

ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายหนาม
Acanthophora spicifera ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ



นางสาว อลิษา โชควิวัฒน์วนิช

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0550-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY OF THE MACROALGAE *Caulerpa lentillifera* AND *Acanthophora spicifera* FOR
THE TREATMENT OF NITROGEN COMPOUND FROM SHRIMP POND EFFLUENT



Miss Alisa Chokwiwattanawanit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-department of Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0550-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย <i>Caulerpa lentillifera</i> และสาหร่ายหนาม <i>Acanthophora spicifera</i> ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ
โดย	นางสาวอลิสตา โชควิวัฒนวิช
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนาผลไพบูรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำธร ชีรคุปต์)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ กาญจนภรณ์ ถิ่นโนมนต์)

อลิสตา โชควิวัฒน์วนิช : ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. (Efficiency of the macroalgae *Caulerpa lentillifera* and *Acanthophora spicifera* for the treatment of nitrogen compound from shrimp pond effluent) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต,
อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข, 136 หน้า. ISBN 974-13-0550-8

ปัจจุบันมีผู้นิยมนำสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีสารประกอบไนโตรเจนอยู่สูง เนื่องจากสาหร่ายสามารถนำไนโตรเจนในรูปของของแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้โดยตรง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย โดยวัดจากปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเมื่อให้แสงที่มีความเข้มระดับต่างๆ ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติและแสงจากโคมฮาโลเจน ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามมีจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000-20,000 ลักซ์ ต่อมาได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิดพบว่า ในส่วนของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ สาหร่ายช่อพริกไทยมีค่า $V_{max} = 0.0897 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$, $K_m = 18.5822 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ส่วนในสาหร่ายหนามมีค่า $V_{max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$, $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ในขณะที่การนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยมีค่า $V_{max} = 0.0175 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$, $K_m = 40.1094 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ส่วนในสาหร่ายหนามมีค่า $V_{max} = 0.0425 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$, $K_m = 90.0509 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่าสาหร่ายหนามมีประสิทธิภาพในการนำแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าสาหร่ายช่อพริกไทยและผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อนไนเตรทเสมอ โดยไนเตรทมีความเข้มข้นสูงไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิด และเมื่อทดลองใช้สาหร่ายทั้งสองชนิดในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง พบว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดจะลดปริมาณแอมโมเนียมในน้ำลงได้อย่างรวดเร็ว โดยชุดทดลองที่ให้แสงต่อเนื่องที่ระดับ 15,000 ลักซ์ จะได้ผลดีกว่าชุดทดลองที่ได้รับแสงธรรมชาติ และสาหร่ายหนามจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียมได้ดีกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4172536123 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: *Caulerpa lentillifera*/ *Acanthophora spicifera* / PHOTOSYNTHESIS/ UPTAKE KINETICS/
OXYGEN EVOLUTION/ MACROALGAE

ALISA CHOKWIWATTANAWANIT : EFFICIENCY OF THE MACROALGAE *Caulerpa lentillifera*
AND *Acanthophora spicifera* FOR THE TREATMENT OF NITROGEN COMPOUND FROM
SHRIMP POND EFFLUENT. THESIS ADVISOR : PROF. PIAMSAK MENASVETA, Ph.D.

THESIS CO-ADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D.

136 pp. ISBN 974-13-0550-8

Caulerpa lentillifera and *Acanthophora spicifera* are the macroalgae often used for taking up nitrogen waste in shrimp wastewater treatment pond in Thailand. The present study aims to evaluate photosynthesis efficiency and nitrogen uptake in these algae. It was found that *Caulerpa lentillifera* and *Acanthophora spicifera* had light saturation, indicated by oxygen evolution, at approximately 15,000-20,000 lux. On the other hand, ammonium and nitrate uptake kinetic of both algae in laboratory condition (30 ppt, 30 °C and 15000 lux light intensity) were studied using Michaelis –Menten equation. It results showed that *Caulerpa lentillifera* had maximum ammonium uptake rate (V_{max}) and half saturation constant (K_m) of 0.0897 mgNH₄⁺-N/(g(fw))/hr and 18.5822 mgNH₄⁺-N/l, respectively, while *Acanthophora spicifera* had V_{max} = 0.3406 mgNH₄⁺-N/(g(fw))/hr and K_m = 50.9554 mgNH₄⁺-N/l, respectively. For nitrate uptake, *Caulerpa lentillifera* had maximum nitrate uptake rate (V_{max}) of 0.0175 mgNO₃⁻-N/(g(fw))/hr with K_m = 40.7094 mgNO₃⁻-N/l while *Acanthophora spicifera* had V_{max} = 0.0425 mgNO₃⁻-N/g (fw)/hr and K_m = 90.0509 mgNO₃⁻-N/l. The results suggested that *Acanthophora spicifera* had the higher nitrogen uptake rate than *Caulerpa lentillifera*. Ammonium was found the primary nitrogen source and high concentration of nitrate was not effect ammonium uptake rate in both algae. In the experiment with the water from shrimp pond, both algae could rapidly reduce ammonium and the treatment with continuous artificial light (15,000 lux) had higher efficiency than natural light (control). The results also indicated that *Acanthophora spicifera* had higher treatment efficiency than *Caulerpa lentillifera* which was related to the kinetics experiments.

Department Inter-department of Environmental Science

Field of Study : Environmental Science

Academic year : 2000

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. สรวีศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และกรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ทางด้านวิชาการระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีระธิตีวรกุล และนักวิจัยของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำด้านวิชาการ ตลอดจนให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ของหน่วยปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผล ไพบูลย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำธร ชีรคุปต์ และศาสตราจารย์ กาญจนภรณ์ ถิ่วมโนมนต์ กรรมการที่กรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพณิช ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณบรรจง นิสกวนิชย์ และภรรยาที่ให้คำแนะนำในการเลี้ยงสาหร่าย ตลอดจนให้สาหร่ายมาใช้ในงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนในโรงเพาะเลี้ยง จุฬา โดยเฉพาะคุณเสรี ดอนเหนือ คุณชมพูนุช ชัยรัตน์ และคุณชนิษฐา แสงงาม รวมทั้งเพื่อนๆ และน้องๆ ที่สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สถานะแวดล้อมทุกคน โดยเฉพาะ คุณกัญญาจิต ไล่ภิญญาสิริ คุณปิยวรรณ สายมโนพันธ์ คุณกฤติมา ทสนะ และคุณกัลยา รัตนสิทธิพงศ์ สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา โดยเฉพาะมารดา และคุณนงเยาว์ เหล่าอยู่คง ที่มีส่วนอย่างยิ่งในทุกด้านของงานวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่ให้การสนับสนุนทางการเงิน เป็นกำลังใจ และช่วยแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะช่วยเป็นธุระในการทำชิ้นไฟสำหรับเลี้ยงสาหร่าย และอำนวยความสะดวกในการเดินทางไปเก็บสาหร่ายที่ บรจรงฟาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา อีกทั้งขอขอบคุณคุณภิกขานี โชควิวัฒน์วนิช และคุณภาสินี ธีระภานุ ที่ได้ช่วยเหลือในการพิมพ์วิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบรรดาญาติๆ ทุกคนของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง.....	27
4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	47
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	136

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) ที่ยอมให้มีได้ในน้ำโดยไม่เป็นอันตราย หรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ (NH_3 ไม่เกิน 0.025 mg/l).....	8
3.1 วิธีการคำนวณหาปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis oxygen evolution).....	33
4.1 ผลของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายมีผลต่ออัตราการลดลงของแอมโมเนียในน้ำ ($n=3$).....	54
4.2 แสดงค่า V_{max} และ K_m ของการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>C. lentilifera</i>) ระหว่างชุดทดลองที่ให้แสงและชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงแก่สาหร่าย.....	58
4.3 แสดงค่า V_{max} และ K_m ของการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>) ระหว่างชุดทดลองที่ให้แสงและชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงแก่สาหร่าย.....	61
4.4 แสดงค่า V_{max} และ K_m ของการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิด.....	68
4.5 น้ำหนักแห้งของสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>C. lentilifera</i>).....	70
4.6 น้ำหนักแห้งของสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>).....	70
ตารางผนวกที่	
1. ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย.....	123
2. ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม.....	126
3. ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย.....	128
4. ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม.....	130
5. ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลา 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1)).....	132
6. ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลา 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2)).....	132
7. ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1)).....	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
8. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลา 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2)).....	133
9. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3).....	133
10. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลา 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1)).....	134
11. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลา 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2)).....	134
12. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1)).....	134
13. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลา 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2)).....	135
14. ข้อมูลทดลองหาอัตราการใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทของสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3).....	135

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำและบ่อบำบัดน้ำทางชีวภาพโดยใช้สาหร่าย.....	11
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยจำกัด และความหนาแน่นของประชากร.....	13
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ค่า P_{max} คือ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุด และที่ระดับความเข้มแสงสูงมากๆ อาจเกิดการยับยั้งการสังเคราะห์แสงขึ้นได้ (photoinhibition).....	15
2.4 แสดงการนำแอมโมเนียม (NH_4^+) ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรท (NO_3^-) เข้าไปใช้ในเซลล์ของสาหร่าย.....	20
2.5 กราฟเส้นโค้งมิเคลลิส-เมนเทน ระหว่างอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์กับความเข้มข้นของสารอาหาร.....	21
2.6 กราฟเส้นตรงของฮานส์ใช้หาค่า K_m และ V_{max}	21
3.1 สาหร่ายช่อพริกไทย (<i>Caulerpa lentillifera</i>).....	28
3.2 สาหร่ายหนาม หรือสาหร่ายหางม้า (<i>Acanthophora spicifera</i>).....	29
3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดลองวัดอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในห้องปฏิบัติการ.....	31
3.4 กราฟตัวอย่างแสดงผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนาม ในห้องปฏิบัติการ.....	32
3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>Caulerpa lentillifera</i>) ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ.....	34
3.6 แผนภาพแสดงวิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะ.....	37
3.7 แผนภาพแสดงการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม (NH_4^+-N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>C. lentillifera</i>) และสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>).....	40
3.8 ภาพแสดงการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม (NH_4^+-N) และไนเตรท ($NO_3^- -N$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (ก) และสาหร่ายหนาม (ข) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ.....	42

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 แผนภาพแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในสภาพปลอดเชื้อในห้องปฏิบัติการ.....	44
3.10 ภาพแสดงการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม ในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำภายใต้สภาพแสงจากธรรมชาติ (ก) เปรียบเทียบกับการให้แสงคงที่ที่จุดอิ่มตัวของสารสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการ (ข).....	46
4.1 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>C. lentillifera</i>) ในห้องปฏิบัติการ.....	47
4.2 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>) ในห้องปฏิบัติการ.....	48
4.3 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ.....	49
4.4 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V เมื่อให้ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์.....	57
4.5 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V ของชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง.....	57
4.6 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (<i>C. lentillifera</i>) โดยชุดทดลองมีค่า $V_{\text{max}} = 0.0897 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 18.5822 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ ส่วนชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงมีค่า $V_{\text{max}} = 0.0558 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 30.28 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริก (<i>C. lentillifera</i>) มีค่า $V_{\max} = 0.0897 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 18.5822 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง.....	59
4.8 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียม [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม $[S]/V$ เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์.....	60
4.9 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียม [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม $[S]/V$ ของชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง.....	61
4.10 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>) มีค่า $V_{\max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ ส่วนชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงมีค่า $V_{\max} = 0.3221 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 273.1407 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$	62
4.11 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>) มีค่า $V_{\max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง.....	63
4.12 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายช่อพริกไทย $[S]/V$	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (<i>A. spicifera</i>) มีค่า $V_{\max} = 0.0175 \text{ mgNO}_3^-$ -N/g(fw)/hr และ $K_m = 40.1094 \text{ mgNO}_3^-$ -N/l จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง.....	65
4.14 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายหนาม [S]/V.....	66
4.15 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนามมีค่า $V_{\max} = 0.0425 \text{ mgNO}_3^-$ -N/g(fw)/hr และ $K_m = 90.0506 \text{ mgNO}_3^-$ -N/l จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง.....	67
4.16 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายช่อพริกไทย เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย ใช้ระยะเวลาทดลอง 14 ชั่วโมง.....	73
4.17 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 18 ชั่วโมง.....	73
4.18 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 24 ชั่วโมง.....	74
4.19 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 26 ชั่วโมง.....	74
4.20 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 72 ชั่วโมง.....	75
4.21 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ได้สาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 14 ชั่วโมง.....	77

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.22 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ใส่ สำหรับหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 18 ชั่วโมง.....	77
4.23 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ใส่ สำหรับหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 24 ชั่วโมง.....	78
4.24 ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ใส่ สำหรับหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 26 ชั่วโมง.....	78
4.25 ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรท; mgN/l ของชุดการทดลองที่ใส่ สำหรับหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 72 ชั่วโมง.....	79
4.26 แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม (ก) ไนไตรท์ (ข) และไนเตรท (ค) แต่ละช่วงเวลาที่ใส่สำหรับหนามและสำหรับช่อพริกไทย อย่างละ 200 กรัม ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ.....	83
4.27 แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม (ก) ไนไตรท์ (ข) และไนเตรท (ค) แต่ละช่วงเวลาที่ใส่สำหรับหนามและสำหรับช่อพริกไทย อย่างละ 200 กรัม ภายใต้สภาพแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการ.....	85
4.28 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสำหรับช่อพริกไทยน้ำหนัก 300 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณ ไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 1.....	87
4.29 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสำหรับช่อพริกไทยน้ำหนัก 300 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณ ไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2.....	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.30 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยน้ำหนัก 200 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณ ไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 3.....	91
4.31 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนามน้ำหนัก 150 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 1.....	93
4.32 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนามน้ำหนัก 150 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2.....	95
4.33 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการ นำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนามน้ำหนัก 200 กรัม ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ (ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 3.....	97
4.34 ภาพถ่ายไดอะตอม <i>Chaetoceros</i> sp. ซึ่งตรวจพบในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ของชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย.....	99
4.35 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของชุดทดลองในธรรมชาติ และห้อง ปฏิบัติการของการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....	101

ภาพผนวกที่

หน้า

1. กราฟมาตรฐานแอมโมเนียม-ไนโตรเจน.....	116
2. กราฟมาตรฐานไนไตรท์-ไนโตรเจน.....	118
3. กราฟมาตรฐานไนเตรท-ไนโตรเจน.....	121
4. คอลัมน์บรรจุข้อแคดเมียมสำหรับวิเคราะห์ไนเตรท-ไนโตรเจน.....	122



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในประเทศไทยมีการพัฒนาและขยายพื้นที่การเพาะเลี้ยงออกไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะธุรกิจการเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำของไทยซึ่งจัดเป็นสินค้าเกษตรกรรมส่งออกหลักและทำรายได้เข้าประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท เนื่องจากแรงจูงใจด้านราคาและความต้องการของตลาดทั้งในและนอกประเทศ จึงทำให้มีการพัฒนารูปแบบการเลี้ยงเพื่อเพิ่มจำนวนผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จากเดิมซึ่งเป็นการเลี้ยงแบบธรรมชาติ หรือระบบพื้นบ้าน (extensive system) การเลี้ยงแบบนี้ให้ผลผลิตค่อนข้างต่ำและไม่แน่นอนเพราะใช้พันธุ์กุ้งและอาหารจากธรรมชาติ จึงได้มีการพัฒนาเป็นแบบกึ่งพัฒนา (semi-intensive system) โดยมีการปล่อยพันธุ์กุ้งเพิ่มเติม และให้อาหารเสริม จนในปัจจุบันการเลี้ยงกุ้งเป็นแบบพัฒนา (intensive system) เป็นการเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น โดยใช้ลูกกุ้งจากโรงเพาะฟักเท่านั้น มีการให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปเป็นหลักและเพิ่มเทคโนโลยีทางด้านการจัดการสมบัติของดินพื้นบ่อ สมบัติของน้ำและคุณภาพอาหาร จึงเป็นวิธีที่ให้ผลผลิตสูงสุดและได้รับความนิยมจากผู้เลี้ยงสูงมาก พบว่ามีสัดส่วนถึง 85% ของพื้นที่การเลี้ยงทั้งหมด (ชลล ลิมสุวรรณ, 2535) การเลี้ยงแบบพัฒนานี้ หากขั้นตอนการเลี้ยงมีการจัดการที่ไม่ดีเศษอาหารที่ตกค้างรวมทั้งของเสียต่างๆ จากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ ซึ่งส่วนมากจะเป็นส่วนประกอบของโปรตีนหรืออินทรีย์ไนโตรเจนที่ยังย่อยไม่หมด เมื่อถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียในน้ำ จะสลายตัวให้แอมโมเนียและต่อมาจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์และไนเตรท ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วหากไม่ได้รับการบำบัดก็จะมีผลกระทบต่อสภาพพื้นบ่อและคุณภาพน้ำในบ่อโดยตรง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติเมื่อผู้ประกอบการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นผลให้แหล่งน้ำในธรรมชาติมีปริมาณสารอินทรีย์และสารอาหารต่างๆ โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนอยู่ในปริมาณสูง จึงทำให้เกิดการเจริญและขยายจำนวนของแพลงก์ตอนบางชนิดอย่างรวดเร็วทำให้แหล่งน้ำมีสีเปลี่ยนไปตามสีของแพลงก์ตอนที่มียากนั้น หรือเรียกว่าปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี ซึ่งทำความเสียหายต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และทรัพยากรสัตว์

น้ำชายฝั่งในธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจการประมงและแหล่งท่องเที่ยวทางน้ำ และนำไปสู่ปัญหามลภาวะทางแหล่งน้ำ

จากแนวความคิดที่ว่าสาหร่ายสามารถดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรทเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้โดยตรง ในขณะที่ระบบบำบัดแบบใช้แบคทีเรียจะมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่า เพราะต้องแยกส่วนของระบบบำบัดออกเป็นส่วนที่ใช้ออกซิเจน และส่วนที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อลดปริมาณไนเตรท ทำให้เกิดแนวคิดที่ว่าถ้าสาหร่ายทะเลไปเลี้ยงในน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ก็จะเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งของการบำบัดคุณภาพน้ำทางชีวภาพในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และเพื่อการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ในการเลี้ยงกุ้งระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด จึงได้มีผู้ที่ทดลองใช้สาหร่ายที่พบมากและสามารถเจริญเติบโตได้ง่ายในทุกสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมตั้งแต่พื้นโคลน พื้นทรายและพื้นหิน และสามารถนำมาเลี้ยงในบ่อเพื่อปรับคุณภาพน้ำจากการเลี้ยงกุ้ง ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวชนิด *Caulerpa lentillifera* หรือที่เรียกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายสีแดงชนิด *Acanthophora spicifera* หรือสาหร่ายหนาม ปัจจุบันได้มีการนำมหาสาหร่าย (macroalgae) ทั้งสองชนิดนี้มาเลี้ยงเพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำทะเลก่อนนำมาใช้เลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้งและประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่บรรจพาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา สาหร่ายทั้งสองชนิดนอกจากจะมีประโยชน์ในการลดปริมาณสารอาหารในน้ำแล้ว ผลผลิตของสาหร่ายช่อพริกไทยที่ได้ยังสามารถนำมาเป็นอาหารซึ่งนิยมรับประทานกันในจังหวัดชายทะเล เช่น จ.ตราด ส่วนสาหร่ายหนามสามารถนำไปใช้เป็นอาหารเลี้ยงหอยเป่าสื้อ ซึ่งเป็นสัตว์น้ำที่กำลังได้รับการส่งเสริมให้เป็นสัตว์เศรษฐกิจในอนาคต

จากการศึกษาการใช้สาหร่ายทะเลสกุลต่างๆ มาบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศ ที่ผ่านมายังไม่มีข้อมูลที่ศึกษาถึงการสังเคราะห์แสงและจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของอัตราการนำสารอาหารแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสาหร่ายทั้งสองชนิดในการลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำ และสามารถนำมาใช้คำนวณเพื่อการออกแบบระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเพื่อการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และลดปัญหาที่เกิดต่อสภาวะแวดล้อมในระยะยาวได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)
- 2) เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม
- 3) เพื่อศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม
- 4) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในสภาพแสงธรรมชาติเปรียบเทียบกับการให้แสงคงที่ในห้องปฏิบัติการ

สมมติฐาน

สาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง และมีอัตราการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายแตกต่างกัน

ขอบเขตการศึกษา

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึง

- 1) ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) โดยวัดจากปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (oxygen evolution)
- 2) จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามเมื่อให้สาหร่ายได้รับแสงที่จุดอิ่มตัวของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิด
- 3) วิเคราะห์หาค่าอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสูงสุด (V_{max}) และค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ทำให้อัตราการนำเข้าเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสูงสุด (K_m) ของสาหร่ายทั้งสองชนิด

