (Schiewer and Volesky. 2000) ซึ่งสามารถจับกับประจุบวกของตะกั่วได้ และในการศึกษาครั้งนี้ทดลองการดูดซับในสารละลายตะกั่วที่มีค่าพีเอช 4.5 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ตะกั่วสามารถแตกตัวได้เต็มที่ ดังนั้นค่าพีเอชของสารละลายจึงมีผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์ตัวดูดซับด้วย ซึ่งขึ้นกับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้น ตัวอย่างเช่นค่า pKa ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คือ 9.5-13, หมู่คาร์บอนิล (C=O) และคาร์บอกซิล (COOH) คือ 1.7-4.7 และ เอมีน (NH₂) คือ 8-11 เป็นต้น (Schiewer and Volesky. 2000) ดังนั้นพอลิแซ็กคาไรด์จึงเป็นองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่วในครั้งนี้ ซึ่งจากรายงานการศึกษาต่างๆ นี้จึงชี้ให้เห็นได้ว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์นั้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์ และชี้ให้เห็นว่าสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ ส่วนที่ติดผนังเซลล์ (capsular polysaccharide-CPS) และพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนที่ละลายน้ำ (exocellular polysaccharides-EPS) ได้สูงจะมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสิ่งมีชีวิตที่ผลิต CPS และ EPS ได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า

Stehfest *et al.* (2005) ศึกษาการตอบสนองจากสารอาหารในโตรเจน (N) หรือฟอสฟอรัส (P) ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชัน carbo/amide ในไซยาโนแบคทีเรีย 3 สายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa*, *Chroococcus minutus* และ *Nostoc sp.* ภายใต้ N หรือ P ที่มีจำนวนจำกัดในอาหาร ตามลำดับ สายพันธุ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันในช่วงเริ่มต้นภายใต้สารอาหารที่พอเพียงของอัตราส่วนระหว่างหมู่ carbo/amide ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1 สำหรับภายใต้สภาวะ N จำกัดพบว่า สาหร่ายทุกสายพันธุ์ มีการเพิ่มอัตราส่วนของหมู่ carbo/amide ที่แตกต่างกันอย่างจำเพาะของแต่ละสายพันธุ์ โดย *M. aeruginosa* พบว่ามีอัตราที่สูงที่สุดซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุม 3.5 เท่า หลังจาก 25 วันของการทดลอง สำหรับ *C. minutus* เพิ่มขึ้น 4.1 เท่า และ *Nostoc sp.* เพิ่มขึ้น 6.7 เท่า หลังจาก 14 และ 10 วันของการทดลอง และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากวันที่ 21 ของการเลี้ยง ในสายพันธุ์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม สำหรับภายใต้สภาวะ P จำกัด *M. aeruginosa* และ *C. minutus* แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนใกล้เคียงกันที่คล้ายกันของอัตราส่วนหมู่ carbo/amide ที่ใกล้เคียงกลุ่มควบคุม ในขณะที่ *Nostoc sp.* มีอัตราส่วนของหมู่ carbo/amide เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในการศึกษาใน *Zoogloea sp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียน้ำเค็ม สามารถสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ได้สองแบบคือพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์และละลายอยู่ในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(EPS) และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์แต่ยังคงเกาะติดอยู่บนผนังเซลล์ (CPS) โดยพบว่าในส่วนของ CPS สามารถดูดซับโลหะหนักโครเมียม, ตะกั่วและเหล็กได้มีประสิทธิภาพสูงมาก โดยดูดซับได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ จากสารละลายซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุลบ (anionic polysaccharides) เช่น น้ำตาลที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบเช่น uronic acid ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้ทำหน้าที่เป็นตัวจับประจุบวกสองของโลหะหนักได้ดี (Kong *et al.* 1998) นอกจากนี้ได้มีการทดลองสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ (CPS /EPS) จากไซยาโนแบคทีเรีย *Gloeothece magna* พบว่าไซยาโนแบคทีเรียชนิดนี้มี CPS 15 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมของสาหร่าย และมี EPS 9 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม และเมื่อนำมาศึกษาความสามารถของพอลิแซ็กคาไรด์ในการดูดซับแคดเมียมและแมงกานีส พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 425-115 ไมโครกรัมต่อกรัม และดูดซับแมงกานีสได้ 906-473 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งจากการทดลองนี้จึงเป็นหลักฐานชี้ให้เห็นชัดเจนว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นส่วนหนึ่งที่หุ้มเซลล์สาหร่ายไว้นั้น สามารถแสดงบทบาทหลักในการดูดซับโลหะหนักได้ (Mohamed. 2001) นอกจากนี้การนำสาหร่าย *Gloeocapsa gelatinosa* ที่มีเมือกหุ้มเซลล์มาดูดซับตะกั่วโดยเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ทำการสกัดเมือกหุ้มเซลล์ออกแล้วซึ่งผลที่ได้พบว่าพบว่าเซลล์สาหร่ายที่มี CPS หุ้มเซลล์สามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 8.59 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่เซลล์สาหร่ายที่ผ่านการสกัด CPS กำจัดตะกั่วได้เพียง 1.51 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่ายพบว่าสาหร่ายที่มี CPS หุ้มเซลล์มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงกว่ามาก (Ruangsomboon *et al.* 2006b)

รายงานต่างๆ นี้จึงชี้ให้เห็นได้ว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์นั้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งยึดจับโลหะหนักของพอลิแซ็กคาไรด์ และชี้ให้เห็นว่าสาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถผลิต CPS และ EPS ได้สูงมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสิ่งมีชีวิตที่ผลิต CPS และ EPS ได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหมู่ฟังก์ชันต่างกันมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้น ซึ่งปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ในการทดลองครั้งนี้สัมพันธ์กับการดูดซับตะกั่วและสอดคล้องกับหลายรายงานข้างต้น

ในการทดลองครั้งนี้พบว่าในสาหร่ายกลุ่มที่เลี้ยงในอาหารที่เข้มข้นปกติ กลุ่มที่เลี้ยงในอาหารที่ลดไนเตรทหรือฟอสเฟต และกลุ่มที่เลี้ยงที่มีช่วงเวลาที่ได้รับแสงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13) พบว่าเมื่ออายุการเลี้ยงมากขึ้นทำให้การดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอายุสาหร่ายหรือระยะเวลาในการเลี้ยงสาหร่าย (algal age or culture time) มีผลหลักต่อชนิด ปริมาณ และองค์ประกอบของสารต่างๆ หรืออาหารสะสมในเซลล์สาหร่าย และพบว่าการสะสมโลหะหนักโดยสาหร่ายอาจผันแปรได้แตกต่างกันขึ้นกับอายุของสาหร่าย และนอกจากนี้ยังพบว่ากลไกของเซลล์สาหร่ายในการเพิ่มความทนทานต่อโลหะหนักนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างช่วงชีวิตของการเจริญเติบโตหรือช่วงอายุของสาหร่ายที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากสามารถเพิ่มปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เคลือบที่ผิวเซลล์หรือปล่อยออกนอกเซลล์ได้นั่นเอง (Joux-Arab *et al.* 2000) เช่นรายงานว่าการใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Calothrix marchica* ที่อายุการเลี้ยงแตกต่างกันคือ 4, 10 และ 14 วัน พบว่าสาหร่ายที่อายุ 14 วัน สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.64 ± 0.95 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนสาหร่ายที่อายุ 4 และ 10 วัน ค่าการดูดซับตะกั่วไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.53 ± 0.03 และ 2.56 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Ruangsomboon *et al.* 2006a) นอกจากนี้สาหร่าย *Thiothrix* ที่มีอายุ 1 วัน สะสมนิกเกิลและสังกะสีได้น้อยกว่าเซลล์สาหร่ายที่มีอายุ 2-5 วัน (Shuttleworth and Unz. 1993) และในการทดลองนี้สำหรับการเลี้ยงสาหร่ายในสภาวะที่มีความเข้มข้นของอาหารต่ำมาก พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออายุการเลี้ยงเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากองค์ประกอบทางชีวเคมีของเซลล์โดยเฉพาะปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์มีในปริมาณต่ำลงนั่นเอง

ปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายเปลี่ยนแปลง เช่น สาร antibiotic จะทำให้มีการเพิ่มหมู่ free carboxyl และกลุ่ม amine และยังมีปัจจัยเรื่องสภาวะของการเลี้ยงนอกเหนือจากการทดลองในครั้งนี้ เช่น การเปลี่ยนค่าพีเอช การได้รับรังสี การได้รับยาฆ่าเชื้อรา หรือปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ แหล่งสารอาหาร เป็นต้น (Volesky. 1990) ซึ่งเห็นได้ว่าการปรับสภาวะในการเลี้ยงในการทดลองครั้งนี้ส่งผลถึงความสามารถในการกำจัดตะกั่วของเซลล์สาหร่ายได้

4.2 ความสามารถของสาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

แบบระบบที่มีชีวิต

4.2.1 คุณภาพน้ำของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ ไนเตรท-ไนโตรเจน, ไนไตรท์-ไนโตรเจน, แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต (soluble reactive phosphate, SRP) ในทุกชุดการทดลองซึ่งประกอบด้วยชุดการทดลองที่เป็นน้ำเสียไม่ใส่เซลล์สาหร่ายเป็นชุดควบคุม และชุดที่ใส่เซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสีย พบว่าการลดลงของปริมาณไนเตรทของชุดทดลองที่ใส่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองที่สิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14) (ตารางที่ 4.14 และ 4.15) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุดเท่ากับ 51.10 ± 1.28 , 59.15 ± 1.01 , 53.76 ± 1.67 , 67.80 ± 1.71 , 45.37 ± 0.79 , 54.18 ± 0.76 , 55.31 ± 0.45 และ 59.28 ± 0.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การลดลงของปริมาณไนโตรเจนของชุดทดลองที่ใส่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง ที่สิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14) (ตารางที่ 4.16 และ 4.17) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุดเท่ากับ 47.83 ± 0.92 , 58.38 ± 0.67 , 73.75 ± 0.49 , 86.14 ± 1.10 , 66.46 ± 0.46 , 91.56 ± 0.91 , 49.66 ± 1.10 และ 59.02 ± 0.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.14 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	30.76 ± 0.58^{Ca}	29.40 ± 0.54^{Cd}	26.08 ± 0.25^{Bf}	23.53 ± 0.51^{Ae}	23.39 ± 2.44
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	30.76 ± 0.58^{Ca}	29.52 ± 0.11^{Cd}	26.70 ± 0.49^{Bf}	24.31 ± 0.33^{Ae}	20.95 ± 0.54
<i>Phormidium</i> +กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	23.20 ± 0.25^{Cc}	20.35 ± 0.17^{Ba}	15.04 ± 0.43^{Ac}	51.10 ± 1.28
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	23.04 ± 0.55^{Cbc}	16.77 ± 0.36^{Bb}	12.55 ± 0.15^{Ab}	59.15 ± 1.01
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	21.65 ± 0.94^{Cb}	18.89 ± 0.43^{Bcd}	14.20 ± 0.31^{Ac}	53.76 ± 1.67
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	17.78 ± 0.26^{Ca}	13.21 ± 0.35^{Ba}	9.89 ± 0.42^{Aa}	67.80 ± 1.71
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	24.04 ± 0.24^{Cc}	19.22 ± 0.41^{Bd}	16.80 ± 0.25^{Ad}	45.37 ± 0.79
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	30.76 ± 0.58^{Da}	23.64 ± 0.27^{Cc}	18.00 ± 0.21^{Bc}	14.09 ± 0.24^{Ac}	54.18 ± 0.76

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.15 ปริมาณไนเตรทในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Chlorella* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	30.25 ± 0.52^{Ca}	29.10 ± 0.42^{Cb}	26.23 ± 0.25^{Bc}	23.26 ± 0.40^{Ac}	23.05 ± 1.78
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	30.25 ± 0.52^{Da}	28.95 ± 0.40^{Cb}	26.85 ± 0.25^{Bc}	24.71 ± 0.18^{Ad}	18.27 ± 1.36
<i>Chlorella</i> +กรอง	30.25 ± 0.52^{Da}	21.88 ± 0.21^{Ca}	18.90 ± 0.14^{Bb}	13.52 ± 0.15^{Ab}	55.31 ± 0.45
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	30.25 ± 0.52^{Da}	21.92 ± 0.49^{Ca}	16.07 ± 0.23^{Ba}	12.31 ± 0.21^{Aa}	59.28 ± 0.87

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสี้ยวจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สำหรับ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp.

สาหร่าย+น้ำเสี้ยว	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสี้ยวกรอง (ชุดควบคุม)	1.77±0.01 ^{Da}	1.53±0.04 ^{Cc}	1.40±0.03 ^{Bg}	1.29±0.02 ^{Ag}	27.20±1.53
น้ำเสี้ยวไม่กรอง (ชุดควบคุม)	1.77±0.01 ^{Da}	1.52±0.01 ^{Cc}	1.34±0.02 ^{Bg}	1.25±0.02 ^{Ag}	29.71±1.24
<i>Phormidium</i> +กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	1.13±0.01 ^{Cd}	0.98±0.01 ^{Bf}	0.92±0.01 ^{Af}	47.83±0.92
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	1.01±0.02 ^{Cc}	0.90±0.02 ^{Bc}	0.74±0.01 ^{Ac}	58.38±0.67
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	1.13±0.02 ^{Cd}	0.76±0.02 ^{Bc}	0.47±0.01 ^{Ac}	73.75±0.49
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	0.96±0.02 ^{Cbc}	0.49±0.02 ^{Bb}	0.25±0.02 ^{Ab}	86.14±1.10
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	0.94±0.02 ^{Cb}	0.83±0.01 ^{Bd}	0.59±0.01 ^{Ad}	66.46±0.46
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	1.77±0.01 ^{Da}	0.62±0.01 ^{Ca}	0.42±0.01 ^{Ba}	0.15±0.02 ^{Aa}	91.56±0.91

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.17 ปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสี้ยวจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สำหรับ *Chlorella* sp.