- 4) ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามในการบำบัดแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรทในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด
- 2) นำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ โดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 3) สนับสนุนการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดอย่างยั่งยืน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำเป็นอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยและมีพัฒนาทางการเลี้ยงมาค่อนข้างยาวนาน ตั้งแต่การเลี้ยงแบบพื้นบ้าน (extensive system) โดยไม่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ของเสียที่ปล่อยออกมามีไม่มากนัก ต่อมาเมื่อลูกกุ้งในธรรมชาติลดลง การเลี้ยงกุ้งทะเลจึงได้เปลี่ยนมาเป็นการเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (semi-intensive system) มาจนถึงการเลี้ยงแบบพัฒนา (intensive system) ซึ่งเป็นการเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีส่วนประกอบของโปรตีนสูงเพื่อเร่งการเจริญเติบโต ใช้อุปกรณ์และเทคนิคการเลี้ยง ตลอดจนการจัดการในบ่อเลี้ยงที่ดี เป็นวิธีที่มีอัตราการรอดตายสูง จึงได้รับความนิยมจากผู้ประกอบการเป็นจำนวนมาก สามารถทำรายได้เข้าประเทศเป็นลำดับหนึ่งในสามของการส่งออก หากพิจารณาปริมาณการผลิตกุ้งทะเลจะพบว่า มีตัวเลขเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 17,886 ตันในปี พ.ศ. 2529 เป็น 23,566 ตันในปี พ.ศ. 2530 และเพิ่มขึ้นสองเท่าตัวเป็น 55,633 ตันในปีถัดมา (2531) จนถึงปี พ.ศ. 2536 มีผลผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงกว่า 200,000 ตันต่อปี (Menasveta, 1997) และสามารถทำรายได้เข้าประเทศไม่ต่ำกว่า 100,000 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2543 (พ่ายพ ยงปักษ์, 2543) แต่เนื่องจากผู้ประกอบการส่วนมากยังมีการจัดการในบ่อเลี้ยงที่ไม่ดีพอ กิจกรรมนี้จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและดินในธรรมชาติและเป็นปัญหาที่มีแนวโน้มที่รุนแรงและขยายตัวเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำในอนาคต ปัจจุบัน สิริ ทุกษ์วินาศ (2541) ได้เสนอแนะแนวทางการปรับปรุงวิธีการเลี้ยงกุ้งกุลาดำเพื่อให้เข้ากับมาตรฐาน ISO 14001 มีการวางนโยบายในการเลี้ยงกุ้งแบบไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีเกณฑ์การเลี้ยงโดยจดทะเบียนผู้ประกอบการและฟาร์มให้มีวิธีการเลี้ยงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ กำหนดเกณฑ์อัตราการปล่อยกุ้ง การใช้ยาและสารเคมี การให้อาหาร การถ่ายเทน้ำ เกณฑ์คุณสมบัติน้ำทิ้ง อายุการเลี้ยงหรือขนาดกุ้งที่จับ และเกณฑ์คุณลักษณะของฟาร์ม รวมถึงเกณฑ์การประหยัดพลังงานในฟาร์ม และยังมีการบันทึกข้อมูลและจัดเก็บเป็นระบบที่ค้นหาได้ง่าย ระบบดังกล่าวจะช่วยแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและยังช่วยให้ผลการเลี้ยงดีขึ้นอีกด้วย

จากรายงานของ Lin (2536) อ้างโดยศิริวรรณ กิตประเสริฐ (2538) รายงานว่า น้ำทิ้งที่ออกมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้ง ที่จะผลิตกุ้ง 1 ตัน จะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ 1,250 กิโลกรัม สารประกอบไนโตรเจน 87 กิโลกรัม และฟอสฟอรัส 28 กิโลกรัม และ Subandar *et al.* (1993) รายงานว่า อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนมากจะเป็นต้นเหตุทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง เนื่องมาจากน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีปริมาณของสารอาหารอยู่สูง โดยเฉพาะพวกสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มเพาะเลี้ยงปลาแซลมอล พบว่ามีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำประมาณ 57-86% และฟอสเฟตที่ละลายน้ำ 22-46% คิดเป็นสัดส่วนของ $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- : \text{P}$ เท่ากับ 17:1 และรายงานของคณิต ไชยาคำ และคุดิต ดันวิไลย์ (2535) พบว่าอาหารที่ให้กุ้งมีเพียง 25-35% เท่านั้นที่กุ้งสามารถกินและนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 70% จะเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนสลายตัวเน่าเสียตกค้างอยู่ที่ก้นบ่อ รวมทั้งของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและการเน่าสลายของสิ่งมีชีวิตที่ตายในบ่อเลี้ยงซึ่งมีสารประกอบของโปรตีนหรืออินทรีย์ไนโตรเจนที่ยังย่อยไม่หมดเมื่อถูกแบคทีเรียย่อยก็จะสลายตัวให้ แอมโมเนียม และถ้ามีปริมาณมากจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น ไนไตรท์ (NO_2) และไนเตรท (NO_3) กลายเป็นแหล่งสะสมของสารอาหารในบ่อเลี้ยง (ปัญญา สุวรรณสัญญา, 2531) ซึ่งหากมีในปริมาณมากและไม่สามารถควบคุมได้ก็จะทำให้คุณภาพน้ำและดินในบ่อเลี้ยงเสื่อมโทรมลง และส่งผลกระทบต่อเนื้อเมื่อผู้ประกอบการได้ปล่อยน้ำทิ้งที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง ทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณสารอาหาร โดยเฉพาะแหล่งไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงกว่าสมดุล เหมาะสมต่อการเจริญของแพลงก์ตอนชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือเกิดขึ้นร่วมกันหลายชนิด แพลงก์ตอนเหล่านี้จะมีสีภายในตัวจึงทำให้น้ำทะเลเปลี่ยนสีไปตามสีของแพลงก์ตอน ก่อให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสีหรือซีปลาวาฟ หรือ แพลงก์ตอนบลูม (plankton bloom) สร้างความเสียหายต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและทรัพยากรสัตว์น้ำชนิดต่างๆ (นรินทร์ ชาติตพันธุ์, 2539)

1.2 ความเป็นพิษของแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรทต่อสัตว์น้ำ

พิษของแอมโมเนียม (NH_4^+)

สัตว์น้ำเกือบทุกชนิดขับถ่ายของเสียซึ่งเป็นสารไนโตรเจนซึ่งมากกว่า 50% อยู่ในรูปของแอมโมเนีย แอมโมเนียเข้าสู่ร่างกายผ่านทางปุย อาหารสัตว์น้ำ สิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการเน่าเปื่อยของสารประกอบไนโตรเจน

แอมโมเนียที่อยู่ในแหล่งน้ำจะมี 2 รูปแบบ ได้แก่

1.1 แอมโมเนียในรูปที่แตกตัว (ionized ammonia, NH_4^+)

1.2 แอมโมเนียในรูปที่ไม่แตกตัว (unionized ammonia, NH_3)

แอมโมเนียอิสระ หรือ NH_3 เป็นพิษอย่างมากต่อสัตว์น้ำหรือกุ้ง แต่ออนแอมโมเนียหรือ NH_4^+ มีความเป็นพิษต่ำกว่า สัดส่วนของ NH_3 และ NH_4^+ ในน้ำขึ้นอยู่กับ pH อุณหภูมิและปริมาณเกลือแร่ ปริมาณ NH_3 จะเพิ่มตามระดับ pH และอุณหภูมิที่สูงขึ้น และ pH ของน้ำจะมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิของน้ำ (ลิริ ทุกข์วินาศ, 2527) จากรายงานพิษเฉียบพลัน (acute toxicity) ของแอมโมเนียของยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร และคณะ, (2532) ได้รายงานปริมาณแอมโมเนีย (NH_3) ที่ทำให้เกิดการตายในช่วงสั้น (24-72 ชั่วโมง) อยู่ระหว่าง 0.4-2.0 mgN/l

แอมโมเนียส่งผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง เพราะทำให้ไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือด ทำให้ระดับแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อของกุ้งเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ pH ของเลือดมีค่าสูงขึ้นและเป็นผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น ทำอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน สัตว์น้ำที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่มีแอมโมเนียสูงถึงระดับ sublethal มักอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย ค่า LC_{50} ของแอมโมเนียอิสระสูงประมาณ 0.5 mg/l แต่ความเข้มข้นเพียง 0.025 mg/l ก็ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำแล้ว ถ้าจำกัดปริมาณของแอมโมเนียอิสระมิให้เกิน 0.025 mg/l (เพื่อมิให้เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ) ปริมาณของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3+\text{NH}_4^+$) ในน้ำที่ระดับ pH และอุณหภูมิต่างๆ จะต้องมิเกินตัวเลขในตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า ถ้าอุณหภูมิของน้ำ 30°C ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมดอาจสูงถึง 3.1 mg/l ได้โดยมิเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในน้ำที่มี pH=7 แต่ถ้า pH ของน้ำสูงถึง 9 แอมโมเนียทั้งหมดต้องไม่เกิน 0.056 mg/l มิฉะนั้นแล้วอาจเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำเนื่องจากพิษของแอมโมเนีย (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539)

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3+\text{NH}_4^+$) ที่ยอมให้มีได้ในน้ำโดยไม่เป็นอันตราย หรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ (NH_3 ไม่เกิน 0.025 mg/l) (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539)

อุณหภูมิ(°C)	pH=7	pH=7.5	pH=8	pH=8.5	pH=9	pH=9.5
5	19.6	6.3	2	0.65	0.22	0.088
10	12.4	5.9	1.37	0.45	0.16	0.068
15	9.4	4.3	0.39	0.31	0.12	0.054
20	6.3	2	0.65	0.22	0.088	0.045
21	4.4	1.43	0.47	0.17	0.069	0.039
30	3.1	1	0.33	0.12	0.056	0.035

พิษของไนไตรท์ (NO_2^-)

ในสภาวะที่มีออกซิเจนแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และไนเตรทได้ตามลำดับด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งไนไตรท์มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าไนเตรทแต่น้อยกว่าแอมโมเนีย Colt and Armstrong, 1981 อ้างโดย ยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร และคณะ (2532) ได้รายงานค่า 96 ชม. LC_{50} ของไนไตรท์ในกุ้งว่าอยู่ระหว่าง คือ 8.5-15.4 mg/l

ไนไตรท์ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในน้ำในปริมาณน้อย ยกเว้นในสภาวะที่แหล่งน้ำขาดออกซิเจน ไนไตรท์จะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยทำปฏิกิริยากับ เม็ดเลือดแดง (hemoglobin) ได้ methemoglobin ซึ่งไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ เม็ดเลือดจะเป็นสีน้ำตาล สัตว์น้ำที่มีอาการเช่นนี้ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้เนื่องจากไม่สามารถใช้ออกซิเจน การสะสมตัวของไนไตรท์เชื่อว่าเกิดจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) จากรายงานค่าความปลอดภัยของกึ่งกลางคำตัวเต็มวัย (adolescents) ของ Chen *et al*, 1990 รายงานว่าไม่ควรเกิน 10.60 mg NO_2^- -N /l ที่ความเค็ม 20 ppt ค่า pH = 7.57 และอุณหภูมิ 24.5 °C ส่วน Sprague, 1971 อ้างโดย ศิริวรรณ คิตประเสริฐ (2538) รายงานว่าค่าความเข้มข้นของไนไตรท์ที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำควรมีค่าเท่ากับ 0.3599 mg NO_2^- -N/l

พิษของไนเตรท (NO₃)

แอมโมเนียในน้ำอาจถูกเปลี่ยนให้เป็นไนเตรทได้ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ในสภาวะที่มีออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรท เกิดจากการใช้ไนเตรทโดย แพลงก์ตอนพืช การเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ โดยปกติแล้วไนเตรทจะไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ยกเว้น ในกรณีที่ความเข้มข้นสูงมาก ความเป็นพิษของไนเตรทต่ำมากเมื่อเทียบกับไนไตรท์และแอมโมเนีย ส่วนมากจึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับความเป็นพิษของไนเตรทในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตาม ไนเตรทอาจถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ โดยการรีดิวซ์ของแบคทีเรียซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ (ยง ยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และคณะ, 2532) ไนเตรทจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยทำให้สุขภาพของสัตว์น้ำ ไม่ดี เกิดความอ่อนแอ กินอาหารน้อยลง และมีโอกาสติดเชื้อได้ง่าย (Whitson *et al.*, 1993)

วรรณิภา เพ็ชรพักตร์ (2539) ได้สรุปผลไนเตรทต่อสัตว์น้ำไว้ดังนี้

<u>ระดับไนเตรท (mgNO₃-N/l)</u>	<u>คุณภาพน้ำ</u>
0 - 12.5	ดีมาก
12.5 – 25	ปานกลางควรเปลี่ยนน้ำบ้าง
25- 50	ไม่ดีเริ่มมีมลภาวะต้องมีการเปลี่ยนน้ำ
> 50	จำเป็นต้องเปลี่ยนน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

2. แนวเหตุผลและทฤษฎี

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสาหร่าย (essential element) สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) Macronutrient element (Macrometabolic element or Major element) เป็นธาตุที่สาหร่ายต้องการในปริมาณสูงมาก (ธาตุที่ประกอบเป็นน้ำหนักแห้งของสารประกอบอนินทรีย์ในสาหร่าย ตั้งแต่ร้อยละ 0.2-1) มีอยู่ 7 ธาตุ คือ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส กำมะถัน โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

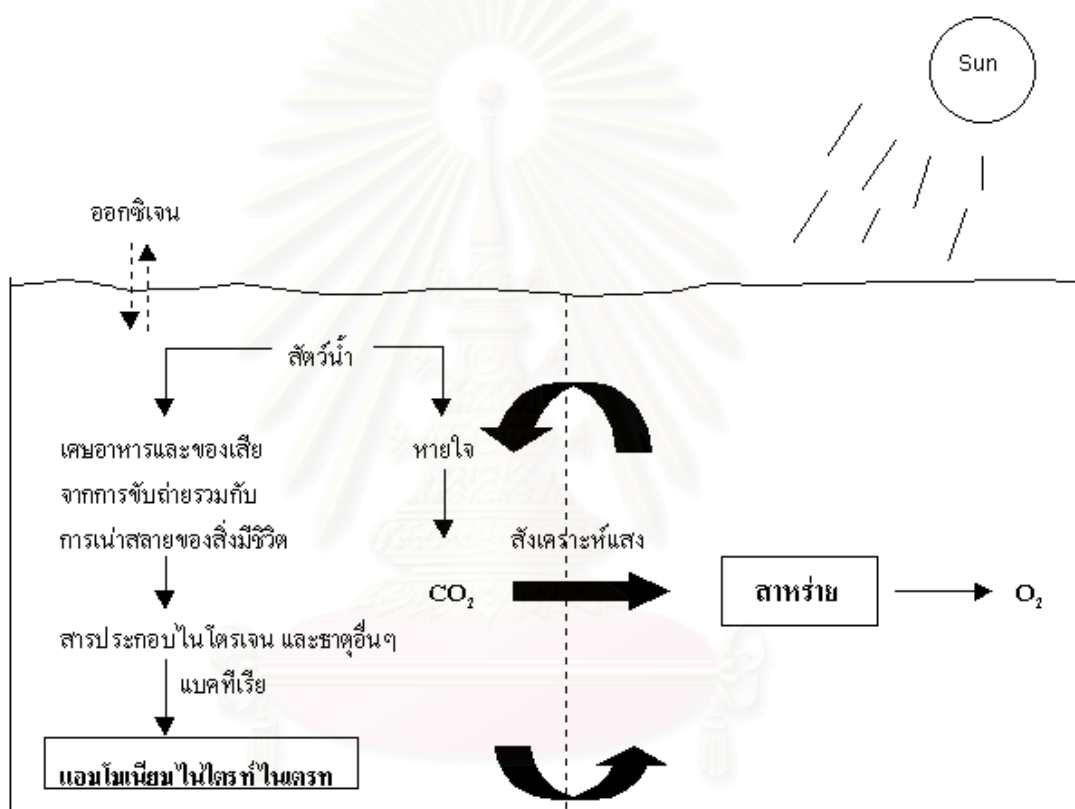
(2) Micronutrient element (Micrometabolic or Minor element or Trace element) เป็นธาตุที่สาหร่ายต้องการในปริมาณต่ำมาก แต่จะขาดไม่ได้ (ธาตุที่ประกอบเป็นน้ำหนักแห้งของสารประกอบอนินทรีย์ในสาหร่าย ต่ำกว่าร้อยละ 0.2-1) มีอยู่ 7 ธาตุ คือ เหล็ก แมงกานีส โบรอน ทองแดง สังกะสี โมลิบดีนัม และคลอรีน(เชวาร์น ชิโนรักษ์ และพรณี ชิโนรักษ์, 2528)

เนื่องจากน้ำที่จางจากกึ่งส่วนมากจะมีสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนละลายอยู่ประมาณ 70% ของน้ำที่จาง และสาหร่ายต้องการสารในโตรเจนในปริมาณที่สูงเช่นกัน เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างโปรตีน สารพันธุกรรม และที่สำคัญเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ และรงควัตถุอื่นๆ อีกบางชนิด นอกจากนั้นยังเป็นองค์ประกอบของฮอร์โมนพืชบางอย่างอีกด้วย (Meyer *et al.*, 1964 อ้างโดยเชวาน์ ชิโนริคย์ และพรณี ชิโนริคย์, 2528) ดังนั้นสารประกอบในโตรเจนที่เหลือตกค้างในน้ำที่จางจากการเลี้ยงกุ้งจึงเป็นปุ๋ยในโตรเจนอย่างดีสำหรับสาหร่าย

ปัจจุบันมีผู้นิยมนำสาหร่ายทะเลมาใช้ในการบำบัดคุณภาพน้ำที่จาง ตัวอย่างเช่น รายงานของ Neori and Shplgel (1999) ได้ใช้สาหร่ายทะเลชนิด *Ulva lactuca* และ *Gracilaria conferta* มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำก่อนปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยสาหร่ายจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำ เป็นวัตถุดิบในกระบวนการสังเคราะห์แสง และนำสารประกอบในโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ไนไตรท์ ไนเตรท และสารอาหารอื่นๆ เข้าสู่เซลล์เพื่อการเจริญเติบโต (ภาพที่ 2.1) พบว่าสาหร่ายสามารถใช้ในโตรเจนในรูปแบบของแอมโมเนียมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนไนเตรทเป็นสารประกอบที่พบในธรรมชาติน้อย ผลพลอยได้จากการบำบัดด้วยวิธีนี้คือ สาหร่ายที่เพิ่มจำนวนขึ้นในระบบบำบัดสามารถนำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ อีกทางหนึ่ง

ในประเทศไทยมีการทดลองเลี้ยงสาหร่ายผสมร่วมกับกึ่งกุลาคำในบ่อดินดังรายงานของ วิวรรณ สิงห์ทวีศักดิ์ และฐิติมา ทองศรีพงษ์ (2544) ได้ทดลองเลี้ยงสาหร่ายผสมในแผงตาข่ายพลาสติกขนาด 3 ตารางเมตร จำนวน 60 แผง รวม 90 กก. ร่วมกับกึ่งกุลาคำ ความยาวเฉลี่ย 1.01 ซม. น้ำหนักเฉลี่ย 0.0021 กรัม จำนวน 25,000 ตัว ในบ่อดินขนาด 800 ตารางเมตร จำนวน 4 บ่อ เป็นเวลา 22 สัปดาห์ เมื่อสิ้นสุดการทดลองปรากฏว่า สาหร่ายผสมนางทั้ง 4 บ่อ มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในสัปดาห์ที่ 4-12 และตั้งแต่สัปดาห์ที่ 14 ไปจนสิ้นสุดการทดลองสาหร่ายมีน้ำหนักลดลงเหลือ 69.17 , 10.25, 83.66 และ 40.70 กก. ตามลำดับ อาจเป็นเพราะปริมาณตะกอนที่สะสมในบ่อเริ่มมากขึ้น และตะกอนเหล่านี้ไปเกาะติดกับสาหร่ายแน่นมากทำความสะอาดออกยาก ส่วนกึ่งกุลาคำที่เลี้ยงเจริญเติบโตมีความยาวเฉลี่ย 18.115, 13.89, 14.00 และ 11.58 กรัม ได้ผลผลิตกึ่งทั้งหมด 137.0, 179.4, 42.3 และ 32.6 กก. ตามลำดับ และการศึกษาของ คณิต ไชยคำ และคูสิตตันวิไลย์ (2535) ได้ทดลองใช้หอยแมลงภู่และสาหร่ายผสมบำบัดน้ำที่จางจากบ่อเลี้ยงกึ่งกุลาคำแบบพัฒนา แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ชุดสาหร่ายผสมนาง ชุดหอยแมลงภู่ และชุดสาหร่ายผสมนางกับหอยแมลงภู่ ผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดน้ำที่จางด้วย

ชุดสาหร่ายผสมนางมีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในชั่วโมงที่ 48 ของการทดลองครั้งที่ 1 ลดลง 54.90% และการทดลองครั้งที่ 2 ลดลง 66.66% ส่วนการบำบัดน้ำทิ้งด้วยชุดหอยแมลงภู่ และชุดสาหร่ายผสมนางในชั่วโมงที่ 48 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ลดลง 55.25% และ 48.72% ตามลำดับ ในการทดลองครั้งที่ 2 ลดลง 98.73% และ 99.36% ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยใช้ สาหร่ายผสมนางและหอยแมลงภู่ สามารถลดค่ามลภาวะในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาได้ดี



บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนไนเตรตสูง) **บ่อเลี้ยงสาหร่าย** (ปริมาณแอมโมเนียมไนเตรตไนเตรตต่ำ)

ภาพที่ 2.1 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำและบ่อบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพโดยใช้สาหร่าย

ศิริวรรณ ทิดประเสริฐ (2538) ได้ทดลองใช้สาหร่ายทะเล *Caulerpa macrophysa*, *Sargassum polycystum* และ *Gracilaria salicornia* ช่วยลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง โดยแช่สาหร่ายความหนาแน่น 0 (ชุดควบคุม) 1, 5 และ 10 กรัม/ลิตร เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนเตรทได้มากที่สุดที่ความหนาแน่น 10 กรัม/ลิตร รองลงมาคือความหนาแน่น 5 และ 1 กรัม/ลิตร ตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาถึงอัตราการดูดซึมแอมโมเนียและไนเตรท พบว่ามีอัตราการดูดซึมสูงสุดที่ความหนาแน่น 1 กรัม/ลิตร รองลงมาคือ 5 และ 10 กรัม/ลิตร ตามลำดับ และการศึกษาของ เกรียงไกร แก้วสุรลิขิต (2537) ได้ทดลองใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* ช่วยลดปริมาณแอมโมเนียในไนเตรท ไนเตรท และฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ โดยเลี้ยงสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0 (ชุดควบคุม) , 0.25, 0.5 และ 1.0 กก./ตร.ม. ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการลดปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำได้มากที่สุดเมื่อใช้สาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.0 กก./ตร.ม. รองลงมาคือที่ความหนาแน่น 0.5 และ 0.25 กก./ตร.ม. ตามลำดับ สำหรับอัตราการดูดซึมสารอาหารดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียในไนเตรท ไนเตรท และฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่นำมาทดลอง

3. ปัจจัยจำกัด (limiting factors)

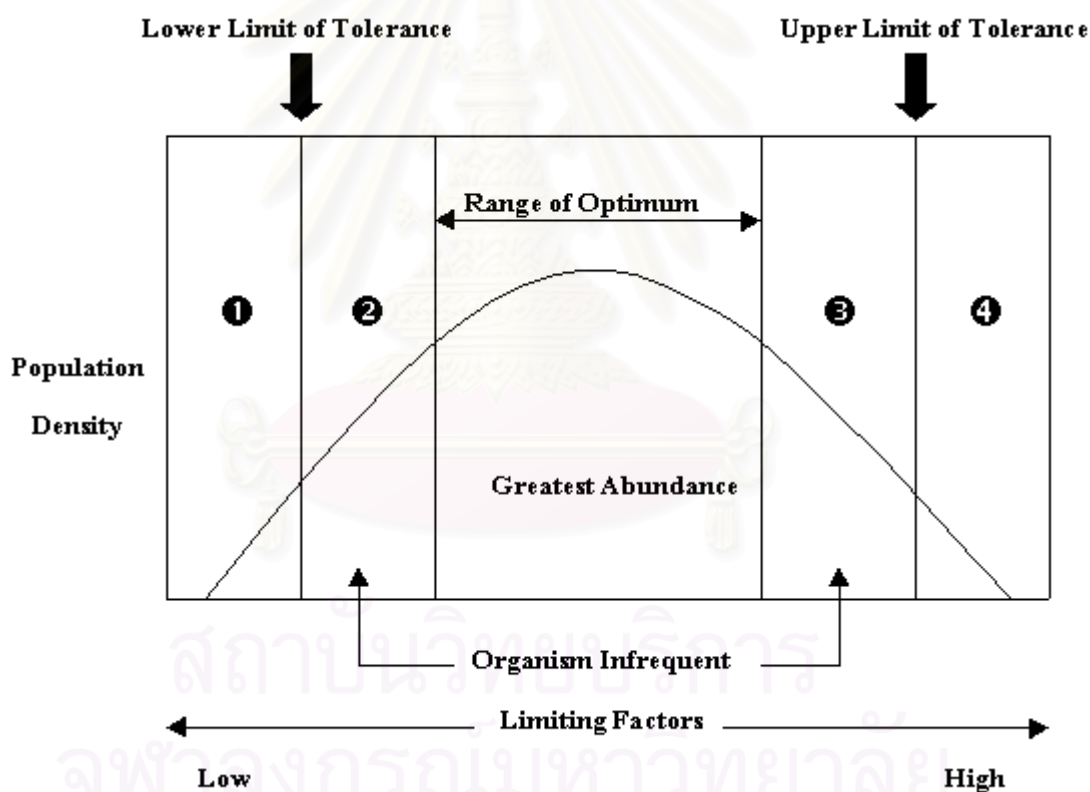
ปัจจัยจำกัด (limiting factors) ที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิต โดยเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต การดำรงชีวิต และการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แสง อุณหภูมิ pH ปริมาณออกซิเจน ตลอดจนปริมาณความเข้มข้นของแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น ซึ่งสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในการดำรงชีวิตแตกต่างกันไป

Law of the minimum and Law of tolerance

การศึกษาปัจจัยจำกัด โดยเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของพืช ได้ตั้งเป็นกฎขึ้นมาในปี ค.ศ. 1840 โดยนักอินทรีย์เคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus Von Liebig รายงานว่า ผลผลิตของพืชจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณของแร่ธาตุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งปัจจุบันคำกล่าวนี้ได้กลายมาเป็น “Liebig’s Law of the Minimum” โดยมีใจความว่า สิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องการแร่ธาตุและสภาวะแวดล้อมที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากัน แต่ค่าความต้องการนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดที่สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะดำรงชีวิตอยู่ได้ ซึ่งถ้าต่ำไปกว่านี้ก็จะทำให้สิ่งมีชีวิตนั้นตายไป เช่นพืชต่างชนิดกัน จะมีค่าความต้องการที่ต่ำสุดของแร่ธาตุต่างๆ ตลอดจนปัจจัย

ทางสิ่งแวดล้อมไม่เท่ากัน และถ้าพืชได้รับแร่ธาตุหรือปัจจัยจำกัดต่ำกว่าขีดต่ำสุดที่จะดำรงชีวิตได้ก็จะตายไป (Devlin and Barker, 1971)

ต่อมาพบว่าไม่เพียงแต่ปริมาณของธาตุอาหารหรือปัจจัยจำกัดในสภาพที่น้อยเกินไปเท่านั้นที่มีผลให้สิ่งมีชีวิตตาย เพราะจากการศึกษาของ V.E. Shelford ในช่วงปีค.ศ. 1910-1913 พบว่าปัจจัยจำกัดนี้ถ้ามีมากเกินไป ก็เป็นสาเหตุให้สิ่งมีชีวิตตายได้เช่นกัน ดังนั้นสิ่งมีชีวิตจึงมีชีวิตอยู่ในช่วงต่ำสุดและสูงที่สุดของแต่ละปัจจัยจำกัด ช่วงที่ดำรงชีวิตอยู่ได้นี้เรียกว่า “Limit of Tolerance” ในปีค.ศ. 1913 ได้กลายเป็นกฎ “Shelford’s Law of Tolerance” ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.2 จะเห็นว่า ความหนาแน่นของประชากรจะสูงสุดในช่วงที่ปัจจัยจำกัดอยู่ในช่วงกลางๆ หรือเหมาะสมที่สุด (optimum) ซึ่งค่าความเหมาะสมนี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของสิ่งมีชีวิต (นิศยา เลหาะจินดา, 2528)



ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยจำกัด และความหนาแน่นของประชากร (Odum, 1971 อ้างโดย นิศยา เลหาะจินดา, 2528)

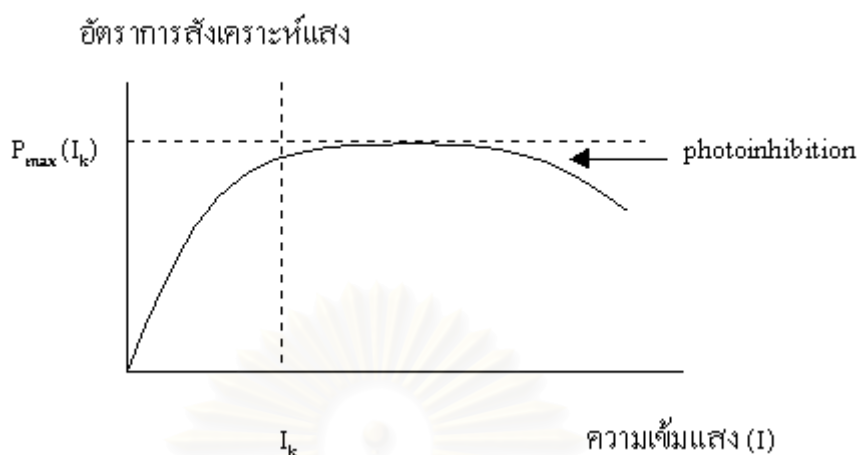
- หมายเหตุ :
- ❶ = Zone of Intolerance organism absent
 - ❷ = Zone of Physiological Stress
 - ❸ = Zone of Physiological Stress
 - ❹ = Zone of Intolerance organism absent

4. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย

4.1 ความเข้มแสง

เนื่องจากสาหร่ายส่วนใหญ่ได้พลังงานมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) โดยมีแสงเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการ ดังนั้นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจึงต้องมีความเข้าใจในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยมีระดับความเข้มแสงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เพราะเมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงก็จะทำให้สาหร่ายสามารถนำสารอาหารเข้าไปใช้ในเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Laponite and Duke (1984) ได้ทดลองวัดอัตราการเจริญและอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวชนิด *Gracilaria tikvahiae* ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงเดียวกันแต่มีความเข้มข้นของไนเตรทต่างกัน โดยพบว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณไนเตรทสูงกว่าจะมีอัตราการเจริญและอัตราการสังเคราะห์แสงสูง ส่วนชุดการทดลองที่ให้ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทเท่ากันแต่ให้ความเข้มแสงแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงมากกว่าจะมีอัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการเจริญของสาหร่ายสูงกว่าเช่นกัน ซึ่งแสดงว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทและระดับความเข้มแสงเป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญต่อการเจริญและการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ดังนั้นในการศึกษาเรื่องจลนพลศาสตร์ของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจึงต้องให้สาหร่ายได้รับแสงที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง

ตามปรกติอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเข้มแสงระดับหนึ่งที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงมีค่าคงที่ไม่เพิ่มสูงขึ้นอีกซึ่งเรียกว่าอยู่ในระดับความเข้มแสงที่อิ่มตัว (light saturation intensity) โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์แสงของพืชมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปไฮเปอร์โบลา เรียกว่า light saturation curve ซึ่งจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงนี้คือระดับความเข้มแสงที่ทำให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุด (P_{max}) โดยมีความแปรผันขึ้นกับชนิดของพืชและปัจจัยสภาพแวดล้อม (Devlin and Barker, 1971) ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ค่า P_{max} คือค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุด และที่ระดับความเข้มแสงสูงมากๆ อาจเกิดการยับยั้งการสังเคราะห์แสงขึ้นได้ (photoinhibition)

สมการการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืช



จากสมการข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อสาหร่ายมีการสังเคราะห์แสง จะมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมาภายนอกเซลล์ ดังนั้นการวัดอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนจากสาหร่าย (oxygen evolution) จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายซึ่งจะเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงสถานะทางสรีรวิทยาของสาหร่ายได้เป็นอย่างดี (Lobban and Harrison, 1994)

สาหร่ายแต่ละชนิดจะมีระดับความเข้มแสงซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์สาหร่ายจะต้องศึกษาถึงประสิทธิภาพของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ ก่อนเพื่อหาระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่นำมาศึกษา เพราะแสงเป็นปัจจัยจำกัด (limiting factors) ที่สำคัญในการสังเคราะห์แสงหากสาหร่ายที่นำมาทดลองได้รับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีการเจริญช้า ในขณะที่ความเข้มแสงสูงมากเกินไปก็อาจทำให้เกิดภาวะการยับยั้งการสังเคราะห์แสงเนื่องจากความเข้มแสงที่มากเกินไป

(photoinhibition) ซึ่งจะทำให้สูญเสียความสามารถในการสังเคราะห์แสงชั่วคราวและสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อได้รับความเข้มแสงที่เหมาะสม แต่สาหร่ายก็ต้องใช้เวลาในการปรับตัว (Robledo *et al.*, 1994)

จากการศึกษาของ Vonshak and Guy (1998) แสดงให้เห็นปัญหาที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* กลางแจ้ง คือการที่สาหร่ายได้รับความเข้มแสงที่สูงมากถึง $2100 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ในตอนเที่ยงวันเป็นผลให้เกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photoinhibition) ทำให้ผลผลิตของสาหร่ายที่เลี้ยงในบ่อกลางแจ้งลดลงได้ถึง 30% และพบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในบ่อที่มีแผ่นกรองแสง 25-30% สามารถให้ผลผลิตมากกว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงโดยตรง และการศึกษาของ พิรุณ วิสุทธิแพทย์ และจิระพรหม สุขศรี (2540) พบว่าสาหร่ายเกลียวทองจะให้ผลผลิตดีที่สุดเมื่อได้รับความเข้มแสงเฉลี่ย 153.5 กิโลลักซ์ (อุณหภูมิของสารอาหาร 23.7°C) แต่เมื่อให้สาหร่ายได้รับความเข้มแสงเฉลี่ย 307 กิโลลักซ์ (อุณหภูมิของสารอาหาร 27.5°C) เป็นผลให้เกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสงเนื่องจากความเข้มแสงที่มากเกินไป (photoinhibition) และ Qiang *et al.*, (1998) รายงานว่า *Spirulina platensis* ระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายคือที่ความเข้มแสง $2000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และพบแนวโน้มการเกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photoinhibition) เนื่องจากความเข้มแสงที่มากเกินไปเมื่อให้ความเข้มแสงมากกว่า $3500 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ขึ้นไป

พืชแต่ละชนิดจะมีจุดอิ่มตัว ของการสังเคราะห์แสง (photosynthesis saturation point) แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย ในแหล่งน้ำธรรมชาติแสงจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการแพร่กระจายของมหาสาหร่ายในเขตชายฝั่งทะเล จากการศึกษาของ Häder *et al.*, (1997) ได้วัดอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย *Caulerpa prolifera* จากปริมาณออกซิเจนที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง ที่ได้รับความเข้มแสงตามระดับความลึกต่างๆตั้งแต่ 5-25 เมตร ในทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายที่ระดับความลึก 5 เมตร มีอัตราการสังเคราะห์แสงมากที่สุดและเป็นระดับที่สามารถเกิด photoinhibition ได้บ่อยกว่าระดับความลึกอื่นเนื่องจากได้รับแสงแดดเต็มที่ในตอนเที่ยง และมักพบในสาหร่ายที่อยู่บริเวณน้ำตื้น เช่น สาหร่ายที่มักพบในเขตน้ำขึ้นน้ำลงพบว่าจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสง $400-600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และสาหร่ายที่อาศัยอยู่บริเวณเขตชายฝั่งน้ำตื้นระหว่างระดับความลึกน้ำลงต่ำสุดพบว่าจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสง $150-250 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และที่ระดับความลึกต่ำกว่าระดับน้ำลงต่ำสุดพบว่าจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่า $100 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Lüning, 1981 อ้างโดย Lobban and

Harrison, 1994) และการทดลองของ Sosa *et al.*, (1993) ในสาหร่ายสีแดงชนิด *Gelidium canariensis* ที่มักพบอยู่บริเวณเขตน้ำตื้น มีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ที่ pH 8.2 และอัตราการสังเคราะห์แสงจะมีค่าคงที่จนถึงระดับความเข้มแสง $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ โดยไม่พบแนวโน้มการเกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photoinhibition) ในขณะที่โคอะตอมที่เจริญอยู่ใต้น้ำแข็งพบว่ามีความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงเพียง $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และเกิด photoinhibition ขึ้นที่ระดับความเข้มแสง $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Palmisano *et al.*, 1985)

หน่วยของการวัดความเข้มแสงโดยการวัดปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis photon flux density: PPF) ความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 nm แสดงได้ในหน่วย $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ หรือ $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ แต่เนื่องจากความสัมพันธ์ของการวัดการส่องสว่าง การแผ่รังสี และหน่วยควอนตัมนั้น ไม่ได้สัมพันธ์กันโดยตรง ทำให้ไม่มีสูตรคำนวณที่จะใช้แปลงค่าหน่วยวัดความเข้มแสงจากหน่วยหนึ่งไปเป็นอีกหน่วยหนึ่งได้อย่างถูกต้อง การวัดความเข้มแสงจึงต้องอาศัยเครื่องมือที่สร้างมาเฉพาะกับหน่วยที่ต้องการวัดเท่านั้น แต่เนื่องจากเครื่องวัดแสงที่แสดงในหน่วย PPF นั้นมีราคาแพง ในขณะที่เครื่องวัดแสงในหน่วย lux มีราคาถูกกว่า (ประมาณ 2-3 พันบาท) และสามารถหาซื้อได้สะดวก (สรวิศ เผ่าทองสุข, 2543) ดังนั้นเครื่องวัดแสงแบบ lux meter จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับใช้งานทั่วไปในการเลี้ยงสาหร่าย ซึ่งไม่ต้องอาศัยความละเอียดมากนัก

4.2 ความเข้มข้นของสารอาหาร

ความเข้มข้นของสารอาหารในรูปของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเป็นปัจจัยจำกัด ที่สำคัญในสิ่งแวดล้อมของสาหร่ายในน้ำทะเล เพราะสาหร่ายต้องการสารประกอบไนโตรเจนในปริมาณมากเพื่อใช้ในการผลิตโปรตีน และเป็นตัวควบคุมการเจริญของสาหร่าย จากการศึกษาของ Pinchetti *et al.*, (1998) พบว่าสาหร่ายสีเขียวชนิด *Ulva rigida* ที่เลี้ยงในถังจะมีอัตราการเจริญลดลงและมีสีซีดขาว (bleaching) ในช่วงที่แหล่งน้ำขาดสารประกอบไนโตรเจน เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับสร้างสารสีของสาหร่าย และสาหร่ายสามารถสะสมสารประกอบไนโตรเจนไว้ในเซลล์ได้ เมื่อได้รับแสงและอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมสาหร่ายก็จะสังเคราะห์แสงโดยนำสารอาหารที่สะสมไว้ในเซลล์ออกมาใช้ไปเรื่อยๆ พร้อมกับนำสารอาหารที่อยู่ในน้ำเข้าสู่เซลล์เพื่อทดแทนส่วนที่ใช้ไป ดังนั้นหากแหล่งน้ำขาดสารประกอบไนโตรเจนก็จะส่งผลให้เซลล์สาหร่ายขาดสารประกอบไนโตรเจนสำหรับใช้ในเซลล์เช่นกัน เป็น

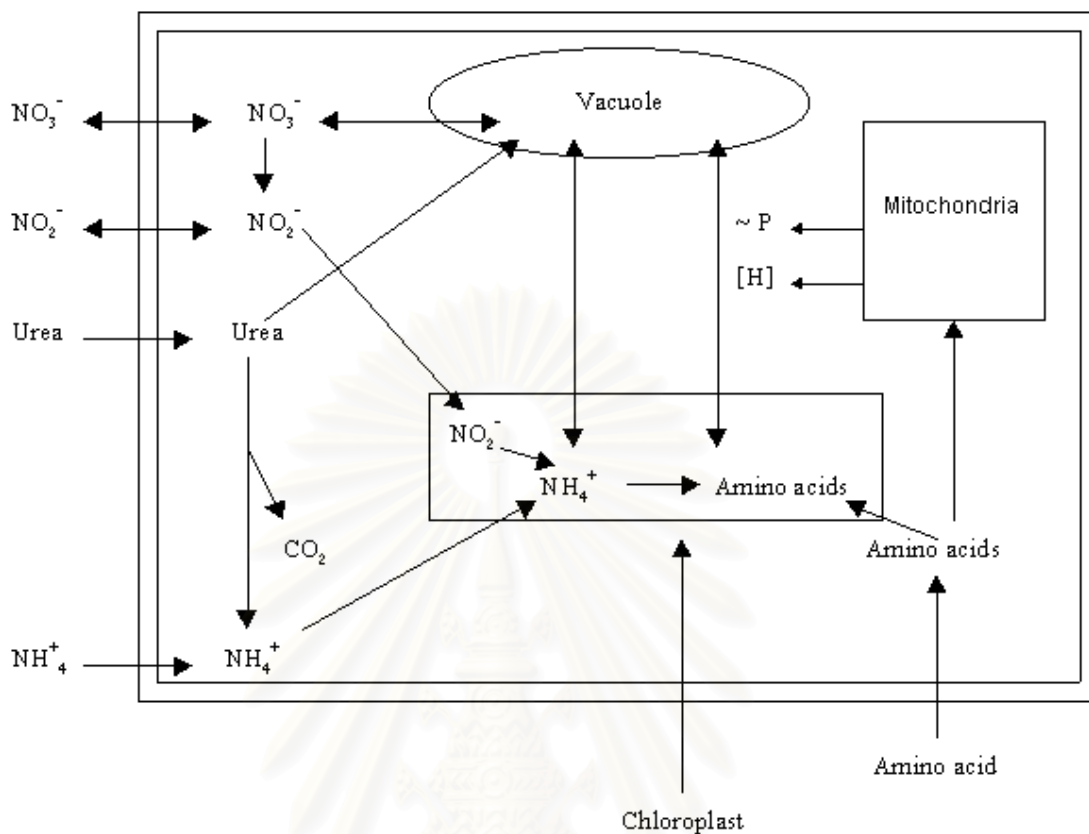
ผลให้สาหร่ายมีสีเขียว และอัตราการเจริญลดลง (Smit *et al.*, 1997) ความเข้มแสงและสารประกอบไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมอัตราการเจริญของสาหร่ายในสภาวะแวดล้อมทั่วไป (Kanwisher, 1966 อ้างโดย Laponite and Duke, 1984)

ประสิทธิภาพของการนำสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย นอกจากจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มแสงแล้ว ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารเหล่านั้นในน้ำก็เป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ที่มีผลต่อการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย Haines and Wheeler (1978) รายงานว่า อัตราการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสีแดงชนิด *Hypnea musciformis* และสาหร่ายสีน้ำตาลชนิด *Macrocystis pyrifera* ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรทในน้ำ โดยที่อัตราการนำเข้าจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรท ที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวเป็นผลให้อัตราการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่าคงที่ ผลการทดลองพบว่าสาหร่าย *H. musciformis* มีค่าการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สูงสุด $V_{max} = 2.85 \mu\text{g-at N/g(fw)/h}$ และอัตราการนำเข้าเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสูงสุด $K_m = 4.9 \mu\text{g-at N/l}$ แต่อัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่าย *H. musciformis* ไม่สามารถหาได้เพราะไม่พบจุดอิ่มตัวของการนำเข้าในช่วงที่ใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในการทดลองครั้งนี้ ส่วนในสาหร่าย *M. pyrifera* พบอัตราการนำเข้าของไนเตรทมีค่า $V_{max} = 3.05 \mu\text{g-at N/g(fw)/h}$; $K_m = 13.1 \mu\text{g-at N/l}$ และอัตราการนำแอมโมเนียมมีค่า $V_{max} = 2.38 \mu\text{g-at N/g(fw)/h}$; $K_m = 5.3 \mu\text{g-at N/l}$ โดยที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไม่มีผลยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย และความเข้มข้นของไนเตรทก็ไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิดเช่นกัน นอกจากนี้ Chapman *et al.*, (1978) ได้รายงานว่าปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย *Laminaria saccharina* จะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของไนเตรทที่เพิ่มขึ้นในอาหารเลี้ยงสาหร่าย โดยให้แสงที่ระดับความเข้มตั้งแต่ $0-200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และเลี้ยงไว้ในอาหารที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 0, 3, 10 และ $500 \mu\text{M}$ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่ $500 \mu\text{M}$ ทำให้สาหร่ายมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมามากที่สุด รองลงมาเป็นความเข้มข้นที่ 10, 3 และ 0 ตามลำดับ โดยมีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสงเดียวกันประมาณ $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และผลการทดลองนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ สามารถอธิบายได้ตามสมการเส้นโค้งของมิเคลลิส-เมนเทน โดยมีค่า $K_s = 1.4 \mu\text{M} [\text{NO}_3^-]$

Ahn et al., (1998) ได้ทดลองใช้สาหร่าย *Laminaria saccharina* และสาหร่าย *Nereocystis luetkeana* ลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรทในน้ำที่จากฟาร์มเลี้ยงปลาแซลมอน ผลการทดลองพบว่าอัตราเฉลี่ยของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่าย *L. saccharina* และ *N. luetkeana* มีค่าอยู่ระหว่าง 6.0-8.9 $\mu\text{mol/g(dw)/h}$ และ 6.6-9.3 $\mu\text{mol/g(dw)/h}$ ตามลำดับ ส่วนอัตราเฉลี่ยการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่าย *L. saccharina* และ *N. luetkeana* มีค่าอยู่ระหว่าง 4.6-10.6 $\mu\text{mol/g(dw)/h}$ และ 6.1-17.1 $\mu\text{mol/g(dw)/h}$ ตามลำดับ ซึ่งไม่พบการยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายเนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไม่พบการยับยั้งการนำแอมโมเนียมเนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรท

Cloern and DeBoer (1978) พบว่า แอมโมเนียมเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบไนโตรเจนของสาหร่าย *Cryptomonas ovata* เพราะสาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียมจนหมดก่อนจึงจะเปลี่ยนมาเลือกใช้ในเตรท และ *C. ovata* สามารถใช้แอมโมเนียมแทนสารประกอบไนโตรเจนที่จำเป็นตัวอื่นที่สาหร่ายไม่สามารถใช้ได้ในตอนกลางคืน และในที่น้ำลึกโดยเฉพาะไนเตรทนั้นจะต้องใช้แสงเป็นปัจจัยที่สำคัญ และ Neori and Shplgel (1999) รายงานว่าสาหร่าย *Ulva lactuca* และ *Gracilaria conferta* ทั้งสองชนิดสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมเป็นส่วนใหญ่ ในกรณีที่ไม่มีทั้งแอมโมเนียมและไนเตรทในน้ำ สาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียมจนหมดก่อนจึงจะใช้ไนเตรท เนื่องจากสาหร่ายสามารถนำแอมโมเนียมไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างกรดอะมิโนได้โดยตรง ในขณะที่การใช้ไนเตรทจะต้องเปลี่ยนไนเตรทให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อน เซลล์จึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นแอมโมเนียมจึงเป็นแหล่งปฐมภูมิของของสารประกอบไนโตรเจนของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่ (Lobban and Harrison, 1994) ดังแสดงในภาพที่ 2.4

สาหร่ายทะเลส่วนมากมีอัตราการนำสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้เร็วกว่าไนเตรท และจากการสำรวจพบว่าสาหร่ายทะเลประมาณร้อยละ 50 จะยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ถ้าในน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมสูง (DeBoer, 1981 อ้างโดย Lobban and Harrison, 1994) ตัวอย่าง เช่น การรายงานของ Elia and DeBoer (1978) พบว่าสาหร่ายสีแดงชนิด *Neogardhiella baileyi* และ *Gracilaria foliifera* จะเลือกใช้แอมโมเนียมก่อนที่จะใช้ในเตรทและพบว่าเกิดการยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิด เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมเท่ากับ 5 μM



ภาพที่ 2.4 แสดงการนำแอมโมเนียม (NH_4^+) ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรท (NO_3^-) เข้าไปใช้ในเซลล์ของสาหร่าย (Syrett, 1981 อ้างโดย Lobban and Harrison, 1994)

โดยทั่วไปสมการมิเคลลิส-เมนเทนจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาข้อมูลเชิงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอาหาร [S] กับอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย (V) โดยอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารอาหารจนถึงจุดอิ่มตัวที่อัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายมีค่าที่นั่นคืออัตราการนำเข้าจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอาหารมากกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการเส้นโค้งของมิเคลลิส-เมนเทน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 แต่การหาค่า V_{\max} และ K_m ที่ถูกต้องจะหาจากกราฟนี้ไม่ได้ เพราะเส้นโค้งที่ได้จากกราฟจะแสดงส่วนที่ V_0 ไม่เพิ่มเมื่อเพิ่ม $[S_0]$ ทำให้ได้ส่วนของกราฟที่มีความแบนราบเร็วเกินไป

$$V = \frac{V_{\max} \times [S]}{K_m + [S]} \quad \text{สมการมิเคลลิส-เมนเทน}$$

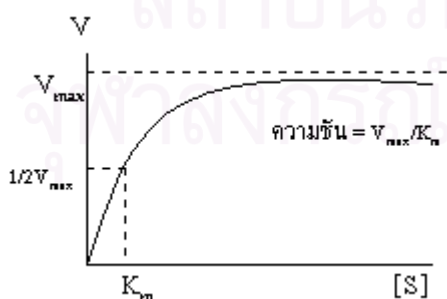
V คือ อัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์สำหรับ ; (mgN/g(fw)/hr)

V_{\max} คือ อัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์สำหรับสูงสุด ; (mgN/g(fw)/hr)

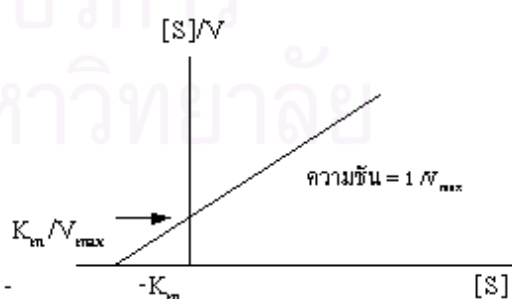
$[S]$ คือ ความเข้มข้นของสารอาหาร ; (mgN/l)

K_m คือ อัตราการนำสารอาหารที่เป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสู่สูงสุด หรือเรียกว่าค่าคงที่ของมิเคลลิส (Michaelis constant) ; (mgN/l)

ดังนั้นในการหาค่า V_{\max} และ K_m จึงนิยมนำมาแปลงให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงก่อน ในที่นี้ได้ใช้สมการของฮานส์โดยพลอตค่า $[S]$ กับ $[S]/V$ แล้วคำนวณหาค่า V_{\max} และ K_m ดังแสดงในภาพที่ 2.6 จากนั้นจึงนำค่าทั้งสองกลับมาเขียนในสมการของมิเคลลิส-เมนเทน แด่นอกเหนือไปจากสมการของฮานส์แล้ว สมการที่นิยมนำมาใช้มากก็คือสมการของไลน์ลีเวอร์-เบอร์ค ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[S]$ กับ $1/V$ แต่สมการนี้ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารอาหารขึ้นด้วยจำนวนที่เท่าๆ กัน เช่น 1, 2, 3, ..., 10 เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $1/[S]$ กับ $1/V$ จะได้จุดต่างๆ ที่รวมกันอยู่แถวบริเวณแกน $1/V_0$ เป็นส่วนมาก โดยมีจุดที่อยู่บริเวณที่มีค่า $1/[S_0]$ สูงๆ น้อยมาก ซึ่งจุดที่อยู่บริเวณ $1/[S_0]$ สูงๆ นี้จะมีความสำคัญอย่างมากในการกำหนดค่าความชันของเส้นตรงที่สร้างขึ้น ดังนั้นการสร้างกราฟฮานส์จะดีกว่ากราฟของไลน์ลีเวอร์-เบอร์ค ตรงที่ค่าความผิดพลาดของ $[S_0]/V_0$ ที่แสดงในกราฟ จะสะท้อนให้เห็นถึงความผิดพลาดของ V_0 อย่างแท้จริงไม่ว่าจะใช้ความเข้มข้นของสารอาหารต่ำหรือสูงก็ตาม (พัชรา วีระกะลัส, 2541)



ภาพที่ 2.5 กราฟเส้นโค้งมิเคลลิส-เมนเทน ระหว่างอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์กับความเข้มข้นของสารอาหาร



ภาพที่ 2.6 กราฟเส้นตรงของฮานส์ใช้หาค่า K_m และ V_{\max} (ดัดแปลงจาก Harrison, 1988)

จากเหตุผลข้างต้นสมการของฮานส์ จึงเป็นสมการเส้นตรงที่นิยมนำมาใช้ในการหาค่า V_{max} และ K_m เช่น การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Caulerpa cupressoides* (Williams, 1984) และ *Enteromorpha* sp. , *Osmundaria colensoi* (Taylor and Rees, 1999) *Fucus spiralis* (Topinka, 1978) และการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Prorocentrum micans* , *Chaetoceros lorenzianus* (Qi and Zhu, 1994) และ *Bibbulphia aurita* (Underhill, 1977) *Asterionella japonica* (Eppley and Thomas, 1969) *Macrocystis pyrifera* (Kopozak, 1994) นอกจากนี้ยังใช้ในการศึกษาการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Hypnea musciformis* และสาหร่ายสีน้ำตาลชนิด *Macrocystis pyrifera* (Haines and Wheeler, 1978) และสาหร่ายสีแดงชนิด *Gracilaria foliifera* และ *Neogardhiella baileyi* (Elia and DeBoer, 1978)

จากการศึกษาการใช้สาหร่ายบำบัดสารอาหารที่ผ่านมาในประเทศไทยยังไม่เคยมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงและจลนพลศาสตร์ของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของมหาสาหร่าย เมื่อให้สาหร่ายได้รับแสงที่จุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เนื่องจากในอดีตการศึกษาวิธีการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งทางชีวภาพโดยใช้สาหร่ายมักจะทดลองเพียงนำสาหร่ายลงแช่ในน้ำและตรวจวัดอัตราการลดลงของสารอาหารที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นเพียงระดับเดียว เช่นการศึกษาของ เกรียงไกร แก้วสุรลิขิต (2537) ใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* ลดปริมาณแอมโมเนียม ไนโตรที่ ไนเตรท และฟอสเฟต ในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ และการทดลองของ สุรวดี นาคชน, (2539) ได้ทดลองใช้จุลสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. ลดปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ซึ่งข้อมูลอัตราการลดลงไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณระบบบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอัตราการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรทในน้ำ และการศึกษาของ ศิริวรรณ คิประเสริฐ (2538) ได้ทดลองใช้สาหร่ายทะเล *Caulerpa macrophysa*, *Sargassum polycystum* และ *Gracilaria salicornia* ช่วยลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง ข้อมูลที่ได้นั้นไม่สามารถสรุปได้ว่าสาหร่ายชนิดใดสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรทได้ดีที่สุด เนื่องจากความสามารถในการลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารในน้ำ และอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของมหาสาหร่ายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำ และปัจจัยสำคัญของสิ่งแวดล้อม เช่น แสง อุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ (Lobban and Harrison, 1994) นอกจากนี้ กาญจนภาชน์ ลีวมนันต์ และคณะ (2536) ได้ทดลองแช่สาหร่ายวัน

ในน้ำทะเลปกติโดยมิได้เติมสารอาหาร ปรากฏว่าปริมาณสารอาหารถูกดูดซึมไปใช้ได้เพียงเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับสภาพของสาหร่ายและความเข้มข้นของสารอาหารที่แตกต่างกัน

ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณระบบบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจน โดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายชนิดต่างๆ ที่ทำการทดลองในสถานะเดียวกัน เพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกชนิดของสาหร่ายที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน และช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่และสนับสนุนการทำนากุ้งแบบพัฒนาอย่างยั่งยืน และลดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติได้อีกทางหนึ่ง

5. สาหร่าย (Algae)

สาหร่ายเป็นพืชที่อยู่ในพวก Thallophytes ที่โครงสร้างของพืชเหล่านี้ยังไม่ได้เปลี่ยนแปลงเป็น ลำต้น ราก และใบที่แท้จริง ดังนั้น จึงเรียกส่วนทั้งหมดของสาหร่ายว่า ทัลลัส (thallus) ส่วนใหญ่จะมีคลอโรฟิลล์ ดำรงชีวิตแบบ autotrophic ส่วนสาหร่ายบางชนิดที่ไม่มีคลอโรฟิลล์จะดำรงชีวิตแบบ heterotrophic ตามแต่สภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่ มีการสืบพันธุ์ทั้งแบบอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศ (อักษร ศรีเปล่ง, 2529)

5.1 สาหร่ายสีเขียว (Green Algae)

สาหร่ายสีเขียวเป็นสาหร่ายที่อยู่ใน Division Chlorophyta ซึ่งเป็น Division ที่ใหญ่ที่สุด และมีจำนวนสาหร่ายมากกว่า 450 สกุล และ 7,500 ชนิด สาหร่ายสีเขียวจะมีไพลินอยด์ในคลอโรพลาสต์ซึ่งเป็นศูนย์กลางในการสร้างแป้งในเซลล์ของสาหร่าย ส่วนประกอบของรงควัตถุเช่นเดียวกับที่พบในพืชชั้นสูง คือ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีน และแซนโทฟิลล์ สาหร่ายสีเขียวพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และในทะเล ขนาดมีตั้งแต่เล็กมากซึ่งมักอยู่ในลักษณะเป็นแพลงก์ตอน ประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว ไปจนถึงขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นต้นหรือทัลลัส มักมีที่ยึดเกาะ การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction) อาจเป็นแบบ isogamy หรือ heterogamy ก็ได้ ส่วนการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual reproduction) อาจจะเป็นแบบ

การแบ่งเซลล์ (cell division) หรือ fragmentation หรืออาจจะสร้างสปอร์ (Abbott and Dawson, 1978)

สาหร่ายสีเขียวได้ชื่อว่าเป็นผู้ผลิตเริ่มต้น (Primary producer) ที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ ปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์โปรตีนและสารอาหารที่สำคัญจากสาหร่ายเซลล์เดียวหลายชนิด เช่น *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. ซึ่งมีประโยชน์ต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม สาหร่ายสีเขียวที่อยู่ในน้ำทะเลร่วมกับสาหร่ายสีแดง สามารถผลิตเกลือแคลเซียมออกมาก่อให้เกิดหินโสโครกในเวลาเป็นพันๆ ปี (อักษร ศรีเปล่ง, 2529) ปัจจุบันมีผู้นิยมนำสาหร่ายสีเขียวบางชนิดมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณสารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงซึ่งประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด เช่น ที่บรจจฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้ใช้สาหร่ายสีเขียวชนิด *Caulerpa lentillifera* หรือสาหร่ายช่อพริกไทย มาเลี้ยงเพื่อใช้ปรับคุณภาพน้ำทะเลก่อนนำมาใช้เลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้ง ผลผลิตของสาหร่ายที่ได้ยังสามารถนำไปใช้เป็นอาหารเลี้ยงหอยเป่าอื้อ และสามารถได้รับประทานได้

5.1.1 สาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* J. Agardh

Division : Chlorophyta

Class : Chlorophyceae

Order : Caulerpales

Family : Caulerpaceae

Genus : *Caulerpa*

สาหร่ายใน Order Caulerpales มีลักษณะเป็นหลอดหรือเป็นท่อ (siphonous form) ที่ไม่มีผนังเซลล์มาปิดกั้น นอกจากในระยะสืบพันธุ์จึงจะมีผนัง (septum) มาปิดกั้นเพื่อสร้างแกมมีแทนเจียม มีรงควัตถุพวกแซนโทฟิลล์แตกต่างไปจากพวกอื่นๆ คือมี siphonoin และ siphonaxanthin (กาญจนภาชน์ ลีวมโนมนต์, 2527)

สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* มักพบขึ้นอยู่บนก้อนหินหรือพื้นทราย ที่น้ำตื้นๆ ใกล้แนวปะการัง ทั่วลึศประกอบด้วยสโตรลอนที่ก๊ิบคลานไปตามพื้นและแตกแขนงได้ ส่วนของ

แขนงที่ตั้งตรงสูง 1-6 ซม. มักเกิดเดี่ยวๆ ไม่ค่อยแตกแขนง ประกอบด้วยรามูลัสเล็กๆ ลักษณะกลมๆ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-2 มม. มีก้านสั้นๆ เรียงกันคล้ายช่อพริกไทย แต่รามูลัสมีรอยคอดระหว่างก้านและส่วนที่เป็นเม็ดกลมสีเขียวใส (Lewmanomont and Ogawa, 1995)

5.2 สาหร่ายสีแดง (Red algae)

สาหร่ายสีแดงมักพบปัญหาในการจำแนกชนิดเนื่องจากสีของสาหร่ายที่ปรากฏจะมีสีแดงสดบ้าง แดงคล้ำบ้างจนถึงเกือบเป็นสีม่วง หรือน้ำตาล เพราะมีรงควัตถุหลายชนิด คือ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ ดี แคลโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน สำหรับไฟโคบิลินจะประกอบไปด้วยรงควัตถุสีแดงของ phycoerythrin และสีน้ำเงินของ phycocyanin การที่สาหร่ายมีสีต่างๆ ก็เนื่องมาจากสัดส่วนของรงควัตถุเหล่านี้ (Abbott and Dawson, 1978) ทัลลัสของสาหร่ายประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ ทำให้มีรูปร่างต่างๆ กัน เช่น รูปทรงกระบอก แตกกิ่งก้านคล้ายขนนก มีสารพวกแคลเซียมมาพอกแทนปลายทัลลัสแตกเป็น dichotomous และมีลักษณะเป็นแผ่นหรือคล้ายริบบิ้น ส่วนการสืบพันธุ์มีความสลับซับซ้อนมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่นๆ การสืบพันธุ์มีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ แต่ส่วนมากจะเป็นการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ สาหร่ายสีแดงบางชนิดใช้เลี้ยงสัตว์ เช่น Rhodymenia บางชนิดเป็นอาหารของคน เช่น *Chondrus crispus* บางชนิดที่มีเจลลาตินมากนำมาสกัดทำเยลลี่ได้ ดังนั้นสาหร่ายสีแดงจึงเป็นสาหร่ายที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่ง (อักษร ศรีเปล่ง, 2529) นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งได้อีกทางหนึ่ง

5.2.1 สาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* (Vahl) Børesen

Division : Rhodophyta

Class : Rhodophyceae

Subclass : Florideophycidae

Order : Ceramiales

Family : Rhodomelaceae

Genus : *Acanthophora*

สาหร่ายกรอบครีว Rhodomelaceae เป็นกรอบครีวที่ใหญ่ที่สุดของสาหร่ายสีแดง มีทั้งหมดกว่า 100 สกุล ทัลลัสมีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์หลายแถว โดยมีเซลล์กลาง (central cell) 1 เซลล์ และเซลล์ล้อมรอบ (pericentral cell) มีจำนวนแตกต่างกันสุดแต่สกุลและชนิด สาหร่ายกรอบครีวนี้มี ทริโค بلاสต์ (trichoblast) ซึ่งเป็นเส้นสายธรรมดา หรือแตกแขนงได้ เกิดที่ปลายยอดของทัลลัส หรือปลายแขนงย่อย (กาญจนภรณ์ ลีวมนนต์, 2527)

ลักษณะของสาหร่าย *Acanthophora spicifera* คือ ทัลลัสอวบน้ำ แตกแขนงเป็นพุ่มสูง 15 เซนติเมตร รากยึดเกาะขนาดเล็กรูปถ้วย แขนงรูปทรงกระบอก มีแขนงย่อยปลายแหลมอยู่รวมเป็นกลุ่มๆ เกิดอยู่ทั่วไปโดยเรียงกันห่างๆ หรือแน่น สุดแต่สภาพแวดล้อม ทัลลัสสีน้ำตาลอ่อนหรือน้ำตาลเข้ม ถ้าอยู่ในที่แดดจัดจะมีสีเหลือง ถ้าแสงน้อยมีร่มเงาจะมีสีชมพู ขึ้นได้ทั่วไปในทุกสภาวะ ตั้งแต่พื้น โคลน พื้นทรายและพื้นหิน ในเขตน้ำขึ้นน้ำลง เป็นสาหร่ายที่พบเสมอในอ่าวไทย (Lewmanomont and Ogawa, 1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