สาหร่าย+น้ำเสี้ยว	วัน				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสี้ยวกรอง (ชุดควบคุม)	1.73±0.02 ^{Da}	1.49±0.02 ^{Cc}	1.36±0.02 ^{Bc}	1.29±0.01 ^{Ac}	25.14±0.63
น้ำเสี้ยวไม่กรอง (ชุดควบคุม)	1.73±0.02 ^{Da}	1.53±0.01 ^{Cc}	1.42±0.02 ^{Bd}	1.31±0.03 ^{Ac}	23.90±1.62
<i>Chlorella</i> +กรอง	1.73±0.02 ^{Da}	1.09±0.02 ^{Cb}	0.96±0.01 ^{Bb}	0.87±0.01 ^{Ab}	49.66±1.10
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	1.73±0.02 ^{Da}	0.97±0.01 ^{Ca}	0.87±0.01 ^{Ba}	0.71±0.01 ^{Aa}	59.02±0.49

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

การลดลงของปริมาณแอมโมเนียของชุดทดลองที่ใส่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสี้ยวที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง ที่สิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14) (ตารางที่ 4.18 และ 4.19) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุดเท่ากับ 25.83±1.50, 31.09±0.97, 23.79±1.54, 24.69±1.58, 28.68±1.73, 28.41±1.51, 22.92±0.68 และ 25.85±0.88 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดลงของปริมาณออร์โธฟอสเฟตของชุดทดลองที่ใส่ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองที่สิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14) (ตารางที่ 4.20 และ 4.21) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุดเท่ากับ 35.23 ± 3.22 , 42.46 ± 1.81 , 34.14 ± 2.48 , 39.75 ± 2.16 , 45.44 ± 1.51 , 42.68 ± 1.87 , 38.13 ± 0.80 และ 45.40 ± 1.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	42.10 ± 0.56^{Da}	40.09 ± 0.49^{Cd}	37.55 ± 0.14^{Bc}	35.93 ± 0.24^{Ad}	14.60 ± 1.40
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	42.10 ± 0.56^{Ca}	41.43 ± 0.30^{Cc}	39.37 ± 0.34^{Bf}	37.83 ± 0.34^{Ae}	10.06 ± 1.95
<i>Phormidium</i> +กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	35.54 ± 0.14^{Cb}	32.99 ± 0.37^{Bc}	31.20 ± 0.29^{Ac}	25.83 ± 1.50
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	34.18 ± 0.29^{Ca}	31.20 ± 0.29^{Ba}	28.99 ± 0.06^{Aa}	31.09 ± 0.97
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	36.73 ± 0.32^{Cc}	34.38 ± 0.16^{Bd}	32.06 ± 0.24^{Ac}	23.79 ± 1.54
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	36.03 ± 0.26^{Cbc}	32.90 ± 0.34^{Bc}	31.68 ± 0.31^{Ac}	24.69 ± 1.58
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	35.22 ± 0.40^{Cb}	32.32 ± 0.16^{Bbc}	30.00 ± 0.44^{Ab}	28.68 ± 1.73
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	42.10 ± 0.56^{Da}	35.36 ± 0.26^{Cb}	31.97 ± 0.26^{Bab}	30.13 ± 0.37^{Ab}	28.41 ± 1.51

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.19 ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Chlorella* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	(เวลา) วัน				เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	41.46 ± 0.22^{Da}	39.61 ± 0.12^{Cb}	37.90 ± 0.19^{Bc}	36.02 ± 0.22^{Ac}	13.12 ± 0.49
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	41.46 ± 0.22^{Da}	39.93 ± 0.21^{Cb}	38.93 ± 0.23^{Bc}	37.50 ± 0.21^{Ad}	9.55 ± 0.27
<i>Chlorella</i> +กรอง	41.46 ± 0.22^{Ca}	36.63 ± 0.26^{Ba}	33.13 ± 0.29^{Ab}	31.96 ± 0.41^{Ab}	22.92 ± 0.68
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	41.46 ± 0.22^{Da}	36.41 ± 0.37^{Ca}	30.63 ± 1.53^{Ba}	30.74 ± 0.44^{Aa}	25.85 ± 0.88

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ปริมาณออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่น้ำสำหรับ

Phormidium sp., *Mastigocladopsis* sp. และ *Hapalosiphon* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	7.63±0.13 ^{Ca}	6.70±0.09 ^{Bc}	6.18±0.08 ^{Ad}	5.92±0.10 ^{Ac}	22.29±2.46
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	7.63±0.13 ^{Ba}	7.13±0.14 ^{Bd}	6.37±0.22 ^{Ad}	6.04±0.17 ^{Ac}	20.89±2.18
<i>Phormidium</i> +กรอง	7.63±0.13 ^{Ca}	6.02±0.11 ^{Bb}	5.69±0.10 ^{Bc}	4.94±0.23 ^{Ab}	35.23±3.22
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	7.63±0.13 ^{Da}	5.82±0.05 ^{Cab}	4.82±0.21 ^{Ba}	4.39±0.10 ^{Aa}	42.46±1.81
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	7.63±0.13 ^{Da}	6.48±0.05 ^{Cc}	5.50±0.10 ^{Bbc}	5.03±0.21 ^{Ab}	34.14±2.48
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	7.63±0.13 ^{Da}	6.41±0.15 ^{Cc}	5.48±0.15 ^{Bbc}	4.60±0.17 ^{Ab}	39.75±2.16
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	7.63±0.13 ^{Da}	5.76±0.06 ^{Cab}	5.21±0.25 ^{Babc}	4.37±0.09 ^{Aa}	42.68±1.87
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	7.63±0.13 ^{Da}	5.56±0.07 ^{Ca}	5.05±0.12 ^{Bab}	4.16±0.05 ^{Aa}	45.44±1.51

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.21 ปริมาณออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใส่น้ำสำหรับ *Chlorella* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)				เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง
	0	5	10	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	7.11±0.12 ^{Da}	6.51±0.12 ^{Cb}	5.98±0.12 ^{Bc}	5.56±0.07 ^{Ac}	21.70±0.78
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	7.11±0.12 ^{Ca}	6.79±0.14 ^{Cb}	6.23±0.14 ^{Bc}	5.79±0.14 ^{Ac}	18.51±1.53
<i>Chlorella</i> +กรอง	7.11±0.12 ^{Da}	5.62±0.12 ^{Ca}	5.01±0.04 ^{Bb}	4.40±0.07 ^{Ab}	38.13±0.80
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	7.11±0.12 ^{Da}	5.46±0.11 ^{Ca}	4.58±0.09 ^{Ba}	3.88±0.12 ^{Aa}	45.40±1.81

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การลดลงของค่า BOD ของชุดทดลองที่ใส่น้ำ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง ที่สิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14) (ตารางที่ 4.22 และ 4.23) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุดเท่ากับ 55.91±0.55, 57.30±0.70, 55.23±1.70, 56.62±1.13, 52.52±2.30, 55.27±0.82, 56.09±1.61 และ 57.46±1.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ค่า BOD (Biological oxygen demand) (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp. และ
Hapalosiphon sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)		เปอร์เซ็นต์ที่ ลดลง
	0	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	29.50±0.61 ^{Ba}	26.80±0.23 ^{Ab}	9.07±1.45
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	29.50±0.61 ^{Ba}	27.80±0.38 ^{Ab}	7.00±2.02
<i>Phormidium</i> +กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	13.00±0.20 ^{Aa}	55.91±0.55
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	12.60±0.38 ^{Aa}	57.30±0.70
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	13.20±0.52 ^{Aa}	55.23±1.70
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	12.80±0.46 ^{Aa}	56.62±1.13
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	14.00±0.69 ^{Aa}	52.52±2.30
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	29.50±0.61 ^{Ba}	13.20±0.40 ^{Aa}	55.27±0.82

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.23 ค่า BOD (Biological oxygen demand) (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรมที่ใส่สาหร่าย *Chlorella* sp.

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)		เปอร์เซ็นต์ ที่ลดลง
	0	14	
น้ำเสียกรอง (ชุดควบคุม)	29.13±0.24 ^{Ba}	26.00±0.95 ^{Ab}	10.07±3.32
น้ำเสียไม่กรอง (ชุดควบคุม)	29.13±0.24 ^{Ba}	27.20±0.33 ^{Ab}	6.59±1.35
<i>Chlorella</i> +กรอง	29.13±0.24 ^{Ba}	12.80±0.57 ^{Aa}	56.09±1.61
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	29.13±0.24 ^{Ba}	12.40±0.52 ^{Aa}	57.46±1.45

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.2.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.5

โดยใส่เซลล์สาหร่าย 0.2 กรัม/น้ำหนักเปียก (น้ำเสียไม่ใส่เซลล์สาหร่ายเป็นชุดควบคุม) ลงในน้ำเสียจริงที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีน้ำหนักเปียกเพิ่มขึ้นทั้งที่เจริญเติบโตในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง (ตารางที่ 4.24) ซึ่งสาหร่ายมีน้ำหนักเปียกเพิ่มขึ้นระหว่าง 7.64 ± 0.43 - 19.15 ± 0.41 เปอร์เซ็นต์

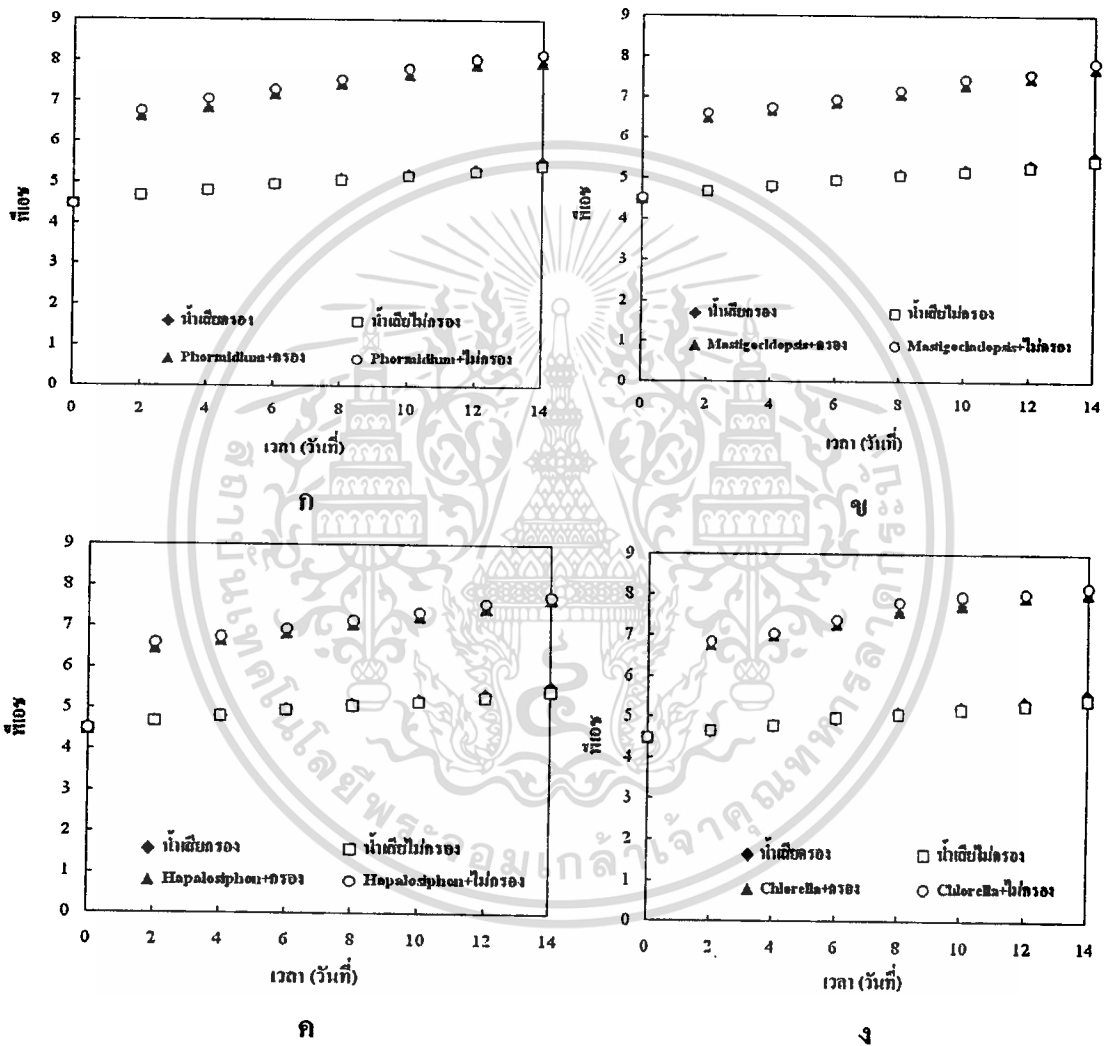
ตารางที่ 4.24 น้ำหนักเปียก (กรัม) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วัน)		เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น
	0	14	
<i>Phormidium</i> +กรอง	0.200±0.000	0.2153±0.0009	7.64±0.43
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	0.200±0.000	0.2279±0.0018	13.93±0.89
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	0.200±0.000	0.2202±0.0016	10.09±0.82
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	0.200±0.000	0.2370±0.0026	18.51±1.30
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	0.200±0.000	0.2241±0.0014	12.05±0.71
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	0.200±0.000	0.2383±0.0008	19.15±0.41
<i>Chlorella</i> +กรอง	0.200±0.000	0.2192±0.0006	9.61±0.32
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	0.200±0.000	0.2368±0.0007	18.40±0.33

การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำเสียที่ใส่เซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. พบว่าในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีการเพิ่มขึ้นของระดับพีเอชสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจริงที่ผ่านการกรอง ในวันที่ 14 ของการทดลอง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.79 ก, 4.79 ข, 4.79 ค และ 4.79 ง) แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองที่ไม่ใส่เซลล์สาหร่าย ($p < 0.05$) โดยน้ำเสียที่ผ่านการกรองที่ใส่เซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในวันที่ 14 ของการทดลอง มีพีเอชเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 7.97 ± 0.01 7.71 ± 0.02 7.76 ± 0.01 และ 8.04 ± 0.01 ตามลำดับ และน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 8.16 ± 0.02 7.85 ± 0.01 7.73 ± 0.01 และ 8.19 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ และพบว่าค่าการเพิ่มของระดับพีเอชในสาหร่ายทุกชนิด ในวันที่ 2 ของการทดลอง พีเอชเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นหลักฐานที่แสดงว่าสาหร่ายนั้นยังมีชีวิตและเจริญเติบโตในน้ำเสียได้ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโต สาหร่ายมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงจึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น (Larkum *et al.* 2003) ส่วนในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองที่ไม่ใส่เซลล์สาหร่าย พบว่าค่าการเพิ่มของระดับพีเอชค่อนข้างน้อยหรือค่อนข้างคงที่



ภาพที่ 4.79 ค่าพีเอชของ (ก) *Phormidium* sp., (ข) *Mastigocladopsis* sp., (ค) *Hapalosiphon* sp. และ (ง) *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 14 วัน

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียอธิบายได้โดย เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์รวมกับน้ำได้กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ดังสมการ (Kirk, 1994)



ซึ่งสาหร่ายสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปใช้ได้โดยตรง หรือสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อย OH^- ออกมา ซึ่งทำให้น้ำเสียน้ำค่าพีเอชสูงขึ้น

การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนสามารถทำให้เกิดเซลล์สาหร่ายที่มีชีวิตขึ้นมาใหม่ได้ และหลังจากเสร็จสิ้นการดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผิวเซลล์ ยังมีการดูดซับเข้าภายในเซลล์อย่างต่อเนื่อง และบางครั้งยังมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของผนังเซลล์ให้ดูดซับโลหะหนักได้มากยิ่งขึ้นด้วย (Wilde and Benemann, 1993; Sandau *et al.* 1996)

การใช้สาหร่ายที่มีชีวิตยังสามารถลดขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงก่อนเก็บเกี่ยวมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เพราะสามารถเลี้ยงสาหร่ายที่มีชีวิตให้เจริญเติบโตในระบบบำบัดได้ โดยไม่ต้องมีระบบเพาะเลี้ยงแยกออกไป ไม่ต้องเก็บเกี่ยวสาหร่ายจากบ่อเพาะเลี้ยงเพื่อนำมาใช้ในระบบบำบัด ไม่จำเป็นต้องนำสาหร่ายไปอบแห้งก่อนนำมาใช้ ไม่จำเป็นต้องผ่านขบวนการในการบรรจุเก็บรักษาสาหร่ายก่อนนำมาใช้ นอกจากนี้สาหร่ายที่มีชีวิตยังมีข้อดีเหนือวิธีบำบัดเก่าๆ ที่เป็นแบบเคมีกายภาพ เพราะสาหร่ายที่มีชีวิตสามารถพัฒนาให้กำจัดโลหะหนักและของเสียอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำเสียได้ภายในขั้นตอนเดียว เนื่องจากเซลล์สาหร่ายที่กำลังเติบโตมีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ลดสารประกอบอินทรีย์ได้ และสามารถนำสารอนินทรีย์ไอออน เช่น แอมโมเนีย ไนเตรท ไนไตรท์ ฟอสเฟต เข้าเซลล์ได้เป็นอย่างดี (ตารางที่ 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23) และยังคงค่า BOD (Biological oxygen demand) เนื่องจากผลผลิตจากการสังเคราะห์แสงคือออกซิเจนซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ (ตารางที่ 4.22 และ 4.23) นอกจากนี้โลหะหรือแร่ธาตุสารอาหารต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ หรือกระจายเป็นตะกอนเล็ก ๆ อยู่ในน้ำยังสามารถถูกกำจัดโดยการถูกยึดไว้ด้วยเซลล์สาหร่ายได้ (Volesky, 1990; Malik, 2004)

4.2.3 การดูดซับตะกั่วของสาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp.,

Hapalosiphon sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

โดยใส่เซลล์สาหร่าย *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. (น้ำเสียไม่ใส่เซลล์สาหร่ายเป็นชุดควบคุม) ในน้ำเสีย พบว่าการดูดซับตะกั่วของ *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับตะกั่ว สูงที่สุดในวันที่ 14 ของการทดลอง และไม่แตกต่างกับในวันที่ 8-12 ของการทดลอง (ตารางที่ 4.25) แต่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติกับในวันที่ 2-6 ของการทดลอง ($p < 0.05$) การดูดซับตะกั่วของ *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง, *Mastigocladopsis* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงสุดในวันที่ 14 ของการทดลอง และไม่แตกต่างกับในวันที่ 10-12 ของการทดลอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับในวันที่ 2-8 ของการทดลอง ($p < 0.05$) การดูดซับตะกั่วของ *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงสุดในวันที่ 14 ของการทดลอง และไม่แตกต่างกับในวันที่ 12 ของการทดลอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับในวันที่ 2-10 ของการทดลอง ($p < 0.05$) และการดูดซับตะกั่วของ *Hapalosiphon* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงสุดในวันที่ 14 ของการทดลอง และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับในวันที่ 2-12 ของการทดลอง ($p < 0.05$)

สำหรับการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายที่วันทำการทดลองเท่ากัน ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองทุกชุดการทดลอง ในวันที่ 2-4 ของการทดลอง พบว่า *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ในวันที่ 8 ของการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ในวันที่ 10 ของการทดลอง พบว่า *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) ในวันที่ 10-14 ของการทดลอง พบว่า *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงกว่าและไม่แตกต่างกับ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรองและ *Phormidium* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p < 0.05$) โดย *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง ในวันที่ 14 ของการทดลอง มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 27.82 ± 0.31 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 27.29 ± 0.35 , 22.85 ± 0.22 และ 21.16 ± 0.40 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียที่ผ่านการกรอง ในวันที่ 14 ของการทดลอง มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 24.97 ± 0.62 , 20.05 ± 0.26 , 18.30 ± 0.13 และ 26.74 ± 0.40 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ค่าการดูดซับ (q) (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. ในน้ำเสียจาก

โรงงานอุตสาหกรรม (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สาหร่าย+น้ำเสีย	เวลา (วันที่)						
	2	4	6	8	10	12	14
<i>Phormidium</i> +กรอง	16.07±0.39 ^{Ac}	21.47±0.46 ^{Bd}	22.85±0.56 ^{BCd}	23.65±0.78 ^{CDd}	24.43±0.61 ^{CDd}	24.75±0.62 ^{Dd}	24.97±0.62 ^{De}
<i>Phormidium</i> +ไม่กรอง	19.13±0.44 ^{Ad}	23.05±0.34 ^{Be}	24.37±0.39 ^{Cf}	25.17±0.28 ^{Ce}	26.63±0.47 ^{Df}	27.07±0.40 ^{De}	27.29±0.35 ^{Df}
<i>Mastigocladopsis</i> +กรอง	11.28±0.19 ^{Aab}	16.27±0.20 ^{Bb}	17.92±0.19 ^{Cb}	18.44±0.31 ^{Cb}	19.40±0.29 ^{Db}	19.95±0.33 ^{Db}	20.05±0.26 ^{Db}
<i>Mastigocladopsis</i> +ไม่กรอง	12.17±0.27 ^{Ab}	17.33±0.29 ^{Bc}	19.66±0.26 ^{Cc}	20.09±0.20 ^{Cc}	21.01±0.20 ^{Dc}	22.36±0.27 ^{Ec}	22.85±0.22 ^{Ed}
<i>Hapalosiphon</i> +กรอง	10.94±0.13 ^{Aa}	13.95±0.04 ^{Ba}	15.72±0.21 ^{Ca}	16.81±0.09 ^{Ca}	17.58±0.11 ^{Ea}	17.90±0.12 ^{Ea}	18.30±0.13 ^{Fa}
<i>Hapalosiphon</i> +ไม่กรอง	11.81±0.23 ^{Aab}	15.64±0.30 ^{Bb}	17.86±0.31 ^{Cb}	18.46±0.33 ^{CDb}	19.32±0.33 ^{Db}	20.86±0.25 ^{Eb}	21.16±0.40 ^{Ec}
<i>Chlorella</i> +กรอง	16.65±0.29 ^{Ac}	21.08±0.31 ^{Bd}	23.27±0.45 ^{Cde}	24.73±0.51 ^{Dde}	25.82±0.40 ^{DEef}	26.32±0.48 ^{Ec}	26.74±0.40 ^{Ef}
<i>Chlorella</i> +ไม่กรอง	19.52±0.32 ^{Ad}	23.37±0.28 ^{Be}	24.04±0.19 ^{Bef}	24.14±0.35 ^{Bde}	25.48±0.36 ^{cCde}	27.14±0.33 ^{De}	27.82±0.31 ^{Df}

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ในแนวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

จากการทดลองนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองได้สูงกว่าน้ำเสียที่ผ่านการกรองเล็กน้อย ตั้งแต่วันที่ 2 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองมีทั้งสิ่งมีชีวิตอื่น เช่น แบคทีเรีย (Kong *et al.* 1998 ; Hossain and Anantharaman. 2006) หรือ ตะกอน (Dahrazma and Mulligan. 2007) ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถช่วยในการดูดซับตะกั่ว และการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายในน้ำเสียที่ผ่านการกรองพบว่ามีค่าต่ำกว่านั้น เพราะน้ำเสียที่ผ่านการกรองนั้นทำให้กรองกำจัดสิ่งมีชีวิตอื่นออก แต่ในการทดลองครั้งนี้ใช้กระดาษกรองขนาด 15 ไมครอน ทำให้สิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน เช่น แบคทีเรีย ยังคงผ่านกระดาษกรองเข้าสู่ น้ำเสีย นอกจากนี้ยังสามารถกรองตะกอน และความขุ่น ทำให้ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดีแม้ต่ำกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองเล็กน้อย น้ำเสียที่ผ่านการกรองนั้นยังกรองกำจัดสารอาหารบางส่วนที่ติดกับตะกอนออกไปด้วย แต่ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองนั้นยังคงมีการไหลเวียนของสารอาหารที่ติดอยู่กับตะกอนที่สาหร่ายใช้ในการเจริญเติบโต เช่น ไนโตรเจน ไนโตรเจน แอมโมเนีย และฟอสเฟต ในขณะที่น้ำเสียที่ผ่านการกรองมีสารอาหารเหล่านี้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเซลล์สาหร่ายทุกชนิดที่เจริญเติบโตในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรองมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำเสียที่ผ่านการกรองเล็กน้อย (ตารางที่ 4.24) เมื่อพิจารณาการดูดซับตะกั่ว ร่วมกับการเจริญเติบโตพบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตโดยนำสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียมาใช้ในการเจริญเติบโตทำให้เกิดเซลล์ใหม่ที่ทำให้มีความสามารถดูดซับตะกั่วมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายสามารถนำสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ทำให้เห็นว่าสาหร่ายเจริญเติบโตอยู่ในน้ำเสียร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่นในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะผลผลิตอย่างหนึ่งจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายคือออกซิเจน ซึ่งสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะแบคทีเรียสามารถนำไปย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ซึ่งเป็นสารอาหารของสาหร่ายและแบคทีเรียเหล่านั้นก็นำออกซิเจนไปใช้ ช่วยลดค่า BOD ในน้ำเสีย (ตารางที่ 4.22 และ 4.23) และยังช่วยดูดซับตะกั่วในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งสาหร่ายหลายชนิดเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียโดยใช้สารอาหารเหล่านี้ในการเจริญเติบโต มีรายงาน ว่า *Scenedesmus* sp. ที่แยกได้จากน้ำเสียแหล่งน้ำทิ้งจากเทศบาล สามารถนำมาบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียจากมูลสัตว์ที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปริมาณเซลล์ที่เหมาะสม 2×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียม-ไนโตรเจน 99.1 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 105 นาที และสามารถบำบัดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 135 นาที และพบว่าสามารถบำบัดฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 15 นาทีเท่านั้น (Zhang *et al.* 2008) และในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* นำมาดูดซับแอมโมเนียม-ไนโตรเจนและ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เป็นเวลา 10 วัน ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียม-ไนโตรเจนเริ่มต้นในน้ำเสีย 92.8 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ 50 เปอร์เซ็นต์โดยเหลือปริมาณแอมโมเนียม-ไนโตรเจน 41.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 7.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัด 78 เปอร์เซ็นต์ โดยเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร (Aslan and Kapdan. 2006) นอกจากนี้ในระหว่างที่สาหร่ายเจริญเติบโตในน้ำเสีย สาหร่ายยังมีการปล่อยสารพอลิแซ็กคาไรด์ออกนอกเซลล์ ซึ่งมีพอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนละลายในน้ำที่ล้อมรอบเซลล์ พอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถช่วยจับโลหะหนักทำให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรือทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้ (Volesky. 1990) ขณะที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตในระบบบำบัดน้ำเสียนั้น สาหร่ายจะมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสง จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้โลหะหนักหลายชนิดตกตะกอน ซึ่งช่วยลดปริมาณโลหะหนักที่เป็นพิษที่ละลายในน้ำได้ด้วยเช่นกัน (Larkum et al. 2003; Kirk.1994)