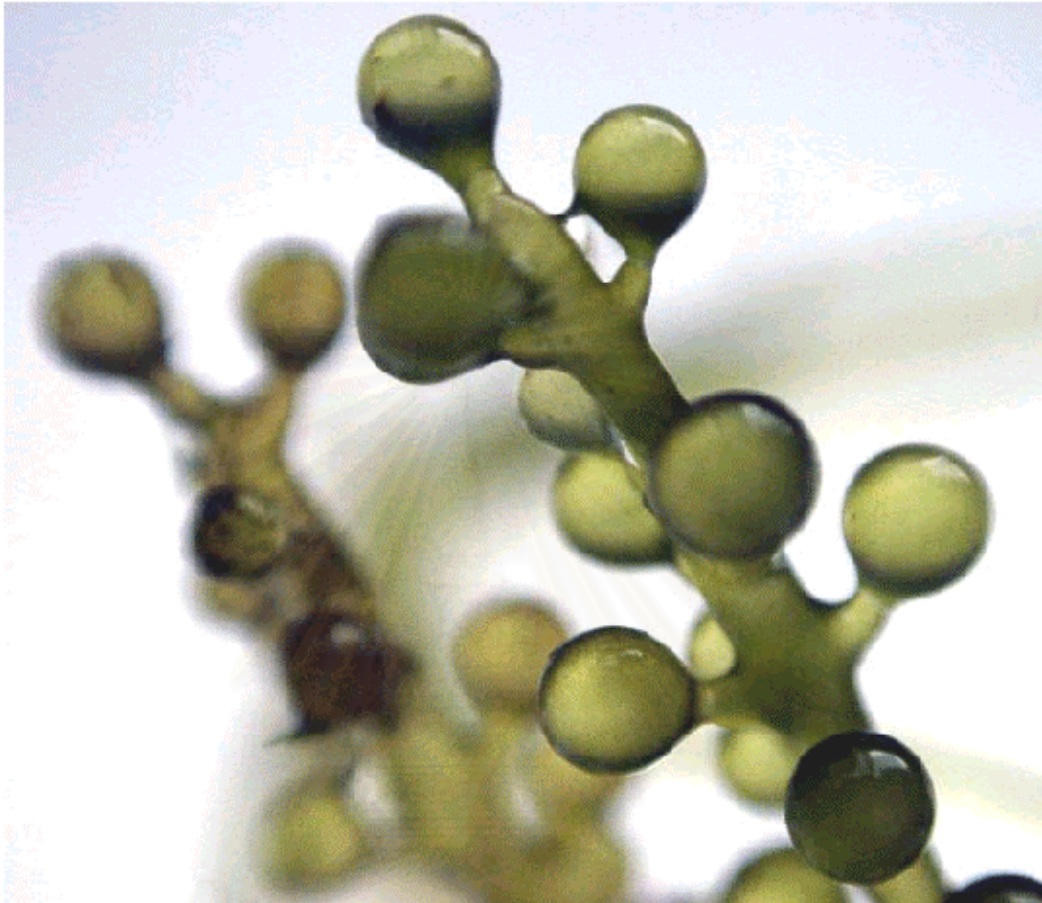
อุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

สาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง

ทำการรวบรวมสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera* แสดงในภาพที่ 3.1) และสาหร่ายหนาม (สาหร่ายหางม้า, สาหร่ายเหงือกปลา; *Acanthophora spicifera* แสดงในภาพที่ 3.2) จากบ่อบำบัดน้ำทิ้งสำหรับเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กึ่งกุลาคำที่บรรจงฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา มาพักในถังไฟเบอร์กลาสที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt และเติมอาหารเหลวสูตรดัดแปลงจากสูตรของกิลลาร์ด (F/2 medium : สูตรอาหารแสดงในภาคผนวก) โดยเลี้ยงไว้กลางแจ้งภายใต้อุณหภูมิและแสงธรรมชาติ (27-34 °C) เพื่อให้เซลล์สาหร่ายได้ปรับสภาพและใช้เป็น stock culture การทดลองทำในห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ภูมิภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองมีขั้นตอนโดยสรุปแบ่งเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในห้องปฏิบัติการ ณ ระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในส่วนที่ 1
3. ศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในห้องปฏิบัติการ
4. ศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกึ่งกุลาคำในสภาพแสงธรรมชาติเปรียบเทียบกับการให้แสงคงที่ตลอดการทดลองในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 3.1 สาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.2 สาหร่ายหนาม หรือสาหร่ายหางม้า (*Acanthopora spicifera*)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

การวัดอัตราการสังเคราะห์แสงในห้องปฏิบัติการ

วิธีวัดอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย มีหลักการคือ วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (oxygen evolution) เมื่อให้สาหร่ายได้รับแสงที่ความเข้มระดับต่างๆ กัน (อุณหภูมิ $29 \pm 1^{\circ}\text{C}$) โดยใช้อุปกรณ์ที่แสดงในภาพที่ 3.3 การทดลองมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

(1) ชั่งน้ำหนักเปียกสาหร่ายประมาณ 20 กรัม ใส่ในภาชนะสำหรับวัดอัตราการสังเคราะห์แสง (photosynthesis chamber) ที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt เติมอาหารตามสูตรของกิลลาร์ด (F/2 medium) และผ่านการฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ (autoclave) ปริมาตร 700 มิลลิลิตร เติม NaHCO_3 0.05 กรัม

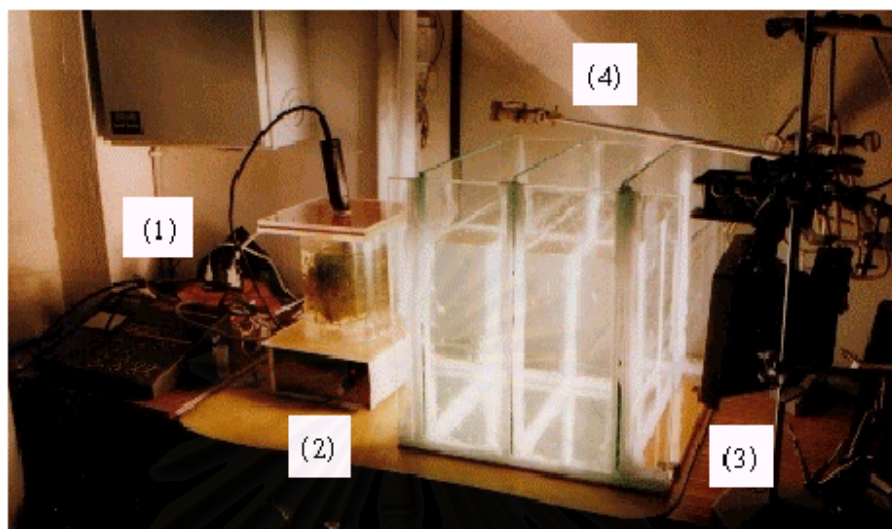
(2) ตั้งระดับความเข้มแสงต่างๆ จากโคมไฟฮาโลเจนกำลัง 500 วัตต์ หรือ 1000 วัตต์ โดยใช้แผ่นกรองแสง (neutral density filter) กันระหว่างหลอดไฟกับภาชนะสังเคราะห์แสงซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถปรับระดับความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 3,000 - 50,000 ลักซ์

(3) ใช้พลาสติกดำคลุมภาชนะสำหรับวัดอัตราการสังเคราะห์แสงทิ้งไว้ในที่มืดประมาณ 15 นาที เก็บข้อมูลการหายใจ (respiration) ของสาหร่ายโดยวัดจากปริมาณออกซิเจนที่ลดลงในน้ำจากเครื่องมือ HANNA HI964400 microprocessor logging D.O. meter ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

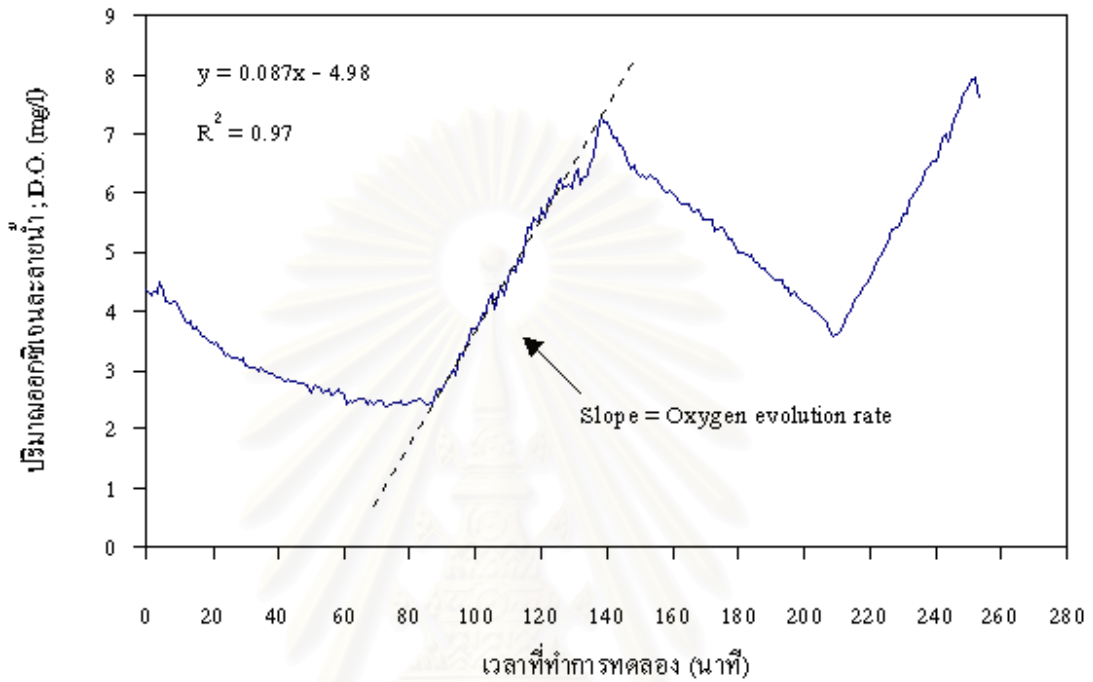
(4) เปิดแสงจากโคมไฟ แล้วเริ่มวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลาประมาณ 20 นาที

(5) คำนวณหาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่าย (oxygen evolution rate) ตามระดับความเข้มแสงที่ได้ปรับไว้ ทำการทดลองซ้ำที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน

การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายจากกระบวนการสังเคราะห์แสงทำได้โดยการสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มแสงที่สาหร่ายได้รับกับอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายที่ความเข้มแสงนั้นๆ ภาพที่ 3.4 แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายหนาม (*A. spicifera*) ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง



ภาพที่ 3.3 เครื่องมือ HANNA HI964400 microprocessor logging D.O. meter [1] ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากการสังเคราะห์แสง (photosynthesis oxygen evolution) เมื่อสาหร่ายได้รับความเข้มแสงที่ระดับต่างๆ กัน โดยจุ่มหัววัดลงในภาชนะสำหรับวัดอัตราการสังเคราะห์แสง (photosynthesis chamber) [2] ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 14 เซนติเมตร บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 700 มิลลิลิตร และใส่สาหร่ายประมาณ 20 กรัม ภายในภาชนะมีแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) หมุนกวนให้น้ำมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ให้แสงจากโคมฮาโลเจน [3] โดยมีฉนวนน้ำทำด้วยตู้กระจกบรรจุน้ำ [4] เพื่อป้องกันความร้อนและใช้แผ่นกรองแสง (neutral density filters) กั้นระหว่างหลอดไฟกับภาชนะสังเคราะห์แสง เพื่อปรับให้มีระดับความเข้มแสงต่างๆ ตั้งแต่ 3,000 - 50,000 ลักซ์ ก่อนเริ่มทำการทดลองใส่โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ประมาณ 0.05 กรัม ในภาชนะสำหรับวัดอัตราการสังเคราะห์แสงปิดแสงทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อปรับสภาพเซลล์สาหร่ายและเก็บข้อมูลการหายใจของสาหร่ายโดยวัดจากปริมาณออกซิเจนที่ลดลงในน้ำ จากนั้นจึงเปิดแสงจากโคมไฟ แล้วเริ่มวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทุกๆ 1 นาที เป็นเวลาประมาณ 20 นาที ในแต่ละระดับความเข้มแสง แล้วทำการทดลองซ้ำที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน

Oxygen evolution rate of *Acanthophora spicifera*

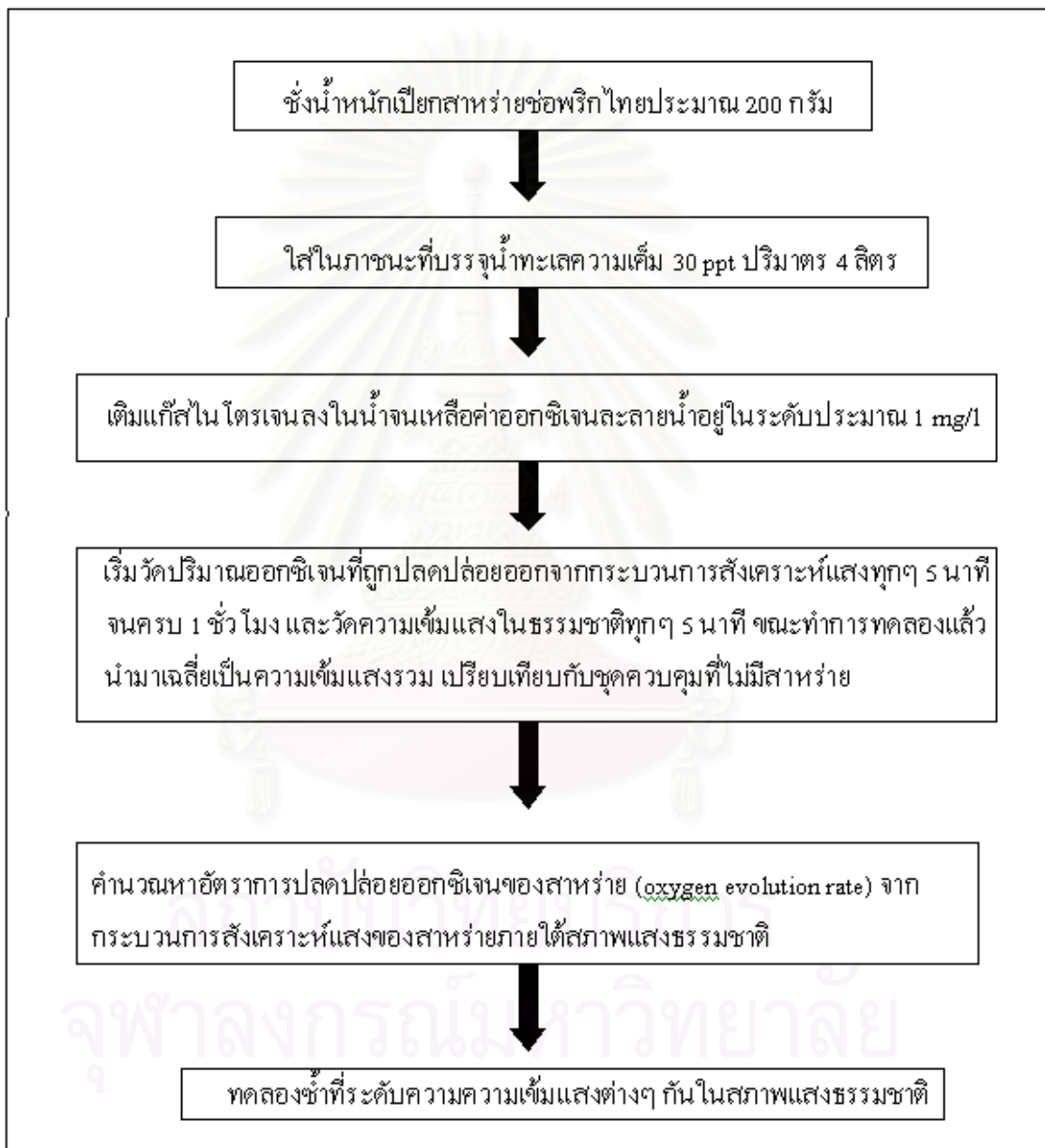
ภาพที่ 3.4 กราฟตัวอย่างแสดงผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) ในห้องปฏิบัติการ โดยวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis oxygen evolution) ในช่วงนาทีที่ 0-80 และ 140-210 ทำการปิดแสง ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเนื่องจากการหายใจ (respiration) ของสาหร่าย ส่วนในระหว่างนาทีที่ 80-140 และ 210-240 ทำการปิดแสงจากโคมฮาโลเจน สาหร่ายจะปลดปล่อยออกซิเจนออกมา ซึ่งความชันของเส้นกราฟที่ได้จากช่วงนี้จะนำมาคำนวณค่า oxygen evolution โดยวิธีสหสัมพันธ์ถดถอย (regression analysis) ดังวิธีที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1.

ตารางที่ 3.1 วิธีการคำนวณหาปริมาณออกซิเจนในน้ำที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis oxygen evolution rate) ; น้ำหนักสาหร่าย 21.05 กรัม ปริมาตรน้ำในภาชนะ 0.7 ลิตร

เวลา (นาท)	ความเข้มแสง (ลักซ์)	กราฟความสัมพันธ์สมการเส้นตรงรีเกรซชันและค่าสัมประสิทธิ์รีเกรซชัน ; R^2	อัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำ ($\text{mgO}_2/\text{l}/\text{min}$)	ปริมาณ ออกซิเจน ใน น้ำ ที่สาหร่ายปลดปล่อยออกมา (oxygen evolution rate) ($\mu\text{gO}_2/\text{g}(\text{fw})/\text{hr}$)
0 - 60	0	$Y = -0.031X + 4.22$ $R^2 = 0.93$	-	-
80-120	20000	$Y = 0.087X - 4.98$ $R^2 = 0.97$	0.087	$(0.08 \times 0.7) / (21.05 \times 60 \times 1000)$ = 174.45
151-196	0	$Y = -0.045X + 13.19$ $R^2 = 0.99$	-	-
216-240	24800	$Y = 0.099X - 17.37$ $R^2 = 0.99$	0.099	$(0.099 \times 0.7) / (21.05 \times 60 \times 1000)$ = 199.38

นอกจากการทดลองวัดอัตราการสังเคราะห์แสงในห้องปฏิบัติการ ยังได้มีการทดลองหาประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ ตั้งแต่ 0 - 65,000 ลักซ์ ทำโดยการวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis oxygen evolution) ของสาหร่ายช่อพริกไทย น้ำหนักเปียก 200 กรัม ในภาชนะที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 4 ลิตร ทำการเติมแก๊สไนโตรเจนจากถังไนโตรเจน ลงในน้ำเพื่อไล่ออกซิเจนที่ละลายในน้ำออกจนเหลือค่าอยู่ในระดับประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงเริ่มวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการสังเคราะห์แสงทุกๆ 5 นาทีจนครบ 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องมือ HANNA HI964400 microprocessor logging D.O. meter เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย และวัดความเข้มแสงจากเครื่อง LX-50 lux meter ทุกๆ 5 นาทีในขณะที่ทำการทดลองแล้วนำมาเฉลี่ยเป็นค่าความเข้มแสงทำการทดลองซ้ำที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กันในสภาพแสงธรรมชาติ (ภาพที่ 3.5 แสดงแผนภาพการทดลอง) การคำนวณหาอัตรา

การปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายจากกระบวนการสังเคราะห์แสงทำโดยการสร้างกราฟเช่นเดียวกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 3.1.)



ภาพที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ

3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 - 100 mg-N/l ที่สาหร่ายสามารถนำเข้าสู่เซลล์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอัตราสูงสุดของการนำแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่าย (V_{\max}) และหาความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทที่ทำให้อัตราการนำแอมโมเนียมและไนเตรทเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสู่สูงสุด (K_m) ของสาหร่าย การศึกษาข้อมูลเชิงจลนพลศาสตร์ อาศัยสมการเส้นโค้งของมิเคลิส-เมนเทน (Michaelis-Menten) ซึ่งมักจะนิยมนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงก่อนเพื่อคำนวณหาค่า V_{\max} และ K_m โดยในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกใช้สมการเส้นตรงของฮานส์ (Hanes- Plot) โดยพลอตค่าความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของสารอาหารต่ออัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย [S]/V แล้วคำนวณหาค่า V_{\max} และ K_m จากกราฟเส้นตรงนี้ จากนั้นจึงนำค่าทั้งสองกลับมาเขียนในสมการของมิเคลิส-เมนเทน อีกครั้ง

การเตรียมการทดลอง

(1) การเตรียมน้ำทะเลให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทระดับต่างๆ

นำน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt มาต้มฆ่าเชื้อเพื่อเตรียมเป็น stock solution โดยใส่ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 9.433 กรัมต่อลิตร (2000 mg-N/l) เพื่อเป็น stock ของแอมโมเนียม และเตรียม stock ไนเตรทโดยอบ KNO_3 ที่อุณหภูมิ 110°C 24 ชั่วโมง และชั่งมา 14.436 กรัมต่อลิตร (2000 mg-N/l) จากนั้นเตรียมน้ำทะเลที่กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร แล้วนำน้ำที่ผ่านการกรองมาเตรียมให้ได้ตามความเข้มข้นที่ต้องการ โดยนำ stock solution มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นระดับต่างๆ เริ่มตั้งแต่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 mg-N/l

(2) การเตรียมสาหร่ายในการทดลองและการเก็บตัวอย่างน้ำ

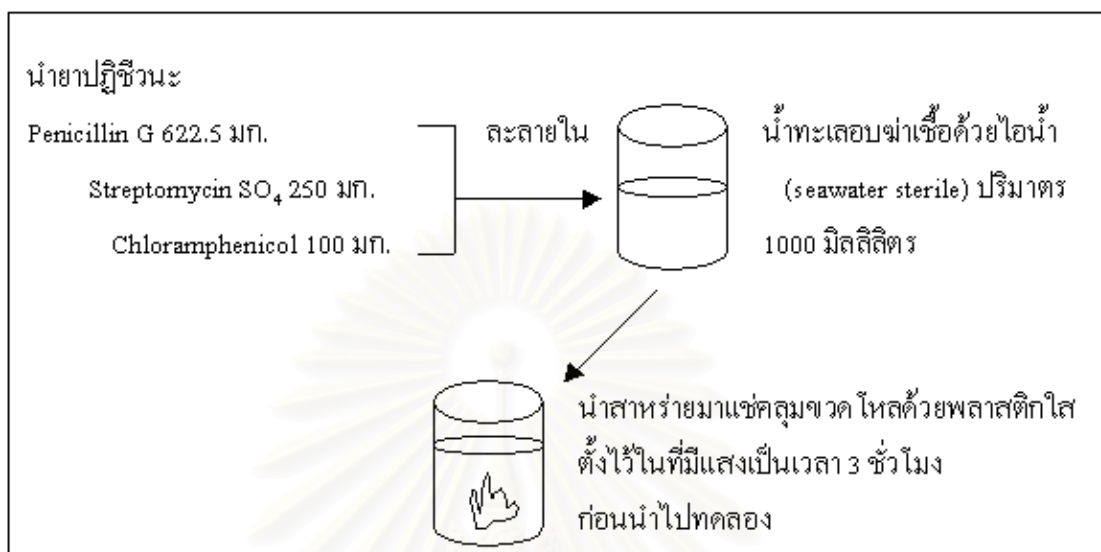
นำสาหร่ายน้ำหนักเปียกประมาณ 30 กรัม ใส่ในขวดโหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 17 เซนติเมตร ที่มีน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร มีความเข้มข้นของสารอาหารระดับต่างๆที่เตรียมไว้ ให้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ เท่ากันทุกการทดลอง เก็บตัวอย่างน้ำก่อนทำการทดลองและภายหลังจากนำสาหร่ายลงแช่นาน 6 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างน้ำครั้งละ 25 มิลลิลิตร วัดค่าความเค็ม และอุณหภูมิก่อนทำการทดลอง และสิ้นสุดการทดลอง

(3) วิธีการเก็บรักษาและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตามปกติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหาปริมาณแอมโมเนียมควรใช้น้ำตัวอย่างที่เก็บมาใหม่ๆ แต่ถ้าจะเก็บตัวอย่างน้ำไว้วิเคราะห์ภายหลังให้เติมกรดกำมะถันเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 0.8 มล. ต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร แล้วนำไปแช่เย็น เมื่อจะนำไปวิเคราะห์ควรปรับพีเอช (pH) ให้เป็นกลางเสียก่อน ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหาปริมาณไนเตรทควรวิเคราะห์ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่าง ถ้าจำเป็นต้องเก็บรักษาไว้ก่อนให้นำตัวอย่างน้ำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ ซึ่งจะเก็บรักษาได้เพียง 24 ชม. แต่ถ้าจะเก็บไว้นานกว่า 24 ชม. ต้องเติมกรดซัลฟูริก 2 มล. ต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตรและแช่เย็นที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ (Strickland and Parson, 1972) จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณแอมโมเนียม-ไนโตรเจน (NH_4^+-N) ไนไตรท์-ไนโตรเจน (NO_2^-N) และไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3^-N) วิเคราะห์โดยใช้วิธีของ Strickland and Parson (1972)

(4) วิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะ (antibiotic)

เนื่องจากน้ำและสาหร่ายมีแบคทีเรียอยู่ตามธรรมชาติซึ่งแบคทีเรียบางชนิดจะสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียมให้อยู่ในรูปของ ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ตามลำดับ ด้วยกระบวนการ nitrification เป็นผลให้ผลการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายคลาดเคลื่อนได้ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย โดยวิธีการดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แผนภาพแสดงวิธีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะ (Druehl and Hsiao, 1969 อ้างโดย Stein, 1971)

3.1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

การทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม มีวิธีดำเนินการดังนี้

3.2.1.1 การศึกษาผลของแบคทีเรียต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย

แอมโมเนียมที่อยู่ในน้ำนอกจากจะถูกสาหร่ายดูดซึมไปใช้เป็นสารอาหารโดยตรงแล้ว บางส่วนยังถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนคือ ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ตามลำดับด้วยกระบวนการ nitrification การทดลองช่วงที่ 1 จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทะเลและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายต่ออัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1** นำสาหร่ายช่อพริกไทยประมาณ 30 กรัม ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะ (antibiotic) ตามวิธีดังภาพที่ 3.6. หลังจากนั้นนำลงแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mg-N/l ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์
- ชุดการทดลองที่ 2** นำสาหร่ายช่อพริกไทยประมาณ 30 กรัม โดยไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งที่ติดมากับสาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำลงแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mg-N/l ให้แสงที่ความเข้ม 15000 ลักซ์
- ชุดการทดลองที่ 3** นำสาหร่ายช่อพริกไทยประมาณ 30 กรัม โดยไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งที่ติดมากับสาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำลงแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mg-N/l ไม่ให้แสงโดยคลุมขวดโหลด้วยพลาสติกดำ

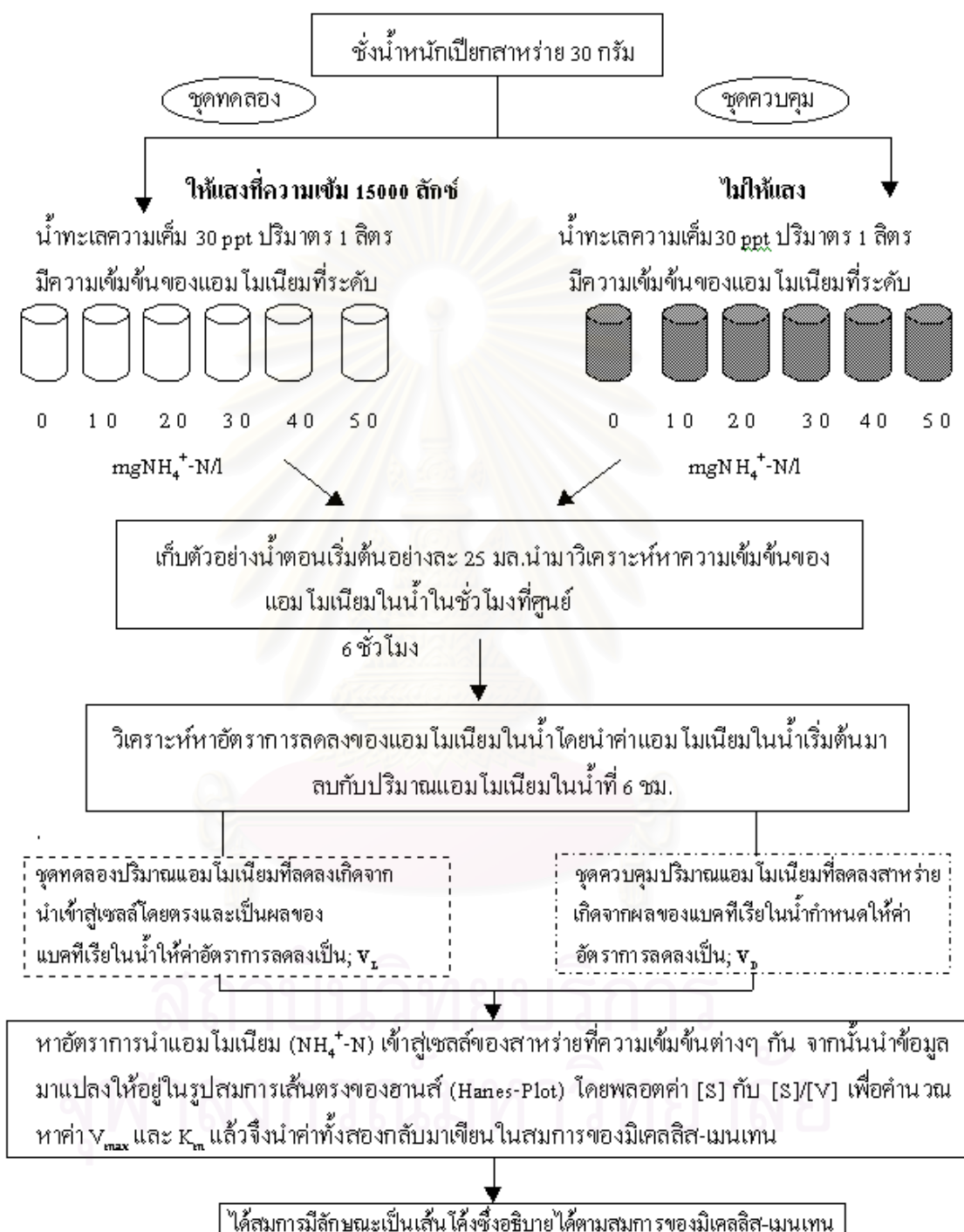
เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราการลดลงของแอมโมเนียมก่อนและหลังจากนำสาหร่ายลงแช่นาน 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mg-N/l ไม่มีสาหร่าย ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์

เนื่องจากผลการทดลองในช่วงที่ 1 พบว่าการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากสาหร่ายนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งถูกแบคทีเรียที่ปนเปื้อนมากับน้ำทะเลหรือติดมากับสาหร่ายที่นำมาทดลองเปลี่ยนแอมโมเนียมในน้ำเป็น ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ตามลำดับด้วยกระบวนการ nitrification ดังนั้นการทดลองหาอัตราการนำสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+-N) ที่สาหร่ายสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้แท้จริงในข้อ 3.2.1.2 จึงควรเปรียบเทียบอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำที่เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำ กับการทำงานของร่วมกันของสาหร่ายและแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำ

3.2.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามทำโดยการนำสาหร่ายน้ำหนักเปียกประมาณ 30 กรัม แช่ลงในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่มีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำสำหรับการทดลองตั้งแต่ 0 , 5 , 10 , 20, 30 , 40 , 50 , 60 และ 80 mg-N/l ให้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่จุดอิมิตัวของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงโดยคลุมด้วยพลาสติกสีดำที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเริ่มต้นเท่ากับชุดทดลองที่ให้แสงทุกครั้งที่ทำกรทดลอง โดยมีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเริ่มต้นเท่ากัน เพื่อหาอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ (ammonium uptake rate) ของสาหร่าย

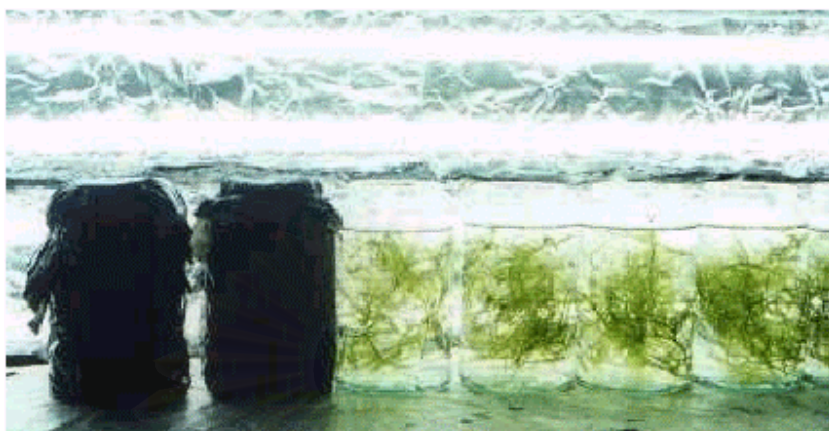
การทดลองหาอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ในน้ำโดยนำสาหร่ายน้ำหนักเปียกประมาณ 30 กรัม ลงแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่มีแอมโมเนียมความเข้มข้นต่างๆ กัน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยนำอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำของชุดทดลองที่ให้แสงแก่สาหร่าย (V_L) มาเปรียบเทียบกับอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง (V_D) เพื่อหาอัตราการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองสภาวะและนำมาคำนวณหาอัตราการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสูงสุด (V_{max}) และค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ที่ทำให้อัตราการนำเข้าแอมโมเนียมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสูงสุด (K_m) ของสาหร่ายทั้งสองชนิดจากสมการของมิเคลลิส-เมนเทน (แสดงแผนภาพการทดลองในภาพที่ 3.7) ทำการทดลองในสาหร่ายทั้งสองชนิดแยกจากกันโดยอิสระดังแสดงในภาพที่ 3.8



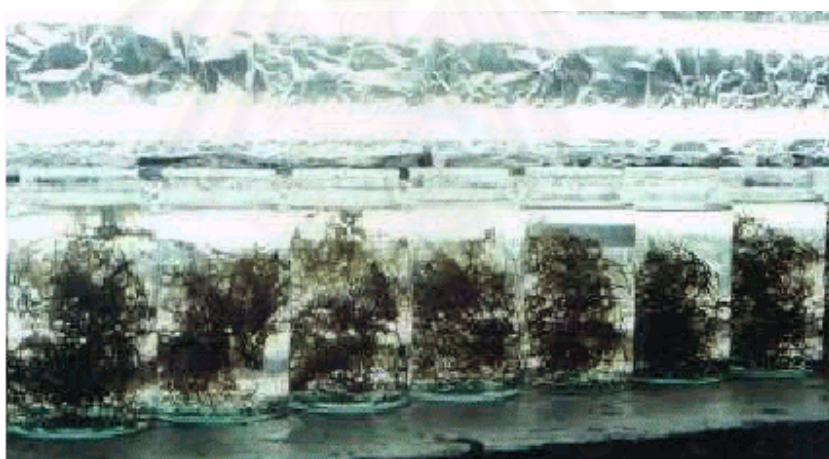
ภาพที่ 3.7 แผนภาพแสดงการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการนำแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*C. lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*A. spicifera*)

3.2.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามทำโดยนำสาหร่ายน้ำหนักเปียกประมาณ 30 กรัม ลงแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่มีระดับความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำสำหรับการทดลองตั้งแต่ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 mg-N/l ให้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่จุดอิมตัวของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาอัตราการลดลงของไนเตรท (NO_3^- -N) หลังจากนำสาหร่ายลงแช่ 6 ชั่วโมง เพื่อหาอัตราการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์สาหร่ายและนำมาคำนวณหาอัตราการนำ ไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์สาหร่ายสูงสุด (V_{\max}) และค่าความเข้มข้นของไนเตรท (NO_3^- -N) ที่ทำให้อัตราการนำเข้าไนเตรทเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสูงสุด (K_m) โดยทำการทดลองในสาหร่ายทั้งสองชนิดแยกจากกัน โดยอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



(ก) สาหร่ายช่อพริกไทย



(ข) สาหร่ายหนาม

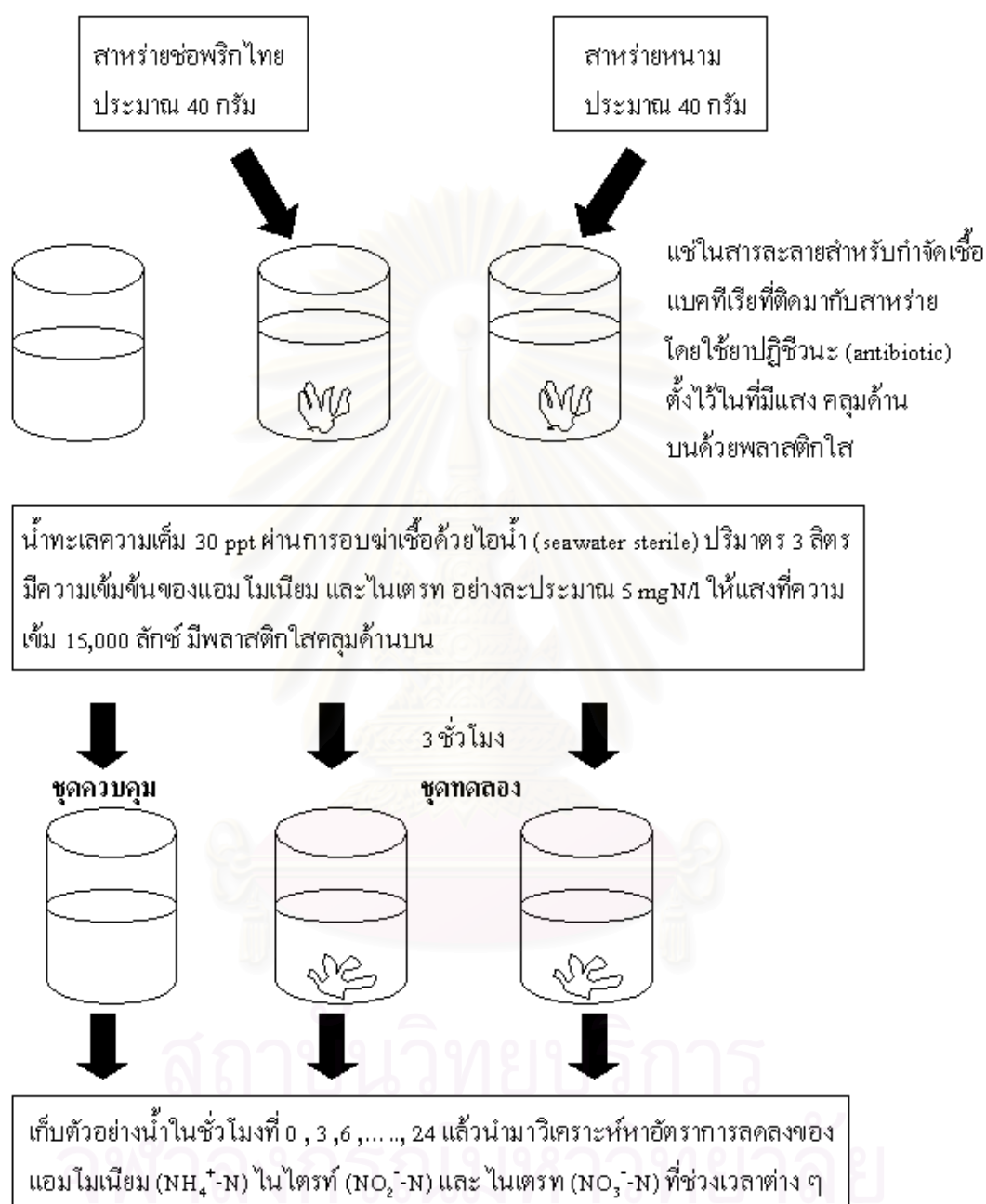
ภาพที่ 3.8 ภาพการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรต ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (ก) และสาหร่ายหนาม (ข) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

3.3. การหาน้ำหนักแห้งของสาหร่าย

นำสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามไปชั่งน้ำหนักเปียก (fresh weight) พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักกระดาษอลูมิเนียม (aluminium foil) ที่ใส่สาหร่ายแต่ละแผ่น โดยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปใส่ไว้ใน Desicator เพื่อรอให้เย็นแล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้ง (dry weight) ของสาหร่าย โดยนำไปลบกับค่าน้ำหนักเปียกและน้ำหนักกระดาษอลูมิเนียมที่ชั่งไว้ในตอนแรก

3.4. ศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในห้องปฏิบัติการ

การทดลองเพื่อศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนระหว่างแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ในน้ำของสาหร่ายทั้งสองชนิด โดยวัดอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ในน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ทำโดยนำสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามชั่งน้ำหนักเปียกประมาณ 30 – 50 กรัม มาผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะตามวิธีดังภาพที่ 3.6 จากนั้นนำมาแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ (seawater sterile) ปริมาตร 3 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ประมาณ 2 – 5 mgN/l และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ประมาณ 5 mgN/l ให้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่จุดอิมตัวของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ประมาณ 2 – 5 mgN/l และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ประมาณ 5 mgN/l แต่ไม่มีสาหร่าย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในชั่วโมงที่ 0, 3, 6, ..., 24 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ไนไตรท์ ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ในน้ำ แสดงแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 แผนภาพแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของ
แอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม
ในสภาพปลอดเชื้อในห้องปฏิบัติการ

3.5 การศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในสภาพแสงธรรมชาติเปรียบเทียบกับการให้แสงคงที่ตลอดในห้องปฏิบัติการ

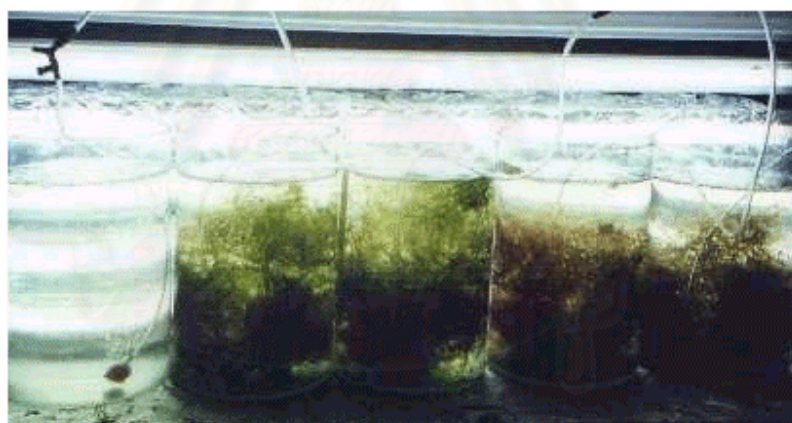
การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำภายใต้สภาพแสงจากธรรมชาติเปรียบเทียบกับ การให้แสงที่จุดอิมตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองเหมือนกันทั้งในสภาพแสงธรรมชาติและแสงคงที่ที่จุดอิมตัวของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในห้องปฏิบัติการ ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1** นำสาหร่ายช่อพริกไทยมากำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะตามวิธีดังภาพที่ 3.6 จากนั้นนำสาหร่ายลงแช่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 8 ลิตร
- ชุดการทดลองที่ 2** นำสาหร่ายช่อพริกไทยโดยไม่ต้องผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายลงแช่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 8 ลิตร
- ชุดการทดลองที่ 3** นำสาหร่ายหนามมากำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะตามวิธีดังภาพที่ 3.6 จากนั้นนำสาหร่ายลงแช่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 8 ลิตร
- ชุดการทดลองที่ 4** นำสาหร่ายหนามโดยไม่ต้องผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายลงแช่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 8 ลิตร