ในการทดลองครั้งนี้พบว่าสาหร่ายทุกชนิดสามารถใช้สารอินทรีย์เหล่านี้ในการเจริญเติบโตได้และยังมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้อีกด้วย แต่พบว่าการนำสาหร่ายที่มีชีวิตมาใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม มีรายงานไว้ไม่มากนัก เช่น การทดลองนำสาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Nostoc linckia* และ *Nostoc rivularis* มาบำบัดน้ำเสียซึ่งนำมาจากบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรม โดยนำน้ำเสียมาเจือจางลง พบว่าน้ำเสียที่เจือจางลงที่ระดับ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ นั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยมีจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ การสังเคราะห์แสง การหายใจ และปริมาณ โปรตีนเพิ่มขึ้น แต่วัฏจักรหรือระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตสั้นลง โดยสาหร่าย *N. linckia* จะสะสมสังกะสีและแคดเมียมไว้ในเซลล์ได้สูงกว่าในน้ำภายนอกถึง 30 เท่า และ 10 เท่า ตามลำดับ (El-Enany and Issa. 2000)

การใช้สาหร่าย *Nostoc muscorum* และ *Anabaena subcylindrica* นำมาดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำทิ้งจากบริษัท El-Soda ที่นำมาผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว เป็นเวลา 10 วัน พบว่า *N. muscorum* สามารถดูดซับคอปเปอร์ โคบอลต์ ตะกั่วและแมงกานีสได้ 64.40, 22.20, 84.60 และ 64.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในสาหร่าย *A. subcylindrica* สามารถดูดซับได้ 33.30, 33.30, 86.20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าผลการเจริญเติบโตของ *N. muscorum* และ *A. subcylindrica* ในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำทิ้ง จากบริษัท El-Soda พบว่าสูงกว่าการเจริญเติบโตในอาหารสังเคราะห์ การเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ความสามารถของเซลล์ในการกำจัดโลหะหนัก ความเข้มข้นและชนิดของโลหะหนักและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส ไนโตรเจน ที่ทำให้มีการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งสอดคล้องกับ Sallal (1986) พบว่าชนิดของไซยาโนแบคทีเรียที่เป็นเส้นสาย เช่น *A. cylindrica*, *N. muscorum* และ *A. varibilis* และพวกที่ไม่ใช่เส้นสาย เช่น *Anacystis nidulans* สามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อได้ดีกว่าน้ำเสียที่มีการผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว และมีรายงานว่าสาหร่ายหลายชนิดเจริญเติบโตในน้ำเสียจากบริษัท Salt และ Soda ในเมือง Kafr El-Zayat ได้มากกว่าในอาหารสังเคราะห์ (El-Sheekh et al. 2005) ในการเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella pyrenoidosa* พบว่ามีปริมาณ โปรตีนสูงเมื่อเจริญเติบโตในน้ำเสียที่มีสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกูล และมีความสามารถดูดซับโลหะหนักที่มีในน้ำปริมาณต่ำๆ เช่น คอปเปอร์ แมงกานีส เหล็ก สังกะสี (Wong and Tam, 1984) นอกจากนี้ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายหลายชนิด เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่ดีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียจากการรั่วไหลของโรงงานเกี่ยวกับสารเคมีทั้งหลายและยังทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้อีกด้วย (Corder and Reeves, 1994)

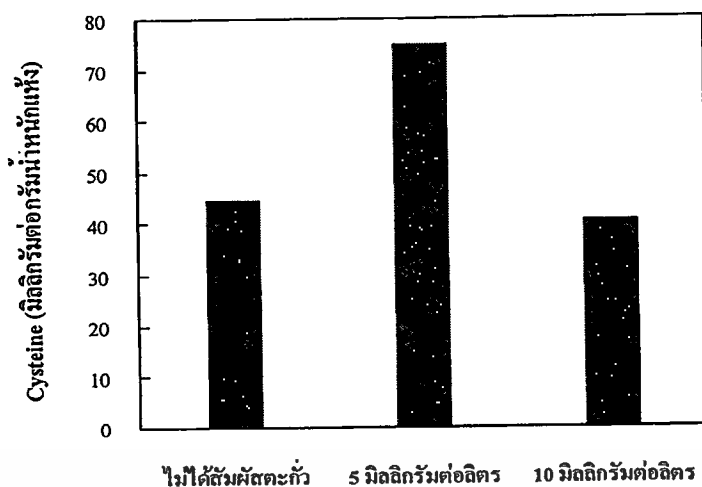
การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง โดยสาหร่าย *Spirogyra condensate* และ *Rhizoclonium hieroglyphicum* พบว่า *S. condensate* ดูดซับโครเมียมสูงสุด 14 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย และ *R. hieroglyphicum* ดูดซับโครเมียมสูงสุด 11.81 มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย (Onyancha et al. 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่าย *Scenedesmus*, *Selenastrum* และ *Chlorell* spp. มีความสามารถในการสะสมโลหะ เช่น คอปเปอร์และตะกั่ว 67 และ 98 เปอร์เซ็นต์จากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะแต่ละตัวในระดับที่สาหร่ายทนได้ (Brady et al. 1994)

ในการศึกษาความสามารถในการนำสาหร่ายดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียจริงในครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นไปได้ในการนำสาหร่ายเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

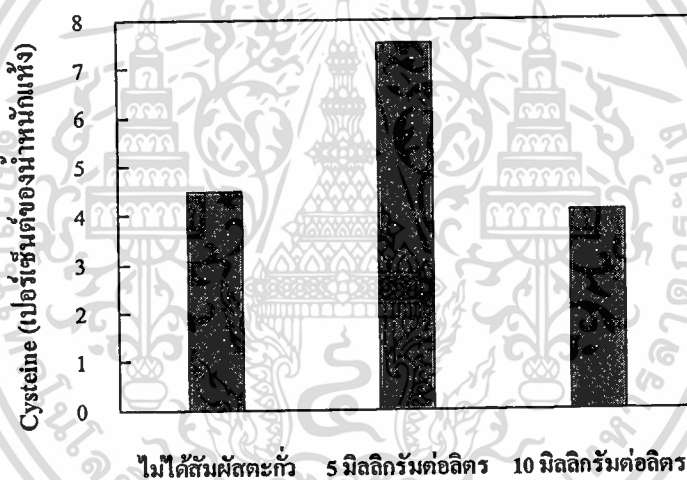
4.3 กลไกการลดพิษของตะกั่วโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอะมิโน cysteine ใน

Chlorella sp.

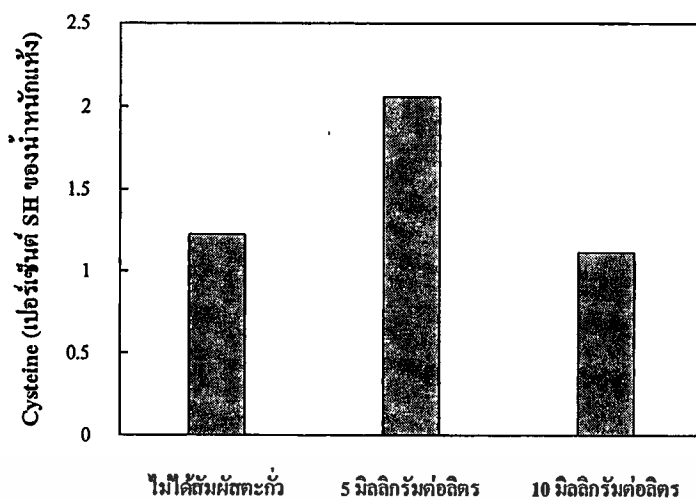
การคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงสุด 1 ชนิด ได้แก่ *Chlorella* sp. เพื่อหาปริมาณกรดอะมิโน cysteine โดยนำเซลล์สาหร่ายเซลล์สด (น้ำหนักแห้งปริมาณ 35 กรัมต่อลิตร) ที่ไม่ได้สัมผัสตะกั่ว (ชุดควบคุม) และเซลล์สาหร่ายที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอช 4.5 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มาศึกษาปริมาณ cysteine พบว่าเซลล์สาหร่ายที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดอะมิโน cysteine สูงที่สุดเท่ากับ 75.2 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (7.52 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง, 2.05 เปอร์เซ็นต์ SH ของน้ำหนักแห้ง และ 0.62 โมล SH ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) (ภาพที่ 4.80, 4.81, 4.82 และ 4.83) โดย *Chlorella* sp. ที่ไม่ได้สัมผัสตะกั่ว (ชุดควบคุม) มีปริมาณกรดอะมิโน cysteine เท่ากับ 44.9 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (4.49 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง, 1.23 เปอร์เซ็นต์ SH ของน้ำหนักแห้ง, 0.37 โมล SH ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และเซลล์สาหร่ายที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดอะมิโน cysteine เท่ากับ 40.8 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (4.08 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง, 1.11 เปอร์เซ็นต์ SH ของน้ำหนักแห้ง, 0.34 โมล SH ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ



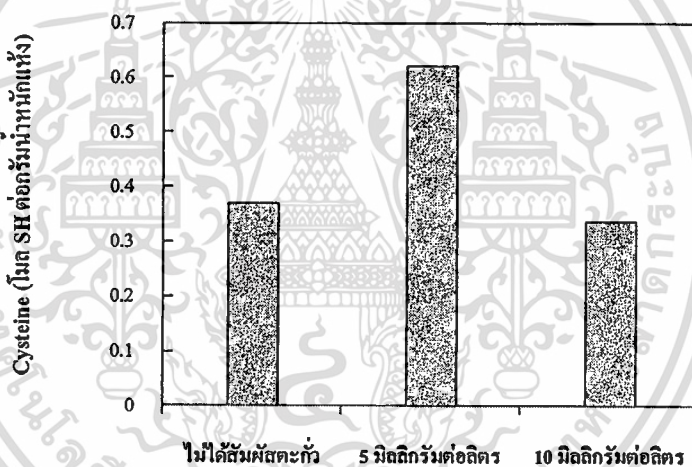
ภาพที่ 4.80 ปริมาณ cysteine (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.81 ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง) cysteine ของ *Chlorella* sp. ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.82 ปริมาณ cysteine (เปอร์เซ็นต์ SH ของน้ำหนักรีดแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.83 ปริมาณ cysteine (โมล SH ต่อกรัม น้ำหนักรีดแห้ง) ของ *Chlorella* sp. ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

กลไกระดับเซลล์ในการตอบสนองต่อตะกั่วในสาหร่ายอย่างหนึ่งก็คือการสังเคราะห์ phytochelatin ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทำหน้าที่ในการจับกับโลหะหนักเพื่อลดพิษจากโลหะหนักที่เข้าสู่เซลล์ (Gekeler *et al.* 1988) โดยพบว่า Cd^{2+} , Ag^+ , Bi^{3+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} และ Au^{2+} สามารถกระตุ้นให้มีการสร้าง phytochelatin ได้ (Robinson. 1989) โดยมี cysteine เป็นส่วนหนึ่งของแกนของ phytochelatin ทำหน้าที่ในการจับกับโลหะหนักและ cysteine เองก็เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของ phytochelatin synthase (PCS) เพื่อสังเคราะห์ phytochelatin ดังนั้นการสังเคราะห์ cysteine จึงมีความสำคัญกับการผลิต phytochelatin ด้วย และ cysteine อาจเป็นปัจจัยที่จำกัดต่อการลดพิษของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