กลุ่มที่ทดลองในห้องปฏิบัติการให้แสงที่จุดอิมตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ คงที่ตลอดการทดลอง ส่วนกลุ่มทดลองในสภาพแสงจากธรรมชาติทำการวัดความเข้มแสงจากเครื่อง LX-50 lux meter ทุกๆ 20 นาที ในช่วงเวลา ระหว่าง 08:00 – 18:00 น. ขณะทำการทดลอง เก็บตัวอย่างน้ำในชั่วโมงที่ 0, 3, 6, ..., 48 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ไนไตรท์ ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) ในน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 8 ลิตร ไม่มีสาหร่าย ภาพของการทดลองแสดงในภาพที่ 3.10



(ก) การทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ



(ข) การทดลองในห้องปฏิบัติการ

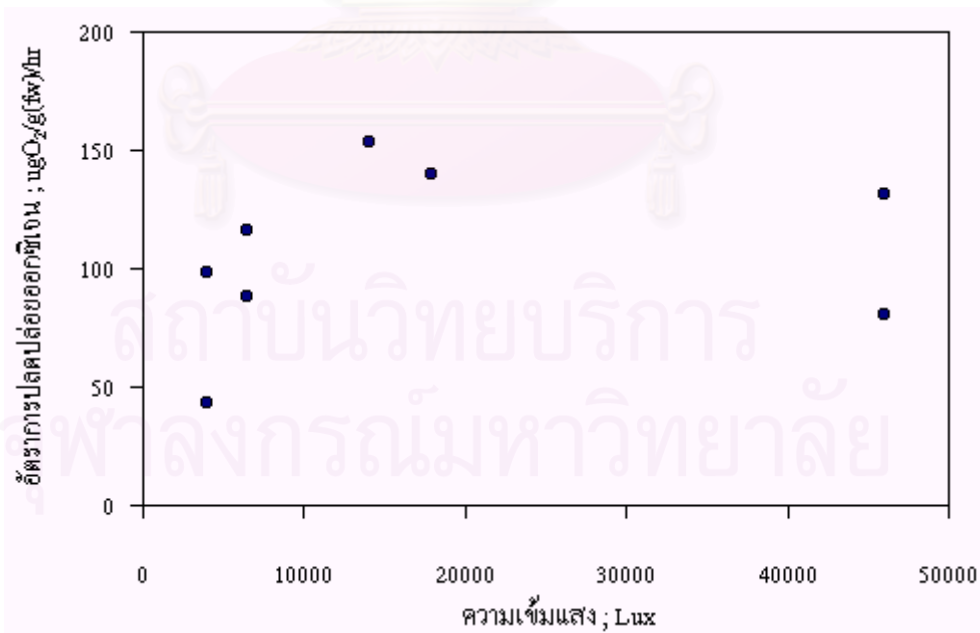
ภาพที่ 3.10 ภาพการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) ในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำภายใต้สภาพแสงจากธรรมชาติ (ก) เปรียบเทียบกับการให้แสงคงที่ที่จุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงของ สาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการ (ข)

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

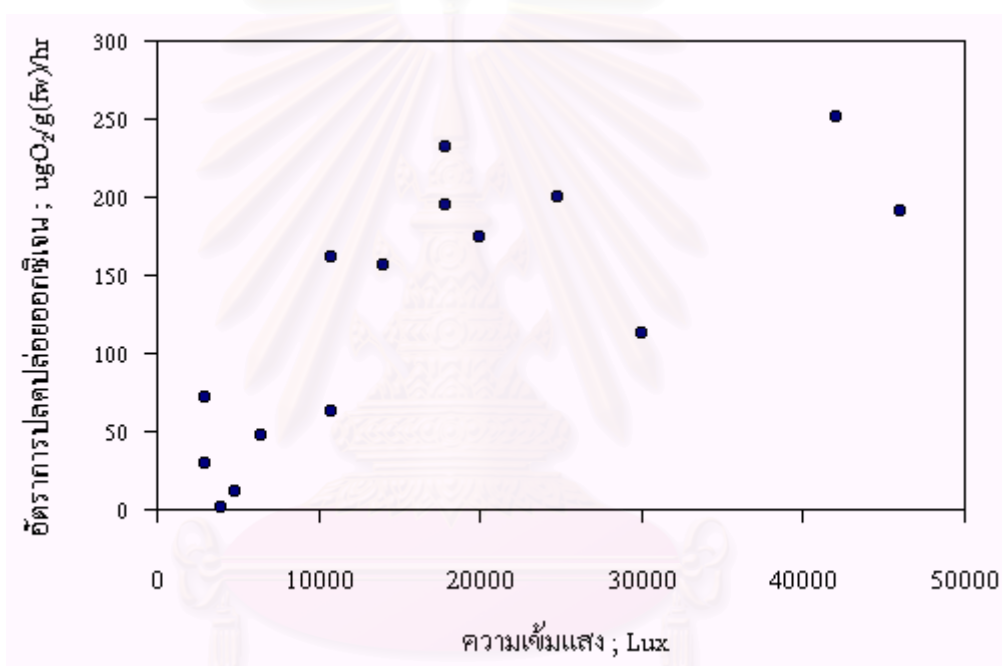
4.1. ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

ผลการทดลองพบว่าระดับความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*C. lentillifera*) โดยพบว่าเมื่อระดับความเข้มแสงสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยออกซิเจน (oxygen evolution) ของสาหร่ายช่อพริกไทยเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ ($200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD) หลังจากนั้นอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายค่อนข้างคงที่ถึงแม้ระดับความเข้มแสงจะสูงขึ้นแต่อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายก็ไม่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มว่าอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายช่อพริกไทยจะลดลงเมื่อความเข้มแสงสูงกว่า 45,000 ลักซ์ ดังกราฟแสดงผลการทดลองในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย (*C. lentillifera*) ในห้องปฏิบัติการ (ข้อมูลจากการทดลอง 3 ครั้ง แยกจากกัน โดยอิสระ)

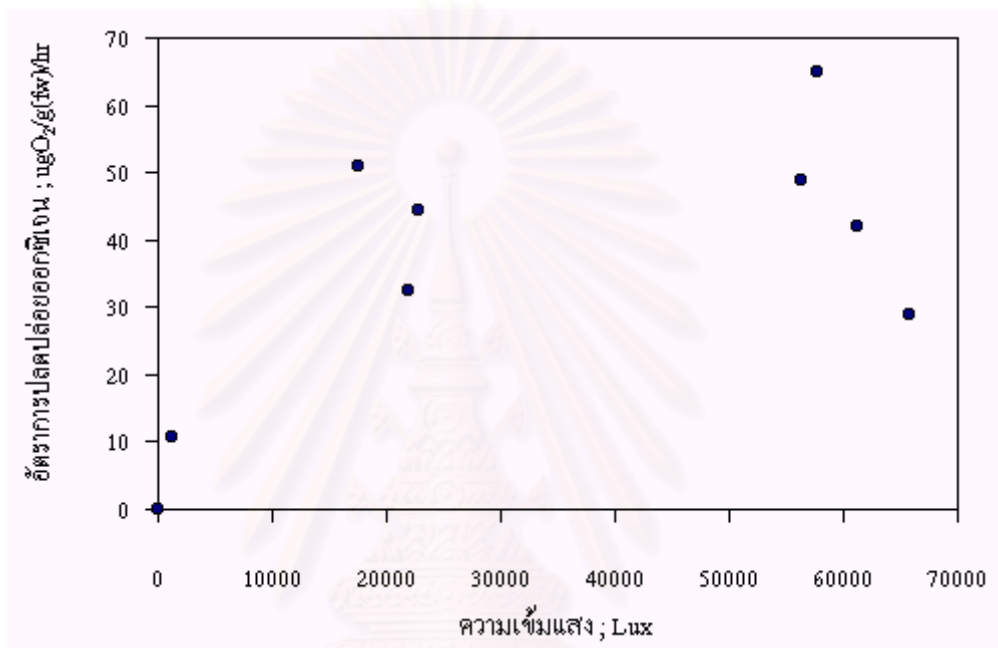
ส่วนผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนาม พบว่าระดับความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในลักษณะเดียวกับสาหร่ายช่อพริกไทย แต่อัตราการปลดปล่อยออกซิเจน (oxygen evolution) ของสาหร่ายหนามจะมีมากกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย โดยอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนามจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับความเข้มแสงที่สูงขึ้นจนถึงความเข้มแสงประมาณ 20,000 ลักซ์ หลังจากนั้นอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายหนามค่อนข้างคงที่จนถึงระดับความเข้มแสงประมาณ 40,000 ลักซ์ ดังกราฟแสดงผลการทดลองในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหนาม (*A. spicifera*) ในห้องปฏิบัติการ (ข้อมูลได้จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง แยกจากกันโดยอิสระ)

เนื่องจากโคมไฟฮาโลเจนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสามารถให้แสงความเข้มสูงสุดเพียง 45,000 ลักซ์ ซึ่งในภาพที่ 4.1 ผลการทดลองพบว่ามีความโน้มถ่วงการลดลงของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยทดลองหาประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติที่ระดับความเข้มแสงตั้งแต่ 0 – 65,000 ลักซ์ ($0-870 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Photon Flux Density: PFD) ผลการทดลองพบว่าระดับความเข้มแสงในธรรมชาติมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย เช่นเดียวกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทยจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความเข้ม

แสงประมาณ 20,000 ลักซ์ ($270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD) หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่จนถึงระดับความเข้มแสงประมาณ 60,000 ลักซ์ สำหรับแนวโน้มการลดลงของอัตราการสังเคราะห์แสงซึ่งแสดงถึงการยับยั้งด้วยแสง (photoinhibition) ที่ระดับความเข้มแสงสูงกว่า 45,000 ลักซ์ ($600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD) นั้นเห็นผลไม่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลของระดับความเข้มแสงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของ สาหร่ายช่อพริกไทย (*C. lentillifera*) ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ (ข้อมูลได้จากการทดลองทั้งหมด 9 ครั้ง แยกจากกันโดยอิสระ)

จากการทดลองหาอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในห้องปฏิบัติการ และภายใต้สภาพแสงธรรมชาติแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มแสงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม โดยพบว่าระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเพิ่มขึ้น และพบว่าอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม มีจุดอิ่มตัว (saturation point) ที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 – 20,000 ลักซ์ ($200\text{-}270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD) ซึ่งเมื่อความเข้มแสงสูงกว่านี้ก็ไม่มีความสัมพันธ์ต่อการเพิ่มของอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในสาหร่ายสีน้ำตาลชนิด *Feldmannia irregularis* (Robledo *et al.*, 1994) และสาหร่าย

Laminaria abyssalis (Rodrigues *et al.*, 1993) พบว่ามีจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เช่นเดียวกัน

ตามปรกติอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเข้มแสงระดับหนึ่งที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงมีค่าคงที่ไม่เพิ่มสูงขึ้นอีกซึ่งเรียกว่าอยู่ในระดับความเข้มแสงที่อิ่มตัว (light saturation intensity) โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์แสงของพืชมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปไฮเปอร์โบลา เรียกว่า light saturation curve ซึ่งจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงนี้คือระดับความเข้มแสงที่ทำให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุด (P_{max}) โดยมีความแปรผันขึ้นกับชนิดของพืชและปัจจัยสภาพแวดล้อม (Devlin and Barker, 1971) โดยที่พืชแต่ละชนิดจะมีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัยในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นสาหร่ายที่มักพบในเขตน้ำขึ้นน้ำลงพบว่าจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสง $400-600 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และสาหร่ายที่อาศัยอยู่บริเวณเขตชายฝั่งน้ำตื้นต่ำกว่าระดับความลึกน้ำลงต่ำสุดพบว่าจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสง $150-250 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และที่ระดับความลึกต่ำกว่าระดับน้ำลงต่ำสุดพบว่าจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่า $100 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Lüning, 1981 อ้างโดย Lobban and Harrison, 1994) และการทดลองของ Sosa *et al.*, (1993) ในสาหร่ายสีแดงชนิด *Gelidium canariensis* ที่มักพบอยู่บริเวณเขตน้ำตื้น มีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ที่ pH 8.2 โดยอัตราการสังเคราะห์แสงจะมีค่าคงที่จนถึงระดับความเข้มแสง $600 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ก็ไม่พบแนวโน้มการเกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photoinhibition)

ในประเทศไทยสาหร่ายสีเขียวชนิด *Caulerpa lentillifera* มักพบขึ้นบนก้อนหินหรือพื้นทรายในเขตน้ำตื้นๆ ใกล้แนวปะการัง (Lewmanomont and Ogawa, 1995) ผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสงประมาณ $15,000 - 20,000$ ลักซ์ (ประมาณ $200-270 \mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PFD) ซึ่งมีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงคล้ายกับสาหร่ายชนิดอื่นที่พบในเขตน้ำตื้น ส่วนสาหร่ายสีแดงชนิด *Acanthophora spicifera* ซึ่งมักพบขึ้นทั่วไปในทุกสภาวะ ตั้งแต่พื้นโคลน พื้นทรายและพื้นหิน ในเขตน้ำขึ้นน้ำลง และเป็นสาหร่ายที่พบเสมอในอ่าวไทย (Lewmanomont and Ogawa, 1995) ผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าสาหร่ายสีแดงชนิด *Acanthophora spicifera* มีจุดอิ่มตัวที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่าสาหร่ายชนิดอื่นที่พบในเขตน้ำขึ้นน้ำลงด้วยกัน เนื่องจากสาหร่ายที่นำมาทดลองได้ทำการเก็บไว้ในบ่อซีเมนต์ ซึ่งมีการหมุนเวียนของกระแสน้ำภายในบ่อค่อนข้างน้อยและ Einav *et al.* (1995) รายงานว่าสาหร่ายสีแดงชนิด

Acanthophora najadiformis เป็นสาหร่ายที่ขึ้นในเขตน้ำตื้นระหว่างน้ำขึ้นน้ำลงซึ่งเป็นบริเวณที่ปรี่มน้ำหรือสัมผัสกับอากาศ และมัก โผล่พ้นน้ำขณะน้ำลงต่ำสุด การทดลองพบว่าสาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงในบริเวณที่สัมผัสกับอากาศมากกว่าเวลาอยู่ในน้ำ จึงอนุมานได้ว่าสาหร่ายในสกุลนี้ชอบอยู่ในที่ตื้นริมหาดที่มีระดับความเข้มแสงที่สูง ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายสีแดงชนิด *A. spicifera* ไว้ในบ่อซีเมนต์ก่อนนำมาทดลองจะมีผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายโดยตรง เพราะในบ่อเลี้ยงนั้นสาหร่ายจะจมน้ำอยู่ตลอดเวลาทำให้สาหร่ายต้องปรับสภาพเซลล์เพื่อให้เข้ากับระดับความเข้มแสงที่ต่ำกว่าปรกติที่ได้รับในธรรมชาติ จึงอาจเป็นผลให้สาหร่ายหนามที่นำมาทดลองมีจุดอิมิตัวของการสังเคราะห์แสงต่ำกว่าที่เคยมีรายงานมา

การที่สาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงที่สูงกว่าจุดอิมิตัว (saturation point) มากเกินไปจนเป็นผลเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสงที่เรียกว่า photoinhibition ซึ่งเป็นการสูญเสียความสามารถในการสังเคราะห์แสงเพียงชั่วคราว การเกิด photoinhibition นี้ส่วนมากมักเกิดในสาหร่ายที่ขึ้นอยู่ในเขตน้ำขึ้นน้ำลงและสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน (Herbert *et al.*, 1990 อ้างโดย Powtongsook, *et al.* 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในสาหร่ายสีเขียว *Caulerpa lentillifera* ที่ทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ โดยพบแนวโน้มการเกิด photoinhibition ขึ้นที่ระดับความเข้มแสงมากกว่า 65,000 ลักซ์ ($870 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD) จากรายงานที่ผ่านมามีการเกิด photoinhibition ขึ้นในสาหร่ายหลายชนิดในธรรมชาติ เช่น สาหร่ายสีเขียว ชนิด *Cladophora prolifera*, *Cladophora pellucida* (Häder *et al.*, 1996) และ *Caulerpa prolifera* ในทะเลเมดิเตอร์เรเนียน (Häder, *et al.* 1997) และสาหร่ายสีแดงชนิด *Chondrus crispus* บริเวณชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติก (Sagert *et al.* 1997)

จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและภายใต้สภาพแสงธรรมชาติแสดงให้เห็นว่า การที่ค่าของอัตราการสังเคราะห์แสงที่ทดลองภายใต้สภาพแสงธรรมชาติไม่คงที่ก็เกิดเนื่องจากการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ จึงไม่สามารถกำหนดค่าของระดับความเข้มแสงให้คงที่ได้ตลอดการทดลอง ผลที่ได้จึงมีความซับซ้อนกว่าการทดลองวัดอัตราการสังเคราะห์แสงในห้องปฏิบัติการ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายทั้งสองชนิดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าสาหร่ายหนาม มีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนต่อหน้าพื้นที่ของสาหร่ายสูงกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย ส่วนการทดลองหาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติพบว่าอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสาหร่ายช่อพริกไทยภายใต้สภาพแสงจากธรรมชาติจะน้อยกว่าการทดลองภายใน

ห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะทดลองวัดอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายภายในภาชนะวัดอัตราการสังเคราะห์แสง (photosynthesis chamber) ที่มีฝาปิดภาชนะด้านบนแต่การทดลองในสภาพแสงธรรมชาติไม่มีการปิดฝาภาชนะด้านบนจึงเป็นผลให้มีการสูญเสียออกซิเจนในน้ำสู่อากาศด้านบนได้

เนื่องจากระดับความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการเจริญของสาหร่ายโดยตรง ดังนั้นถ้าหากสาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มเหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายก็จะส่งผลให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการนำสารอาหารในน้ำไปสร้างสารประกอบต่างๆ เพื่อใช้ในการเจริญของเซลล์สาหร่าย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งที่ใช้สาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม แต่ในทางกลับกันถ้าสาหร่ายได้รับแสงที่ไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เช่น ได้รับแสงที่มีความเข้มแสงต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีการเจริญช้า ในขณะที่ความเข้มแสงสูงมากเกินไปก็จะเกิด photoinhibition ในสาหร่ายเป็นผลทำให้สาหร่ายสูญเสียความสามารถในการสังเคราะห์แสงสามารถทำให้ผลผลิตของสาหร่ายบางชนิด เช่น *Spirulina platensis* มีผลผลิตลดลงถึง 30% (Vonshak *et al.*, 1998) และทำให้ความสามารถในการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายลดลง ดังนั้นในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม รวมทั้งการนำสาหร่ายไปเลี้ยงเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจึงควรให้สาหร่ายได้รับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย คือ จุดอิ่มตัวของแสงของสาหร่ายที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 – 20,000 ลักซ์ (ประมาณ 200-270 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PFD)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

จากการวิเคราะห์หาอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) หลังจากนำสาหร่ายน้ำหนักเปียกประมาณ 30 กรัม ลงแช่ในน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 100 mgN/l เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อหาอัตราการนำแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย (nutrient uptake rate) ทั้งสองชนิดและนำมาคำนวณอัตราการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายสูงสุด (V_{max}) และค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทที่ทำให้อัตราการนำเข้าแอมโมเนียมและไนเตรทเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการนำเข้าสูงสุด (K_m) ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม

4.2.1 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

4.2.1.1 ผลของแบคทีเรียต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย

เนื่องจากในน้ำทะเลและที่บริเวณผิวของสาหร่ายมีแบคทีเรียที่สามารถเจริญอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งอาจมีผลต่อการศึกษ้อัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายมีผลต่ออัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำ โดยผลการทดลองในชุดควบคุมซึ่งไม่มีสาหร่ายพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ปริมาณแอมโมเนียมในน้ำก็สามารถลดลงได้แสดงว่าในน้ำทะเลมีแบคทีเรียตามธรรมชาติที่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียมในน้ำเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนคือ ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ด้วยกระบวนการ nitrification ได้ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งได้มีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งที่ปนเปื้อนมาในน้ำทะเลโดยทำการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำและกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะ (ตามวิธีดังภาพที่ 3.6 ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3) ดังนั้นอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำหลังจากนำสาหร่ายลงแช่นาน 6 ชั่วโมง จึงอนุมานได้ว่าเป็นผลจากการดูดซึมแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย (nutrient uptake) เพียงอย่างเดียว ส่วนชุดการทดลองที่ 2 พบว่าอัตราการลดลงของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ในน้ำมีค่ามากที่สุด