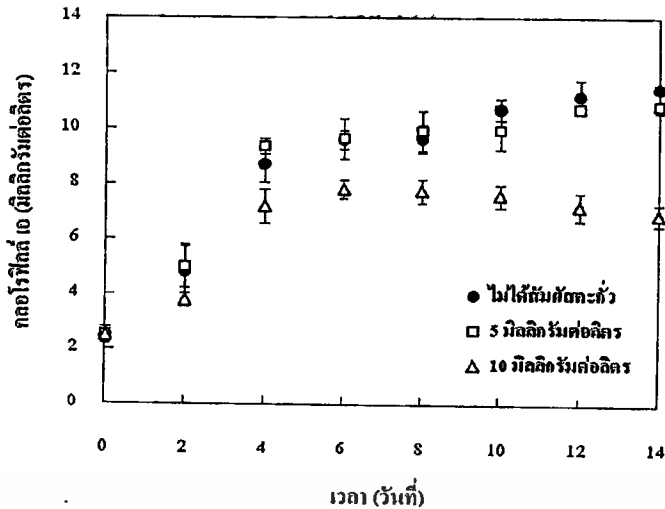
โลหะหนัก โดย cysteine มีกลุ่ม thiol (-SH) เป็นองค์ประกอบ โดยซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) จะพบในการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง phytochelatin กับโลหะหนัก โดยซัลไฟด์ไอออนจะช่วยทำให้ phytochelatin จับตัวกับโลหะหนักได้เสถียรมากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้เพิ่มความสามารถในการลดพิษได้มากยิ่งขึ้นด้วย (Oven *et al.* 2002a) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า *Chlorella sp.* ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดอะมิโน cysteine สูงที่สุด และเซลล์ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่วที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณ cysteine ลดลง ซึ่งใกล้เคียงกับเซลล์ที่ไม่ได้รับการสัมผัสตะกั่ว แสดงว่าในการทดลองนี้สาหร่ายชนิดนี้มีความสามารถในการทนพิษของตะกั่วได้ที่มีความเข้มข้นระดับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นเมื่อเซลล์ได้รับความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นจึงไม่สามารถทนได้ทำให้ปริมาณ cysteine ลดลง กลไกการลดพิษภายในเซลล์ (internal detoxification) ของสาหร่ายพบว่าสาหร่ายสามารถลดพิษโลหะหนักที่อยู่ภายในเซลล์ได้โดยโปรตีนที่ทำหน้าที่ในการจับกับโลหะหนักแล้วพาโลหะหนักเข้าไปสะสมไว้ในออร์แกเนลล์ (organell) อื่นๆ อีกหลายส่วนของเซลล์สาหร่าย เช่น ไมโทคอนเดรีย แวกคิวโอล คลอโรพลาสต์ ผนังเซลล์ นิวเคลียส และ polyphosphate bodies เป็นต้น โดยพบว่าการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากผนังเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และเข้าไปในแวคิวโอลหรือไซโทพลาสซึม ซึ่งบางครั้งโลหะหนักอาจแสดงพิษต่อเซลล์โดยไม่มีการพาไปสะสมยังออร์แกเนลล์อื่นๆ (Jensen *et al.* 1982) ดังนั้นพิษจากตะกั่วที่มากเกินไปจึงทำลายออร์แกเนลล์ต่างๆ ที่มีบทบาทในการสังเคราะห์ cysteine หรือออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่ในการสะสมตะกั่วจึงทำให้กลไกของเซลล์สังเคราะห์ cysteine ไม่ได้

มีรายงานว่าในพืชบางชนิดมีการเพิ่มปริมาณของเอนไซม์ *O*-acetylserine (thiol) lyase เป็นปริมาณมาก ซึ่งเอนไซม์นี้ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ cysteine โดยพบว่าพืชที่มีเอนไซม์ชนิดนี้มากสามารถเจริญเติบโตในที่ที่มีแคดเมียมเข้มข้นสูงได้มากกว่าปกติ และจะสะสมแคดเมียมไว้ในใบได้มากกว่าปกติด้วย (Domínguez-Solís *et al.* 2001) การศึกษาความไวต่อแคดเมียมของสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus acutus* 2 สายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ทั่วไปกับสายพันธุ์ด้านทานต่อโครเมียม และนำมาหาปริมาณ cysteine ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่แตกต่างกัน จาก 1.1 ถึง 27 ไมโครโมล พบว่าแคดเมียมส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระดับกรดอะมิโน cysteine ที่แตกต่างกันระหว่างสายพันธุ์ที่ด้านทานโครเมียมและสายพันธุ์ทั่วไป โดยปริมาณ cysteine ในเซลล์ของสายพันธุ์ที่ด้านทานโครเมียมจะมีปริมาณ cysteine มากกว่า 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ทั่วไป และในสายพันธุ์ที่ด้านทานโครเมียมปริมาณ cysteine เพิ่มจากความเข้มข้นของแคดเมียมต่ำสุด (1.125 ไมโครโมล) จนถึงสูงสุด (27 ไมโครโมล) มีค่าเท่ากับ 3.984 ± 0.536 ไมโครโมล SH ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับในสายพันธุ์ทั่วไปปริมาณ cysteine สูงสุด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมถึง 9 ไมโครโมล เท่านั้นและเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีปริมาณ cysteine ลดลง และเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมสูงถึง 27 ไมโครโมล พบว่าสายพันธุ์ด้านทานโครเมียมมีปริมาณ cysteine สูงกว่าสายพันธุ์ทั่วไปถึง 5 เท่า แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานร่วมกันกับ *Scenedesmus acutus* สายพันธุ์ด้านทานโครเมียมเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ทั่วไป (Torricelli *et al.* 2004) การศึกษาผลของคอปเปอร์ต่อปริมาณ cysteine ในพืชน้ำ *Hydrilla verticillata* ที่ความเข้มข้นของคอปเปอร์จาก 8, 16, 32 และ 80 พิโคโมล เป็นเวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณ cysteine ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากที่ระดับความเข้มข้นของทองแดงต่ำกว่าและเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอปเปอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า *H. verticillata* มีความสามารถทนพิษของคอปเปอร์ได้สูงถึงที่ระดับความเข้มข้นของคอปเปอร์ 80 พิโคโมล (Gupta *et al.* 2004) นอกจากนี้ การศึกษาผลของโคบอลต์ต่อปริมาณ cysteine โดยการเลี้ยงแบบ suspension culture ของเซลล์พืช *Crotalaria cobalticola* เป็นสายพันธุ์ที่สะสมโคบอลต์ได้มาก (hyperaccumulator) แล้วนำเซลล์มาสัมผัสในสารละลาย CoCl_2 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมล ทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน พบว่าผลของโคบอลต์ต่อปริมาณกรดอะมิโน cysteine เพิ่มขึ้นถึง 31 เท่าจาก 1.1 ไมโครโมลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ชุดควบคุม) ถึง 35 ไมโครโมลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และการเพิ่มของระดับ cysteine อยู่ในช่วง 4 วันแรกหลังจากนั้นค่อนข้างคงที่ (Oven *et al.* 2002b) การตอบสนองต่อโลหะหนักโดยปริมาณ cysteine แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่แล้วในสาหร่ายหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ โลหะหนักสามารถชักนำให้มีปริมาณ cysteine ที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับขอบเขตความสามารถในการทนพิษ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักและชนิดของสาหร่ายด้วย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณ cysteine สามารถใช้เป็นดัชนีประเมินมลภาวะจากโลหะหนักในแหล่งน้ำได้

ในการศึกษาครั้งนี้เมื่อนำเซลล์สาหร่ายส่วนหนึ่ง 0.2 กรัมน้ำหนักเปียก มาเลี้ยงต่อในอาหารระดับปกติใหม่ โดยวัดความสามารถในการเจริญเติบโตโดยวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (ภาพที่ 4.84) พบว่า *Chlorella* sp. ที่ไม่ได้รับการสัมผัสตะกั่วมีความสามารถในการเจริญเติบโตโดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ 11.48 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่แตกต่างกับเซลล์ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเซลล์ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ($p < 0.05$) ในวันที่ 14 ของการทดลอง โดย *Chlorella* sp. ที่ได้รับการสัมผัสตะกั่ว 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ 10.86 ± 0.21 และ 7.83 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 และ 6 ของการทดลองตามลำดับ อย่างไรก็ตาม พบว่าเซลล์ที่ไม่ได้รับการสัมผัสตะกั่วและได้รับการสัมผัสตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่ใกล้เคียงกัน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าในการทดลองครั้งนี้ *Chlorella* sp. สามารถทนพิษตะกั่วได้ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและเซลล์ยังคงสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ



ภาพที่ 4.84 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของ *Chlorella* sp. ที่สัมผัสตะกั่วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่เลี้ยงในสารอาหารระดับปกติ

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าการเจริญเติบโตของเซลล์ที่เคยสัมผัสตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเข้าสู่ช่วงคงที่ที่เร็วกว่าและเข้าสู่ช่วงการตายในระยะเวลาดังกล่าวในขณะที่เซลล์ที่ไม่ได้สัมผัสตะกั่วและเซลล์ที่เคยสัมผัสตะกั่วที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังคงมีการเจริญเติบโตต่อไปและเข้าสู่ช่วงคงที่ช้ากว่า แม้ว่าจะเลี้ยงในสารอาหารระดับปกติก็ตามเพราะในช่วงที่เซลล์สัมผัสกับตะกั่ว นั้น ความเป็นพิษของตะกั่วได้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการของเซลล์หลายอย่าง เช่น การแบ่งเซลล์ เมตาบอลิซึมต่างๆ หรือออร์แกเนลล์ภายในเซลล์ โดยพบว่าสาหร่ายมีการใช้ ATP ในการขับโลหะหนักออกมาภายนอกเซลล์ หรือใช้เอนไซม์ในการเปลี่ยนรูปของโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ และยังมีกลไกการทำงานของโมเลกุลภายในเซลล์ที่ทำให้สามารถแยกโลหะหนักที่ไม่จำเป็นต่อเซลล์ออกจากโลหะที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตได้ เพื่อควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในไซโตพลาสซึมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (Cobbett and Goldsbrough, 2002) ดังนั้นเมื่อได้รับโลหะหนักที่สูงเกินไปเซลล์ต้องใช้พลังงานในการลดพิษสูงขึ้นด้วยและเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้นจึงทำให้ภายในเซลล์เป็นพิษและส่งผลกระทบต่อเซลล์เองทำให้เซลล์อยู่ในสภาพที่ไม่เป็นปกติ และถึงแม้จะนำมาเลี้ยงต่อในสารอาหารใหม่อาจทำให้ได้เซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้นแต่การเจริญเติบโตอาจช้ากว่าปกติ ดังนั้นส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตได้

พิษของโลหะหนักต่อสาหร่าย เช่น ทำลายความสามารถของผนังเซลล์ในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน ทำให้เซลล์สูญเสียแร่ธาตุในเซลล์ เช่น โพแทสเซียม หรือสารอินทรีย์ภายในเซลล์ และทำให้เซลล์เปลี่ยนแปลงปริมาณไป ลดการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการขนส่งอิเล็กตรอนในขบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง ขยับยั้งการสร้างและปล่อยออกซิเจนในขบวนการสังเคราะห์แสง ขยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากโลหะหนักเข้าไปแทนที่แร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ ขยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน ทำให้มีการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรูปร่างเซลล์ที่ผิดปกติ ลดปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (Stokes. 1983; Sandau *et al.* 1996) ความสามารถของสาหร่ายแต่ละชนิดในการทนต่อโลหะหนักนั้นไม่เท่ากัน ขึ้นกับลักษณะการทำงานของเซลล์สาหร่ายแต่ละชนิด และขึ้นกับชนิดของโลหะหนักด้วยเช่นกัน เช่น รายงานว่า การเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* จะลดลง เมื่อได้รับนิกเกิล แต่สาหร่ายยังคงสามารถแบ่งเซลล์ได้ (Wong *et al.* 2000) สาหร่ายสีเขียวสกุล *Chlorella* ที่ได้รับสังกะสีที่ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้รูปร่างผิดปกติ และผนังเซลล์เปลี่ยนแปลงไป (Travieso *et al.* 1999) ปรอท แคมเมียม และตะกั่ว มีผลต่อการเจริญเติบโต การหายใจ การสังเคราะห์และปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ และบี ในยูกลีนีออยด์สกุล *Euglena* (Devar *et al.* 1998) นอกจากนี้ในสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus abundans* ที่ได้รับ แคมเมียมและคอปเปอร์ที่ระดับ 15-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Terry and Stone. 2002)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. เพื่อให้สาหร่ายสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุดคือ การเลี้ยงสาหร่ายภายใต้แสง 12 ชั่วโมงต่อวัน หรือ ความเข้มข้นของสารอาหาร 50-100 เปอร์เซ็นต์ หรือ สารอาหารที่มีการลดไนเตรทหรือลดฟอสเฟต 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการเลี้ยง 3-4 สัปดาห์ หรือเลี้ยงในอาหารที่พีเอชต่ำที่มีตะกั่วไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อายุการเลี้ยงไม่เกิน 18 วัน จะทำให้สาหร่ายขนาดเล็กสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด โดย *Chlorella* sp. สามารถเจริญเติบโต มีปริมาณโปรตีน และปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด

5.2 สาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Hapalosiphon* sp. และ *Chlorella* sp. มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบที่มีชีวิต โดยสาหร่ายทุกชนิดมีการเจริญเติบโตในน้ำเสีย และเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียมากขึ้นทำให้ค่าการดูดซับตะกั่วสูงขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดย *Chlorella* sp. มีการเจริญเติบโตและดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้ดีที่สุด

5.3 กลไกการลดพิษของตะกั่วในสาหร่ายโดยการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็ก *Chlorella* sp. ที่สัมผัสตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่ *Chlorella* sp. สามารถปรับตัวลดพิษของตะกั่วได้ และยังสามารถนำเซลล์สาหร่ายไปเลี้ยงต่อได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโต

ในการศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบสภาวะแวดล้อมคือ แสง, ปริมาณสารอาหาร, ปริมาณตะกั่ว และพีเอชต่ำ ที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อให้สาหร่ายมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด และความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นแนวทางนำสาหร่ายไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบที่มีชีวิตและทราบกลไกในการลดพิษของโลหะหนักในสาหร่าย โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอะมิโน cysteine และสามารถปรับปริมาณกรดอะมิโน cysteine ในสาหร่ายขนาดเล็กเป็นดัชนีประเมินมลภาวะจากโลหะหนักในแหล่งน้ำได้

บรรณานุกรม

- ณรงค์ศักดิ์ อังคะสุวพลา. 2540. กลุ่มผู้เลี้ยงต่อเกิดพิษตะกั่ว. สารานุกรมไทยฉบับเยาวชนเล่มที่ 22. กรุงเทพมหานคร : รุ่งศิลป์การพิมพ์
- ธิดารัตน์ น้อยรักษา จารุพันธ์ ประทุมยศ ชลทิพย์ ถนอมพันธุ์ และภากร วิรุฬห์ประภา. 2547. “ผลของความเค็ม ความเป็นกรด-เบส และระยะเวลาการให้แสงสว่างต่อการเติบโต และคุณค่าทางอาหารของไดอะตอมน้ำเค็ม *Nitzschia cf. ovalis* BIMS-PP0004.” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (section T) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3: 227-236.
- นัยนา ณีชนะนันท์. 2553. เด็กไทยไร้สารตะกั่ว ฉลาดเลือกบริโภค. สถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี. [online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.rssthai.com/reader.php?r=15489&t=lifestyle>
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาปะมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- สุทัศน์ ยกส้าน. 2551. มนุษย์กับการบริโภคตะกั่ว. [online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=186312>
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบุญ. 2549. การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่าย. ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมถวิล จริตควร และอมรรัตน์ ชมรุ่ง. 2550. “ผลของระยะเวลาการให้แสงต่อปริมาณ โปรตีน ไบโอมิน และกรดไขมันในสาหร่าย *Nannochloropsis oculata*.” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 6 : 331-338.
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบุญ. 2547. “การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris*” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3:287-296.
- Abdel-Rahman, M.H.M., Ali, R.M. and Said, H.A. 2005. “Alleviation of NaCl-induced effects on *Chlorella vulgaris* and *Chlorococcum humicola* by riboflavin application” *Int. J. Agricult. Biol.* 1 : 58–62.
- Acharya, C., Joseph, D. and Apte, S.K. 2009. Uranium sequestration by a marine cyanobacterium, *Synechococcus elongatus* strain BDU/75042 . *Biores. Technol.*100 : 2176-2181.
- Adda, M., Merchuk, J. C. and Arad, S. 1986. “Effect of nitrate on growth and production of

- cell-wall polysaccharide by the unicellular red alga *Porphyridium*.” **Biomass**. 10 : 131-140.
- 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.” **Proc. Natl. Acad. Sci.** 91 : 8433–8436.
- Allard, B. and Tazi, A. 1993. “Influence of growth status on composition of extracellular polysaccharides from two *Chlamydomonas* species.” **Phytochemistry**. 32:41-47.
- Andersen, T., Schartau, A.K.L. and Paasche, E. 1991. “Quantifying external and internal nitrogen and phosphorus pools, as well as nitrogen and phosphorus supplied through remineralization, in coastal marine plankton by means of a dilution technique.” **Mar. Ecol. Prog. Ser.** 69 : 67–80.
- AOAC, 2005. **Official Methods of Analysis of AOAC International** (Vol. 1; 16 th ed.) Arlington, Virginia, USA. AOAC Int.
- Arad, S., Lerental, Y. and Dubinsky, O. 1992. “Effect of nitrate and sulfate starvation on polysaccharide formation in *Rhodella reticulata*.” **Biores. Technol.** 42 : 141-148.
- Asadulghani, Y.S. and Nakamoto, H. 2003. “Light plays a key role in the modulation of heat shock response in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803.” **Biochem. Biophys. Res. Commun.** 306 : 872-879.
- Aslan, S., and Kapdan, I.K. 2006. “Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae.” **Ecol. Eng.** 28: 64-70.
- Asthana, R.K, Chatterjee, S. and Singh, SP. 1995 “Investigations on nickel biosorption and its remobilization.” **Process. Biochem.** 30:729–34.
- Austin, P.A., Ross, I.S. and Mills, J.D. 1996. “Regulation of pigment content and enzyme activity in the cyanobacterium *Nostoc* sp. Mac grown in continuous light, a light-dark photoperiod, or darkness.” **Biochem. Biophys. Acta.** 1277 : 141-149.
- Ayres, D.M., Davis, A.P. and Gietka, P.M. 1994. **Removing heavy metals from wastewater.** University of Maryland, Engineering Research Center Report. [online]. Available : <http://www.mtech.umd.edu/MTES/docs/PMG%20metal%20precip%20man-1.pdf>
- Baek, S.H., Shimode, S. and Kikuchi, T. 2008. “Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of temperature, light intensity and photoperiod.” **Harmful Algae.** 7 : 163–173.

- Barker, A.V. and G.M. Bryson. 2007. **Nitrogen In Handbook of Plant nutrition**. CRC Press, Florida.
- Bekasova, O.D., Brekhovskikh, A.A. and Moskvina, M.I. 2002. "Participation of extracellular polysaccharides in detoxification of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum*." **Biofizika**. 47 : 515:523.
- Bertilsson, S., Berglund ,O., Karl, D.M. and Chisholm, S.W., 2003. "Elemental composition of marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: implications for the ecological stoichiometry of the sea." **Limnol. Oceanogr.** 48 : 1721–1731.
- Bertrand, A.M., Gros, C.D. and Jupin, H. 1987. "Stimulating effect of light-to-dark transition on carbon assimilation by marine diatom." **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** 112 : 11-26.
- Bradshaw, D.J., Marsh, P.D., Watson, G.K. and Allison, C. 1998. "Role of *Fusobacterium nucleatum* and coggregation in anaerobe survival in planktonic and biofilm oral microbial communities during aeration." **Inf. Immunol.** 66 : 4729-4732.
- Brady, D., Letebele, B., Duncan, J.R. and Rose, P.D., 1994. "Bioaccumulation of metals by *Scenedesmus*, *Selenastrum* and *Chlorella* algae." **Water-SA.** 20 : 213–218.
- Carr, H.P., Carino, F.A., Yang, M.S. and Wong, M.H. 1998. "Characterization of the cadmium-binding capacity of *Chlorella vulgaris*." **Bull. Environ. Contam. Toxicol.** 60 : 433-440.
- Chen, H. and Pan, S.S. 2005. "Bioremediation potential of *Spirulina* : toxicity and biosorption studies of lead." **J. Zhgejiang University Science.** 6:171-174.
- Cho, D.U., Lee, S.T., Park, S.W. and Chung, A.A. 1994. "Studies on the biosorption of heavy metals onto *Chlorella vulgaris*." **J. Environ. Sci. Heal.** 29 : 389-409.
- Choudhary, M., Jetley, U.K., Khan, M.A., Zutshi, S. and Fatma, T. 2007. "Effect of heavy metal stress on praline, malondialdehyde, and superoxide dismutase activity in the cyanobacterium *Spirulina platensis*-S5." **Ecotoxicol. Environ. Saf.** 66:204-209.
- Clemens, S. 2006 . "Evolution and function of phytochelatin synthases." **J. Plant Physiol.** 163 : 319-332.
- Cloern, J.E. 1977. "Effect of light intensity and temperature on *Cryptomonas ovata* (Cryptophyceae) growth and nutrient uptake rate." **J. Phycol.** 13 : 389–395.
- Collyer, D. M., and G. E. Fogg. 1955. Studies on fat accumulation by algae. **J. Exp. Bot.** 6:256-275.
- Cobbett, C. and Goldsbrough, P. 2002. "Phytochelatin and metallothioneins: Roles in heavy metal

- detoxification and homeostasis.” **Annu. Rev. Plant Biol.** 53 :159–182.
- Corder, S.L. and Reeves, M., 1994. “Biosorption of nickel in complex aqueous waste streams by cyanobacteria.” **Appl. Biochem. Biotechnol. Part A: Enzyme Eng. Biotechnol.** 45–46 : 847–859.
- Dahrazma, B., and Mulligan, C.N. 2007. “Investigation of the removal of heavy metals from sediments using rhamnolipid in a continuous flow configuration.” **Chemosphere.** 69 : 705–711.
- De la Cruz, F., Valenzuela-Espinoza, L., Millán-Núñez, E., Charles, R., Trees, C., Santamaría-del-Ángel, E. and Núñez-Cabrero, F. 2006. “Nutrient uptake, chlorophyll *a* and carbon fixation by *Rhodomonas* sp. (Cryptophyceae) cultured at different irradiance and nutrient concentrations” **Aquacult. Eng.** 35 : 51-60.
- Devars, S., Hernandez, R. and Sanchez, R.M. 1998. “Enhanced heavy metal tolerance in two strains of photosynthetic *Euglena gracilis* by preexposure to mercury of cadmium.” **Archives Environmental Contamination and Toxicology.** 34:128-135.
- Di Toppi, L.S., Pawlik-Skowron´ska, B., Vurro, E., Vattuone, Z., Kalinowska R., Restivo F.M., Musetti, R. and Skowron´ski, T. 2008. “First and second line mechanisms of cadmium detoxification in the lichen photobiont *Trebouxia impressa* (Chlorophyta).” **Environ. pollut.** 151 : 280-286.
- Domínguez-Solís, J.R., Gutiérrez-Alcalá, G., Romero L.C. and Gotor, C. 2001. “The cytosolic O-Acetylserine (thiol) lyase gene is regulated by heavy metals and can function in cadmium tolerance.” **J. Biol. Chem.** 276 : 9297–9302.
- Donmez, G.C., Aksu ,Z., Ozturk, A. and Kutsal, T. 1999. “A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae.” **Proc. Biochem.** 34:885-892.
- Eccles, H. 1999. “Treatment of metal-contaminated wastes: why select a biological process.” **Trend in Biotechnology.** 12:462-465.
- El-Enany, A.E. and Issa, A.A. 2000. Cyanobacteria as a biosorbent of heavy metals in sewage water. **Environ. Toxicol. Pharmacol.** 8 : 95-101.
- El-Sheekh, M.M., El-Shouny, W.A., Osman, M.E.H. and El-Gammal, E.W.E. 2005. “Growth and heavy metals removal efficiency of *Nostoc muscorum* and *Anabaena subcylindrica* in sewage and industrial wastewater effluents.” **Environ. Toxicol. Phar.** 19 : 357–365.

- Epstein, E. and Bloom, A.J. 2005. **Mineral Nutrition of Plant: Principle and Perspectives**.
Sinauer Associates, Inc. Publishers, Massachusetts.
- Eriksen, N.T. and Iversen, L.J.J. 1995. "Photosynthetic pigments as nitrogen stores in the cryptophyte alga *Rhodomonas* sp." **J. Mar. Biotechnol.** 3 : 193–195.
- Erten-Unal, M. and Wixson, B.G. 1999. "Biotreatment and chemical speciation of lead and zinc mine/mill wastewater discharges in Missouri. USA." **Water, Air and Soil Pollution.** 116 : 501-522.
- Fabregas, J., Herrero, C., Cabezas, B. and Abalde, J. 1985. "Mass culture and biochemical variability of the marine microalga *Tetraselmis suecica* Kylin (Butch) with high nutrient concentration **Aquaculture.** 49 : 231-244.
- Fabregas, J., Herrero, C., Cabezas, B. and Abalde, J. 1986. "Biomass production and biochemical composition in mass cultures of the marine microalga *Isochrysis galbana* Parke at varying nutrient concentrations." **Aquaculture.** 53 : 101-113.
- Falkowski, P.G. and LaRoche, J. 1991. "Minireview: acclimation to spectral irradiance in algae." **J. Phycol.** 27 : 8–14.
- Feng, Q., Tai, P., Li, P., Guo, Y. and Fu, S. 2009. "Role of Sulfur in Cadmium Accumulation of *Tagetes erecta* L." **J. plant Nutr.** 32:919-928.
- Fernandez, E., Fritzb, J.J. and Balch, W.M. 1996. "Chemical composition of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi* under light-limited steady state growth." **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** 207 : 149-160.
- Franklin, N.M., Staube, J.L., Markich, S.J. and Lim, R.P. 2000. "pH-dependent toxicity of copper and uranium to a tropical freshwater alga (*Chlorella* sp.)." **Aqua. Toxicol.** 48 : 275–289.
- Friberb, I., Elinder, C.G. and Kjelstrom, C. 1992. **Environmental Health Criteria Cadmium**.
Van Nostrand Reinhold Company, Finland. 36-50 p.
- Friedman, O., Dubinsky, Z. and Arad, S. 1991. "Effect of light intensity on growth and polysaccharide production in red and blue-green rhodophyta unicells." **Biores. Technol.** 38 : 105-110.
- Garg, P., Tripathi, R. D., Rai, U. N., Sinha S. and Chandra, P. 2004. "Cadmium accumulation and Toxicity in submerged plant *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle." **Environ. Monitor. Asses.** 47 : 167-173.
- Gatenby, C.M., Orcutt, D.M., Kreeger, D.A., Parker, B.C., Jones, V.A. and Neves, R.J. 2003.

- Biochemical composition of three algal species proposed as food for captive freshwater mussels. **J. Appl. Phycol.** 15 : 1–11.
- Geider, R.J., La Roche, J., Greene, R. and Olaizola, M. 1993. “Response of the photosynthetic apparatus of *Phaeodactylum tricoratum* to nitrate, phosphate, or iron starvation.” **J. Phycol.** 29 : 755–766.
- Gekeler, W., Grill, E., Winnacker, E.L. and Zenk, M.H. 1988. “Algae sequester heavy metals via synthesis of phytochelatin complexes.” **Arch. Microbiol.** 150 : 197-202.
- Gold C., Maxel, A.F., Coste, M. and Boudou, A. 2002. “Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd, Zn) in rivers.” **Water Research.** 36 : 3654-3664.
- Gupta, M., Sinha, S. and Chandra, P. 2004. “Copper-induced toxicity in aquatic macrophyte, *Hydrilla verticillata*: effect of pH.” **Earth. Environ. Sci.** 5:23-33.
- Hassler, C.S., Behra, R. and Wilkinson, K.J. 2005. “Impact of zinc acclimation on bioaccumulation and homeostasis in *Chlorella kesslerii*.” **Aqua. Toxicol.** 74 : 139-149.
- He, H., Chen, F., Li, H., Xiang, W., Li, Y. and Jiang, Y. 2010. “Effect of iron on growth, biochemical composition and paralytic shellfish poisoning toxins production of *Alexandrium tamarense*.” **Harmful Algae.** 9 : 98–104.
- Hessler, A. 1974. “The effects of lead on algae: effects of Pb on viability and motility of *Platymonas subcordiformis* (Chlorophyta, Volvocales)”. **Water. Air. Soil. Poll.** 3:371-385.
- Hirata, K., Tsuji, N. and Miyamoto, K. 2005. “Biosynthetic regulation of phytochelatin, heavy metal-binding peptides.” **J. Biosci. Bioen.** 100: 593-599.
- Hirata, K., Tsujimoto, Y., Namba, T., Ohta, T., Hirayanagi, N., Miyasaka, H., Zenk, M.H. and Miyamoto, K. 2001. “Strong induction of phytochrlatin synthesis by zinc in marine green algae. *Dunaliella tertiolecta*.” **J. Biosci. Bioen.** 92:24-29.
- Honma, T. and Park H. D. 2005. “Influences of nitrate and phosphate concentrations on *Microcystis* species composition and microcystin concentration in Lake Suwa.” **J. Jpn. Soc. Water Environ.** 28 : 373–378.
- Hossain, S.M. and Anantharaman, N. 2006 “Studies on bacterial growth and lead (IV) biosorption using *Bacillus subtilis*” **Indian J. Chem Techn.** 13 : 591-596.
- Huang, Z., Li, L., Huang, G., Yan, Q., Shi, B. and Xu, X. 2009. “Growth-inhibitory and metal-

- binding proteins in *Chlorella vulgaris* exposed to cadmium or zinc.” *Aqua. Toxicol.* 91 : 54-61.
- Huertas, E., Montero, O. and Lubián, L.M.. 2000. “Effects of dissolved inorganic carbon availability on growth, nutrient uptake and chlorophyll fluorescence of two species of marine microalgae” *Aquacult. Eng.* 22 : 181-197.
- Joux-Arab, L., Berthet, B. and Robert, J.M. 2000. Do toxicity and accumulation of copper change during size reduction in the marine pennate diatom, *Haslea ostrearia*, *Marine Biol.* 136 : 323-330.
- Imai, H., Chang, K.H. and Nakano, S.I. 2009. “Growth Responses of Harmful Algal Species *Microcystis* (Cyanophyceae) under Various Environmental Conditions.” *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Environmental Research in Asia*, pp. 269–275.
- Imanoglu, E., Sukan, F.V. and Dalay, M.C. 2007. “Effect of different culture media and light intensities on growth of *Haematococcus pluvialis* . *Int. J. Natur. Eng. Sci.* 1 : 05-09.
- Jensen, T.E., Rachlin, J.W., Jani, V. and Warkentine, B. 1982. “An X-ray energy dispersive study of cellular compartmentalization of lead and zinc in *Chlorella saccharophila* (Chlorophyta), *Navicula incerta* and *Nitzschia closterium* (Bacillariophyta).” *Environ. Exp. Bot.* 22 : 319-328.
- Kidambi, S.P., Sundin, G.W., Palmer, D.A., Chakrabarty, A.M. and Bender, C.L. 1995. “Copper as a signal for alginate synthesis in *Pseudomonas syringae*.” *Appl. Environ. Microbiol.* 61 : 2172-9.
- Kirk, J.T.O. 1994. **Light and Photosynthesis in aquatic Ecosystem.** Cambridge University Press, Cambridge. 509 p.
- Kong, J.Y., Lee, H.W., Hong, J.W., Kang, Y.S., Kim, J.D., Chang, M.W. and Bae, S.K. 1998. “Utilization of a cell-bound polysaccharide produced by the marine bacterium *Zoogloea* sp.: New biomaterial for metal adsorption and enzyme immobilization.” *J. Mar. Biotechnol.* 6 : 99-103.
- Kozłowska-Szerenos, B., Białuk, I. and Maleszewski, S. 2004. “Enhancement of photosynthetic O₂ evolution in *Chlorella vulgaris* under high light and increased CO₂ concentration as a sign of acclimation to phosphate deficiency.” *Plant Physiol. Biochem.* 42 : 403-409.
- Kreger, D.R. 1962. **Cell wall. In physiology and biochemistry of Algae.** Academic Press, New York.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

York.

- Knusten, G. and Skjanes, K. 1999. "Simple growth chamber for culturing microorganism with recision at different temperature and irradiance." **J.Appl. Phycol.** 11:487-491.
- Larkum, A.W.D., Douglas, S.E. and Raven, J.A. 2003 . **Photosynthesis in Algae.** Kluwer Academic Publishers, London. 479 p.
- Lewitus, J.A. and Caron, D.A. 1990. "Relative effects of nitrogen or phosphorus depletion and light intensity on the pigmentation, chemical composition and volume of *Pyrenomonas salina* (Cryptophyceae)." **Mar. Ecol. Prog. Ser.** 61 : 171-181.
- Loogman, J.G., Post, A.F. and Mur, L.R. 1980. "The influence of periodicity I light conditions as determined by the trophic state of the water, on the growth of the green alga *Scenedesmus proteberans* and the cyanobacterium *Oscillatoria agardhii*." **Hypertrophic. Ecosys.** pp. 79-82.
- Malik, A. 2004. "Metal bioremediation through growing cells." **Environ. Intern.** 30:261-278.
- Malone, T.C., Conley, D.J., Fisher, T.R., Glibert, P.M. and Harding, L.W. 1996. "Scales of nutrient-limited phytoplankton productivity in Cheasapeake Bay." **Estuaries.** 19 : 371-385.
- Matsunaga, T., Takeyama, H., Nakao, T. and Yamazawa, A. 1999. "Screening of marine microalgae for bioremediation of cadmium polluted seawater." **J. Biotechnol.** 70 : 33-38.
- McLean, M.W. and Williamson, F.B. 1977. "Cadmium accumulation by the marine red alga *Porphyra umbilicalis*." **Physiology of plant.** 41:268-272.
- Meeson, B.W. and Sweeney, B.M. 1982. "Adaptation of *Ceratium furca* and *Gonyaulax polyedra* (Dinophyceae) to different temperatures and irradiance: growth and cell volumes." **J. Phycol.** 18 : 241-245.
- Meseck, S.L., Alix, J.H. and Wikfors, G.H. 2005. "Photoperiod and light intensity effects on growth and utilization of nutrients by the aquaculture feed microalga, *Tetraselmis chui* (PLY429)." **Aquaculture.** 246 : 393-404.
- Mohamed, Z.A. 2001. "Removal of cadmium and manganese by a non-toxic strain of the freshwater cyanobacterium *Gloeothece magna*." **Water Res.** 35 : 4405-4409.
- Nalewajko, C., Colman, B. and Olaveson, M. 1997. "Effects of pH on growth, photosynthesis,

- respiration, and copper tolerance of three *Scenedesmus* strains.” **Environ. Exp. Bot.** 37 : 153-160.
- Narberhaus, F. 1999. “Negative regulation of bacterial heat shock genes.” **Mol. Microbiol.** 31 : 1-8.
- Okay, O.S., Tüfekci, V. and Gaines, A.1997. “The effect of metal mixture in the culture medium on the growth of *Phaeodactylum tricornutum* under nutrient limitation.” **Turkish. T. Mar. Sci.** 3 : 23-32.
- Omar, H.H. 2002. .Bioremoval of zinc ions by *Scenedesmus obliquus* and *Scenedesmus quadricauda* and its effect on growth and metabolism.” **Int. Biodeter. Biodegr.** 50 : 95-100.
- Onyancha, D., Mavura, W., Ngila, J.C., Ongoma, P. and Chacha, J. 2008. “Studies of chromium removal from tannery wastewaters by algae biosorbents, *Spirogyra condensata* and *Rhizoclonium hieroglyphicum*.” **J. Hazard. Mater.** 158 : 605-614.
- Osman, M.E.H., El-Naggar, A.H., El-Sheekh, M.M. and El-Mazally, E.E. 2004. “Differential effects of Co^{2+} and Ni^{2+} on protein metabolism in *Scenedesmus obliquus* and *Nitzschia perminuta*.” **Environ. Toxicol. Phar.** 16 : 169–178.
- Otero, A. and Vincenzini, M. 2003. “Extracellular polysaccharide synthesis by Nostoc strain as affected by N source and light intensity.” **J. Biotechnol.** 102:142-152.
- Oven, M., Page, I.E., Zenk, M.H. and Kutchan, T.M. 2002a. “Molecular characterization of the homo-phytochelatin synthase of soybean glycine max.” **J. Biol. Chem.** 277:4747-4754.
- Oven, M., Grill, E., Golan-Goldhirsh, A., Kutchan, T.M. and Zenk, M.H. 2002b. “Increase of free cysteine and citric acid in plant cells exposed to cobalt ions.” **Phytochemistry.** 6:467-474.
- Papageorgiou, G. and Govindjee. 1971. pH control of chlorophyll *a* fluorescence in algae. **Biochem. Biophys. Acta.** 234 : 429-432.
- Parikh, A. and Madamwar, D. 2006. “Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria.” **Biores. Technol.** 97 : 1822-1827.
- Perales-Vela, H.V., Peña-Castro, J.M. and Cañizares-Villanueva, R.O. 2006. “Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae.” **Chemosphere.** 64 : 1-10.
- Percival ,E. and McDowell, R.H. 1967. **Chemistry and Enzymology of Marine Algal Polysaccharides.** Academic Press, London.

- Perez-Rama, M., Alonoso, J.A., Lopez, C.H. and Vaamonde, E.T. 2002. "Cadmium removal by living cells of the marine microalgae *Tetraselmis suecica*." **Biores. Technol.** 84 : 265-270.
- Piorreck, M., Baasch, K.H. and Pohl, P. 1984. "Biomass production, total protein, chlorophyll, lipid and fatty acids of freshwater green and blue green algae under different nitrogen regimes." **Phytochemistry.** 23 : 207-216.
- Pumpel T., Ebner, C., Pernfu, B.B., Schinner, F., Diels, L. and Keszthelyi, Z. 2001. "Treatment of rinsing water from electrolyses nickel plating with a biologically active moving-bed sand filter." **Hydrometallurgy.** 59 : 383-393.
- Rafiqul, I.M., Jalal, K.C.A. and Alam. M.Z. 2005. Environmental Factors for Optimisation of *Spirulina* Biomass in Laboratory Culture." **Biotechnol.** 4 : 19-22
- Rai, L.C., Rai, P.K. and Mallick, N. 1996. "Regulation of Heavy Metal Toxicity in Acid Tolerant *Chlorella*: Physiological and Biochemical Approaches." **Environ. Exp. Bot.** 36 : 99-109.
- Richardson, B., Orcutt, D.M., Schwertner, H.A., Martinez C.L. and Wickline, A.H.E. 1969. Effects of Nitrogen Limitation on the Growth and Composition of Unicellular Algae in Continuous. **Appl. Microbiol.** 18 : 245-250.
- Robinson, N.J. 1989. **Metal-binding polypeptides in plants.** In: A.J. Shaw, Editor, **Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects**, CRC Press Inc., Boca Raton, 195–214 pp.
- Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006a. "Lead (Pb^{2+}) Removal from Wastewater by cyanobacterium *Calothrix marchica*." **Kasetsart Journal (Natural Science).** 40 : 784-794.
- Ruangsoomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N. W. 2006b. "Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa*." **Water Research.** 40 : 3759-3766.
- Ruangsoomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2008. "Removal of lead (Pb^{2+}) by the Cyanobacterium *Gloeocapsa* sp.." **Biores. Technol.** 99 : 5650-5658.
- Sallal, A.K.J., 1986. "Growth of cyanobacteria on sewage effluents." **Microb.** 46 : 121–129.
- Sandau, E., Sandau, P. and Pulz, O. 1996. "Heavy metal sorption by microalgae." **Acta. Biotechnol.** 16 : 227-235.

- Schiewer, S. and Volesky, B. 2000. **Biosorption process for heavy metal removal In: Environmental Microbe-Metal Interactions.** ASM Press. Washington.
- Schuthess, C.P. and Huang, C.P. 1990. "Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium oxide surfaces on clay minerals." **Soil. Sci. Soc. Am. J.** 54 : 267-273.
- Schluter, L. 1998. "The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment." **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** 228 : 53-71.
- Sciandra, A., Lazzara, L., Claustre, H. and Babin, M. 2000. "Response of growth rate, pigment composition and optical properties of *Cryptomonas* sp. to light and nitrogen stress." **Mar. Ecol. Prog. Ser.** 201 : 107-120.
- Shifrin, N.S. and Chisholm, S.W. 1981. "Phytoplankton lipids: interspecific differences and effects of nitrate, silicate and light-dark cycles." **J. Phycol.** 17:374-384.
- Shuttleworth, K. and Unz, R. 1993. Sorption of heavy metals to the filamentous bacterium *Thiothrix strain A1*. **Appl. Environ. Microbiol.** 59:1274-1282.
- Singh, N., Asthana, R.K., Kayastha, A.M., Pandey, S., Chaudhary, A.K. and Singh, S.P. 1999. "Thiol and exopolysaccharide production in a cyanobacterium under heavy metal stress" **Process. Biochem.** 35 : 63-68.
- Solovchenko, A.E., Khozin-Goldberg, I., Didi-Cohen, S., Cohen, Z. and Merzlyak, M.N. 2008. "Effects of light intensity and nitrogen starvation on growth, total fatty acids and arachidonic acid in the green microalga *Parietochloris incise*" **J. Appl. Phycol.** 20 : 245-251.
- Staats, N., Stal, L.J. and Mur, L.R. 2000. "Exopolysaccharide production by the epipellic diatom *Cylindrotheca closterium*: effects of nutrient conditions." **Aqua. Toxicol.** 48 : 275-289.
- Stehfes, K., Toepel, J. and Wilhelm, C. 2005. "The application of micro-FTIR spectroscopy to analyze nutrient stress-related changes in biomass composition of phytoplankton algae." **Plant Physiol. Biochem.** 43 : 717-726.
- Stokes, P.M. 1983. "Responses of freshwater algae to metals." *In* Progress in Phycological Research, Elsevier, Amsterdam.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. 1996. **Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters.** 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Terry, P.A. and Stone W. 2002. "Biosorption of cadmium and copper contaminated water by
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scenedesmus abundans.” *Chemosphere*. 47: 249-255.

Torricelli, E., Gorbi, G., Pawlik-Skowrońska, B., di Toppi, L.S. and Corradi, M.G. 2004.

“Cadmium tolerance, cysteine and thiol peptide levels in wild type and chromium tolerant strains of *Scenedesmus acutus* (Chlorophyceae).” *Aquat. Toxicol.* 68 : 315–323.

Travieso, L., Canizares, R.O., Borja, R., Benitez, F., Dominguea, A.R., Dupeyron R. and

Valiente, Y.V.1999. “Heavy metal removal by microalgae.” *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 62 : 144-151.

Tsujimoto, R., Yamazaki, H., Maeda, S.C. and Omata, T. 2007. “Distinct roles of nitrate and

nitrite in regulation of expression of the nitrate transport gene in moss *Phycomitrella patens*.” *Plant. Cell. Physiol.* 48 : 484-497.

Tubea, B., hawxby, K. and Metha, R. “The effect of nutrient, pH and herbicide levels on algal growth. *Hydrobiologia.* 79 : 221-227.

Turpin, D.H., 1991. “Effects of inorganic N availability on algal photosynthesis and carbon metabolism.” *J. Phycol.* 27 : 14–20.

Tuzun, I., Bayramoglu, G., Yalcin, E., Basaran, G., Celik, G. and Arica, M.Y. 2005.

“Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg(II), Cd(II) and Pb(II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*.” *J. Environ. Manage.* 77 : 85-92.

Tzovenis, I., De Pauw, N. and Sorgeloos, P., 2003. “Optimization of T-ISO biomass production

rich in essential fatty acids I. Effect of different light regimes on growth and biomass production.” *Aquaculture.* 216 : 203–222.

Valdivia, M.D., Aparicio-Tejo, P.M., Lamsfus, C., Cruz, C., Martins-Loucoa, M. A. and

Moran, J.F. 2008. “Nitrogen nutrition and oxidant metabolism in ammonium-tolerant and sensitive plants.” *Physiol. Plantarum.* 132 : 359-369.

Vanucci, S, Guerrini, F., Milandri, A. and Pistocchi, R. 2010. “Effects of different levels of N-and

P-deficiency on cellyield, okadaic acid, DTX-1, protein and carbohydrate dynamics in the benthic dinoflagellate *Prorocentrum lima*.” *Harmful Algae. Inpress.*

Vatamaniuk, O.K., Mari, S. Lang, A. Chalasani, S., Demkiv, L.O. and Rea, P.A. 2004.

“Phytochelatin synthase, a dipeptidyltransferase that undergoes multisite acylation with γ -glutamylcysteine during catalysis.” *J. Biol. Chem.* 279 : 22449–22460.

Volesky, B. 1990. **Removal and recovery of heavy metals by biosorption, In biosorption of**

- heavy metals, ed. B. Volesky. CRC Press, Boca Raton. p 8-43.
- Vymazal, J. 1995. **Algae and Element Cycling in Wetlands**. Lewis Publishers, London. 689 p.
- Wilde, E.W. and Benemann, J.R. 1993. "Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae." **Biotechnol. Adv.** 11 : 781-812.
- Wong, M.H., and Tam, F.Y. 1984. "Sewage sludge for cultivating freshwater algae and the fate of heavy metals at higher trophic organisms." **Arch. Hydrobiol.** 100 : 287-318.
- Wong, J., P.K., Wong, Y.S. and Tam, N.F.Y. 2000. "Nickel biosorption by two chlorella species, *C. vulgaris* (a commercial species) and *C. miniata* (a local isolate)." **Biores. Technol.** 73 : 133-137.
- Xin, L., Hong-ying, H., Ke, G. and Ying-xue, S. 2010. "Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp." **Biores. Technol.** 101 : 5494-5500.
- Xiang, C.B., Werner, B.L. Christensen E.M. and Oliver, D.J. 2001. "The biological functions of glutathione revisited in *Arabidopsis* transgenic plants with altered glutathione levels." **Plant Physiol.** 126:564-574.
- Zhang, E., Wang, B., Wang, Q., Zhang, S. and Zhao, B. 2008. "Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment." **Biores. Technol.** 99 : 3787-3793.
- Yu-shan, H., Jian-mi, C. and Feng-yi, T. 1992. "Current Research on Heavy metal Binding complexes of plants." **Acta. Bionica. Sinica.** 34 : 146-158.

ภาคผนวก ก

อาหารสูตร BG-11

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

อาหารสูตร Chlorella

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงก์ซัลเฟต 7-ไฮเดรต ($ZnSO_4 \cdot 7 H_2O$)	0.088 กรัมต่อลิตร
แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต ($MnCl_2 \cdot 4 H_2O$)	0.014 กรัมต่อลิตร
โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3)	0.007 กรัมต่อลิตร
คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต ($CuSO_4 \cdot 5 H_2O$)	0.016 กรัมต่อลิตร
โคบอลไนเตรต 6-ไฮเดรต [$Co(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$]	0.005 กรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข

เคมีภัณฑ์สำหรับศึกษาคุณภาพน้ำ

แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)

เอทานอล (C_2H_5OH)

ฟีนอล (C_6H_5OH)

โซเดียมซเตรท ($NaH_2C_6H_5O_7$)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)

โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ($NaOCl$)

โซเดียมไนโตรพรัสไซด์ ($Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$)

เอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซีติกแอซิด (ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)

ไฮโดรคลอริก (HCl)

โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)

ซัลฟานิลาไมด์ ($C_6H_5N_2O_2S$)

NNED (N-1-(naphthyl) ethylenediamine dithydrochloride)

แคดเมียมไนเตรท ($CdNO_3$)

คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)

โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)

acid molybdate-antimony

แอมโมเนียมโพแทสเซียมทาทเรท ($NH_4KC_4H_6O_6$)

กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid)

โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)

ซัลฟูริก (H_2SO_4)

ภาคผนวก ก

บ่อบำบัดน้ำเสียกลาง นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



ภาพที่ 1 ลักษณะบ่อบำบัดน้ำเสีย สถานที่ที่เก็บน้ำเสียตัวอย่าง

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ไนโตรท-ไนโตรเจน

นำน้ำเสียทุกสภาวะการทดลองมาผ่านการกรองแล้ว 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่แก้ว ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมบัพเฟอร์ 1 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปผ่านคอลัมน์ไนเตรทครั้งที่ 1 ปล่อยให้ทิ้งไป 25 มิลลิลิตร และนำไปผ่านคอลัมน์ไนเตรทครั้งที่ 2 แล้วเก็บน้ำตัวอย่างไว้ 25 มิลลิลิตร (ผ่านคอลัมน์ไนเตรทด้วยบัพเฟอร์ 2 ก่อนนำน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์) หลังจากนั้นเติมซัลฟาไมด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้า และเติม NNED 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 20 นาที และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร

การเตรียมไนโตรทมาตรฐาน โดยใช้โพแทสเซียมไนเตรท ที่มีความเข้มข้น 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำตามวิธีข้างต้น

การวิเคราะห์ไนโตรท-ไนโตรเจน

นำน้ำเสียทุกสภาวะการทดลองมาผ่านการกรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว เติมซัลฟาไมด์ 0.2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที เติม NNED 0.2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที - 2 ชั่วโมง และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร

การเตรียมไนโตรเจนมาตรฐาน โดยใช้โซเดียมไนเตรท ที่มีความเข้มข้น 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำตามวิธีข้างต้น

การวิเคราะห์แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

นำน้ำเสียทุกสภาวะการทดลองมาผ่านการกรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว เติมสารละลายฟีนอล 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน หลังจากนั้นเติมโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ 0.4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมสารออกซิไดซ์ (อัลคาไรด์สต็อก+โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ในอัตราส่วน 4:1, เตรียมสด) เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-24 ชั่วโมง และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร

การเตรียมแอมโมเนียมาตรฐาน โดยนำแอมโมเนียคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำตามวิธีข้างต้น

การวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟต (soluble reactive phosphate, SRP)

นำน้ำเสียทุกสภาวะการทดลองมาผ่านการกรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว เติมฟีนอลฟาทาลีน 1 หยด (ถ้าเป็นสีชมพูให้เติมกรดซัลฟูริก 1 หยด) เติมสารผสม (กรดซัลฟูริก 5 N+โพแทสเซียมแอสคอร์บิกไดออกไซด์+แอมโมเนียมโมลิบเดต+กรดแอสคอร์บิก ในอัตราส่วน 10:1:3:6, เตรียมสด) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10-30 นาที และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง spectophoto meter ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

การเตรียมออร์โธฟอสเฟตมาตรฐาน โดยนำโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่มีความเข้มข้น 0, 0.125, 0.250, 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำตามวิธีข้างต้น

การวิเคราะห์ BOD (Biological oxygen demand)

นำน้ำเสียทุกสภาวะก่อนการทดลองและวันสุดท้ายของการทดลอง ปริมาตร 400 มิลลิลิตร มาทำให้อิ่มตัวด้วยออกซิเจนเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำมาบรรจุลงในขวด BOD และทำการวัดปริมาณออกซิเจนด้วยเครื่องวัดออกซิเจนก่อนทำการปิดฝาขวด BOD แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มทำความเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน และทำการวัดปริมาณออกซิเจนด้วยเครื่องวัดออกซิเจนอีกครั้ง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาว อธิยา สพานกลาง

วัน เดือน ปีเกิด 3 กรกฎาคม 2527 ที่สกลนคร

ที่อยู่ 1086/1 หมู่ 10 ซอย 7 ถ. เจริญเมือง ต. ชาติชุม อ. เมือง จ. สกลนคร

ประวัติการศึกษา 2550 วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- พ.ศ. 2553 อธิยา สพานกลาง และสุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2553. “การดูดซับตะกั่วโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Stigonema* sp.” วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 28 : 20-30.
- พ.ศ. 2553 อธิยา สพานกลาง และสุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ. 2553. “การเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ภายใต้ความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน.” หน้า 193-202 ในการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 สาขาประมง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พ.ศ. 2553 Saparnklang, A. and Ruangsomboon S. 2010. “Effects of nitrogen and phosphorus limitation on polysaccharide contents and lead (Pb^{2+}) biosorption capacity of cyanobacteria *Phormidium* sp.” 476-479. in 16 th Asian Agricultural Symposium. KMITL. Bangkok.
- พ.ศ. 2553 รางวัลประกาศนียบัตรการนำเสนอผลงานทางวิชาการ ภาคโปสเตอร์ดีเด่น อันดับ 2 สาขาวิทยาศาสตร์การเกษตร การประชุมวิชาการ งานเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 8 . พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.