เนื่องจากไม่ได้ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายและแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทะเลตามธรรมชาติ ดังนั้นการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจึงเกิดจากผลของแบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดอยู่บริเวณผิวของสาหร่ายรวมกับที่สาหร่ายสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง ส่วนในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งไม่ได้มีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้งในน้ำทะเลและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายเช่นกัน แต่ทดลองโดยคลุมภาชนะบรรจุสาหร่ายด้วยถุงพลาสติกสีดำ ผลการทดลองพบว่าหลังจากนำสาหร่ายลงแช่นาน 6 ชั่วโมง โดยไม่ได้รับแสงพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำก็สามารถลดลงได้ เนื่องจากแบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดอยู่บริเวณผิวของสาหร่ายอาจเกิดกระบวนการ nitrification เปลี่ยนรูปของแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรท ทำให้ปริมาณแอมโมเนียมในน้ำลดลง นอกจากนี้อัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากการดูดซับสารอาหาร (nutrient assimilation) ที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเซลล์ของสาหร่ายได้อีกด้วย (Lobban and Harrison, 1994)

ตารางที่ 4.1 ผลของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายมีผลต่ออัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำ (n = 3)

ชุดการทดลอง	น้ำหนักสาหร่าย (กรัม)	ปริมาณแอมโมเนียม (mgNH ₄ ⁺ -N/l)		อัตราการลดลงของแอมโมเนียม	
		ชั่วโมงที่ 0	ชั่วโมงที่ 6	mgNH ₄ ⁺ -N/hr	mgNH ₄ ⁺ -N/g(fw)/hr
ชุดควบคุม	-	31.36 ± 0.02	28.09 ± 1.72	3.27	-
ชุดการทดลองที่ 1	31.92 ± 1.13	28.03 ± 0.29	19.92 ± 4.64	8.11	0.042
ชุดการทดลองที่ 2	30.96 ± 0.88	30.61 ± 2.35	18.34 ± 1.28	12.27	0.066
ชุดการทดลองที่ 3	31.13 ± 0.33	30.59 ± 2.20	23.38 ± 4.41	7.21	0.039

หมายเหตุ :

ชุดควบคุม น้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mgNH₄⁺-N/l ไม่มีสาหร่าย ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์ การลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของแบคทีเรียในน้ำทะเล

- ชุดการทดลองที่ 1 สาหร่ายช่อพริกไทย 30 กรัม ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย แช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mgNH₄⁺-N/l ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์ การลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของสาหร่ายดูดซึมเข้าสู่เซลล์โดยตรง
- ชุดการทดลองที่ 2 สาหร่ายช่อพริกไทย 30 กรัม ไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย แช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mgNH₄⁺-N/l ให้แสงที่ความเข้ม 15000 ลักซ์ การลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของสาหร่ายดูดซึมเข้าสู่เซลล์ รวมทั้งผลของแบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย
- ชุดการทดลองที่ 3 สาหร่ายช่อพริกไทย 30 กรัม ไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ปริมาตร 1 ลิตร ไม่ผ่านการอบฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียม 30 mgNH₄⁺-N/l ไม่ให้แสงโดยคลุมขวดโหลด้วยพลาสติกดำ การลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของแบคทีเรียในน้ำรวมทั้งแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย

4.2.1.2 จลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*)

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1.1 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของสาหร่ายนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงประมาณหนึ่งในสาม ส่วนอีกสองในสามจะเป็นผลของแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำทะเลตามธรรมชาติและแบคทีเรียที่ติดอยู่กับสาหร่ายที่นำมาทดลองซึ่งอาจเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) เปลี่ยนรูปของแอมโมเนียมในน้ำเป็นไนไตรท์ (NO₂⁻) และไนเตรท (NO₃⁻) ได้ตามลำดับ ทำให้ปริมาณแอมโมเนียมในน้ำลดลง ดังนั้นการตรวจวัดอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายจะต้องคำนึงถึงผลของแบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย ดังนั้นการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) ที่สาหร่ายสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้แท้จริงในช่วงที่ 2 จึงได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของ

แอมโมเนียมในน้ำที่เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียโดยไม่ให้แสงแก่สาหร่าย เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำที่สาหร่ายสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง โดยพลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในชุดการทดลองที่ให้แสงแก่สาหร่าย กับชุดทดลองที่ไม่ให้แสงที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่างๆ กัน

ภาพที่ 4.4 เป็นการนำค่าอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำโดยสาหร่ายในชุดการทดลองที่ให้แสงประมาณ 15,000 ลักซ์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาพลอตเป็นกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V ส่วนภาพที่ 4.5 เป็นการนำค่าอัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำโดยสาหร่ายในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับแสงหลังจากนำสาหร่ายลงแช่นาน 6 ชั่วโมง มาพลอตกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) เช่นกัน จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m ตามขั้นตอนดังตัวอย่างข้างล่าง และผลการคำนวณแสดงในตาราง 4.2

$$V_{max} = 1/\text{Slope} \text{ และ } K_m = \text{จุดตัดแกน X (X - Intercept)}$$

จากภาพที่ 4.4 ได้สมการเส้นตรง คือ $y = 11.151x + 207.21 \dots \dots \textcircled{1}$

ดังนั้น $V_{max} = 1/11.152 = 0.0897 \quad \text{mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$

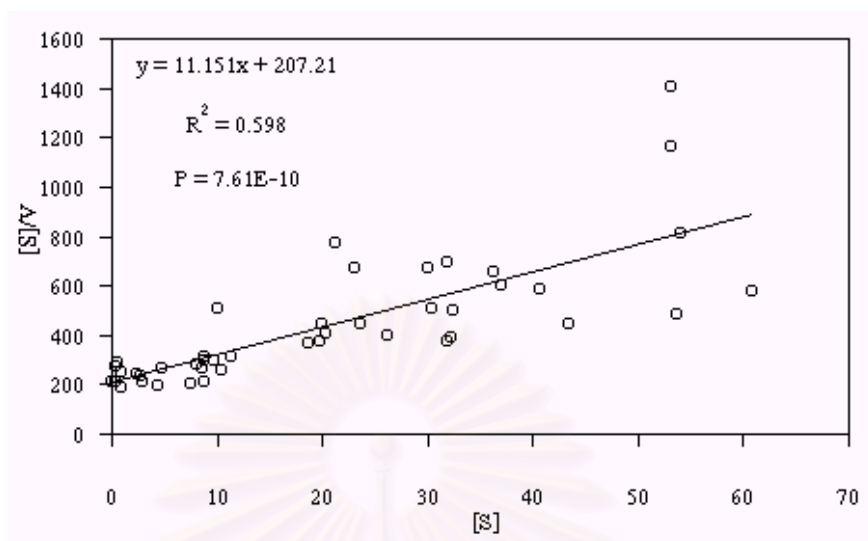
$K_m = \text{จุดตัดแกน X}$ ดังนั้นแทนค่า y เป็นศูนย์ในสมการเส้นตรง $\textcircled{1}$

แทนค่า $y = 0$ ใน $\textcircled{1}$; $0 = 11.151x + 207.21$

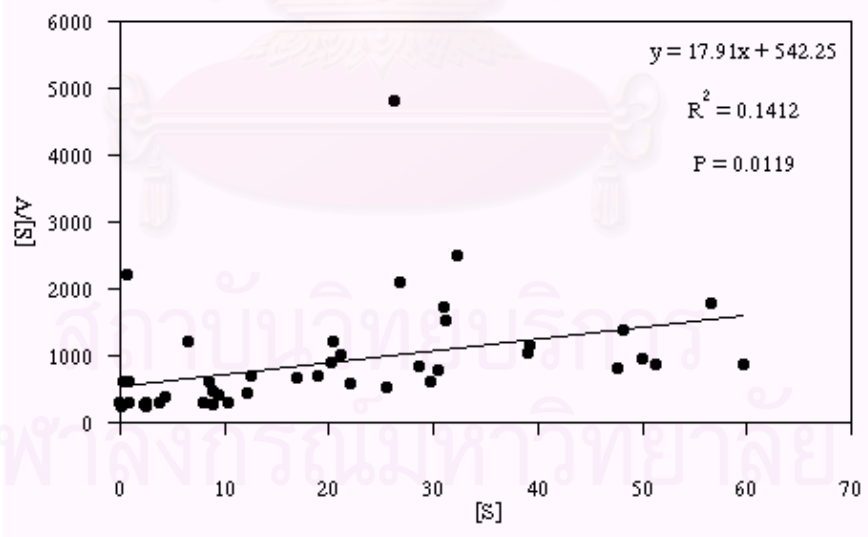
$$x = 18.5822$$

ดังนั้น $K_m = 18.5822 \quad \text{mgNH}_4^+ \text{-N/l}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.4 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 1

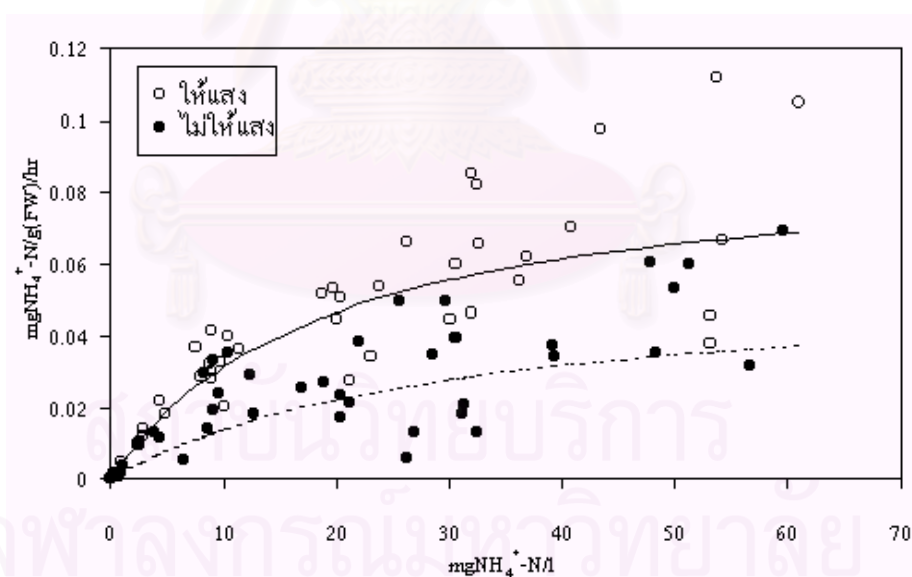


ภาพที่ 4.5 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V ของชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 1

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า V_{\max} และ K_m ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย (*C. lentillifera*) ระหว่างชุดทดลองที่ให้แสงและชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงแก่สาหร่าย

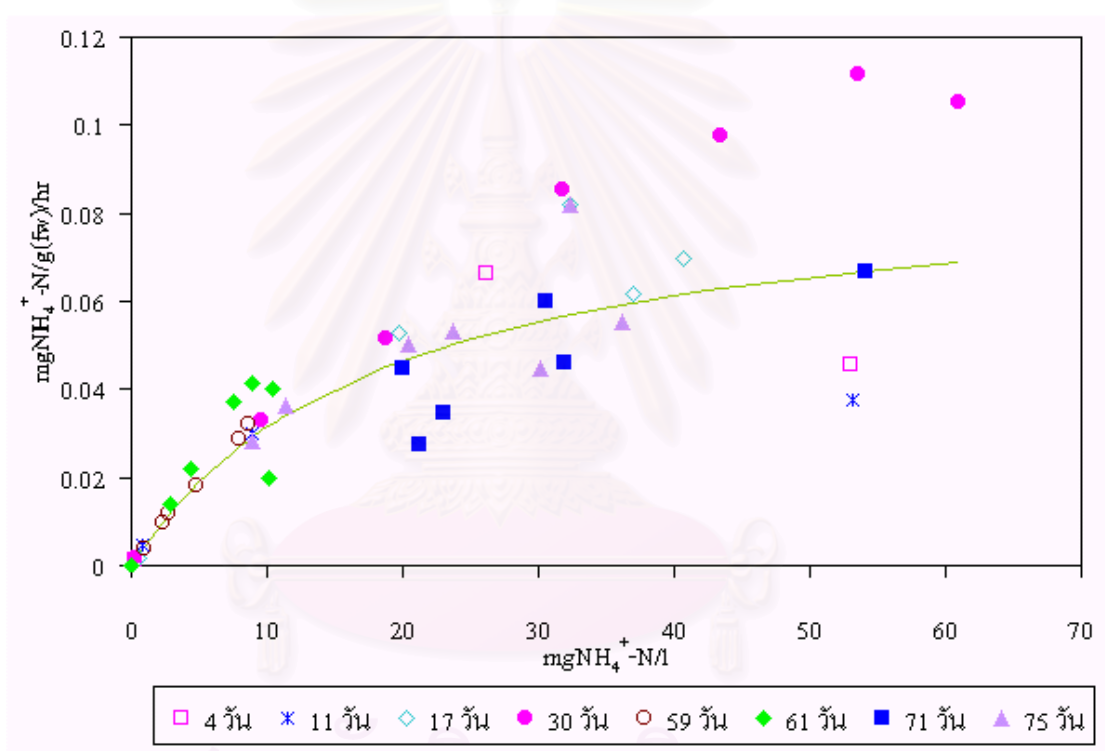
ชุดการทดลอง	V_{\max} ; $\text{mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$	K_m ; $\text{mgNH}_4^+ \text{-N/l}$
ชุดทดลองให้แสง	0.0897	18.5822
ชุดควบคุมไม่ให้แสง	0.0558	30.28

จากตารางที่ 4.2 นำค่า V_{\max} และ K_m มาแทนในสมการของมิเกลลิส-เมนเทน ; ($V = V_{\max} \times [S] / K_m + [S]$) ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีดังกล่าวที่ 4.6 โดยอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่ายในชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงจะมีอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้น้อยกว่าในชุดทดลองที่ให้แสง เนื่องจากผลของแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำทะเลและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายตามธรรมชาติบางชนิดสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียม เป็นไนไตรท์ และไนเตรทได้ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification)



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) โดยชุดทดลองที่ให้แสง (เส้นทึบ) มีค่า $V_{\max} = 0.0897 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N / g(fw) / hr}$ และ $K_m = 18.5822 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ส่วนชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง (เส้นประ) มีค่า $V_{\max} = 0.0558 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N / g(fw) / hr}$ และ $K_m = 30.28 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกัน โดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 1

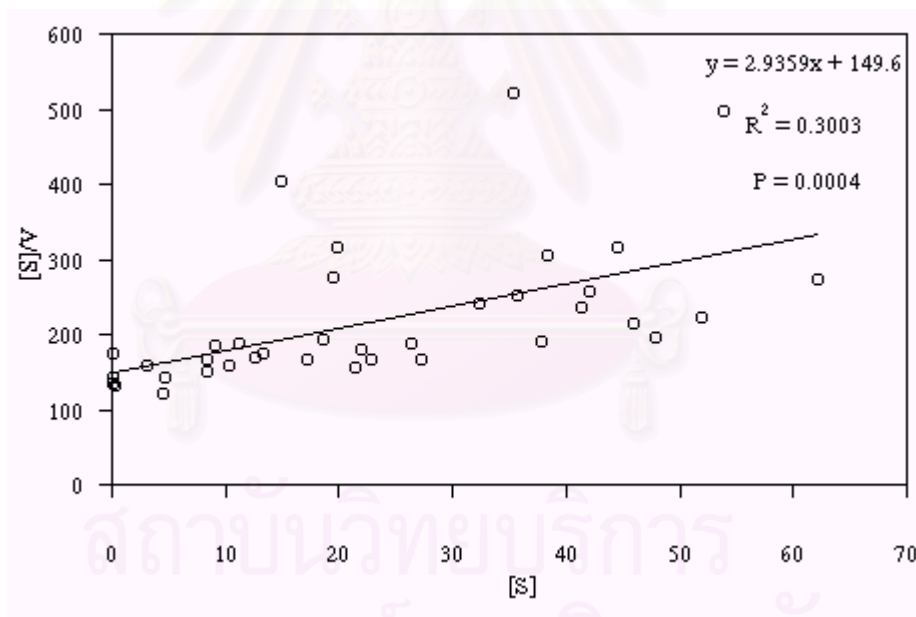
ผลการคำนวณในชุดการทดลองที่ให้แสงแก่สาหร่ายช่อพริกไทยพบว่า มีค่า V_{max} = 0.0897 $\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{g}(\text{fw})/\text{hr}$ และ K_m = 18.5822 $\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{l}$ จากนั้นนำค่า V_{max} และ K_m ที่หาได้ กลับมาพลอตตามสมการของมิเคลลิส-เมนเทน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเพิ่มสูงขึ้น และสมการมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง นอกจากนี้อภาพที่ 4.8 ยังแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บสาหร่ายก่อนนำมาทดลองตั้งแต่ 4-75 วัน ไม่มีผลต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย



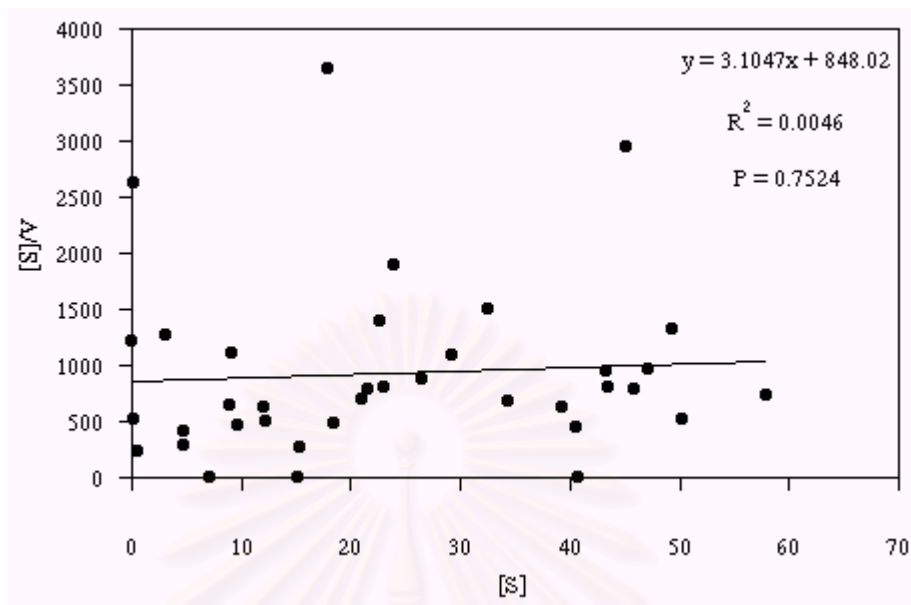
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม (NH_4^+-N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) มีค่า V_{max} = 0.0897 $\text{mgNH}_4^+-\text{N} / \text{g}(\text{fw}) / \text{hr}$ และ K_m = 18.5822 $\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{l}$ จุดสีต่าง ๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 1

4.2.1.3 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

ผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายหนามมีผลต่ออัตราการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำ เช่นเดียวกับการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทย (ในข้อ 4.2.1.2) ผลการคำนวณค่า V_{\max} และ K_m จากสมการเส้นตรงของฮานส์ของชุดทดลองสาหร่ายหนามในสถานะให้แสง (แสดงในภาพที่ 4.8) และไม่ให้แสง (แสดงในภาพที่ 4.9) นำมาคำนวณค่า V_{\max} และ K_m ตามสมการเส้นตรงของฮานส์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3. เมื่อนำค่า V_{\max} และ K_m มาแทนในสมการของมิเคลลิส-เมนเทน ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีเหมือนกับผลการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทย โดยอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่ายในชุดทดลองที่ได้รับแสงจะมีอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้สูงกว่าชุดทดลองที่ไม่ให้แสง (ภาพที่ 4.10)



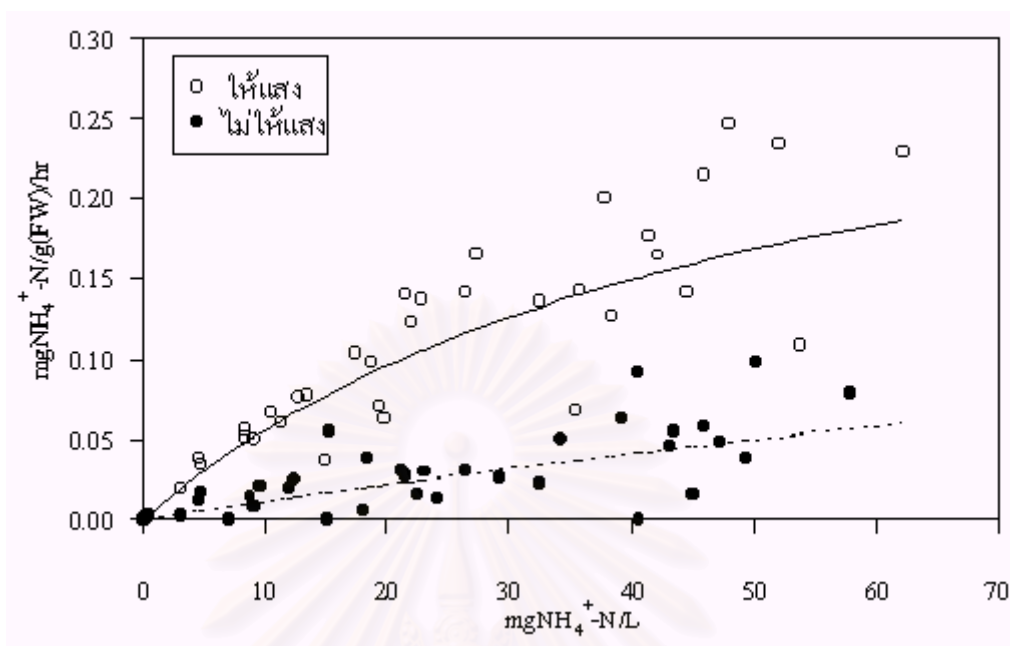
ภาพที่ 4.8 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม [S]/V เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ (ข้อมูลจากการทดลอง 7 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 2



ภาพที่ 4.9 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม [S]/V ของชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง (ข้อมูลจากการทดลอง 7 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 2

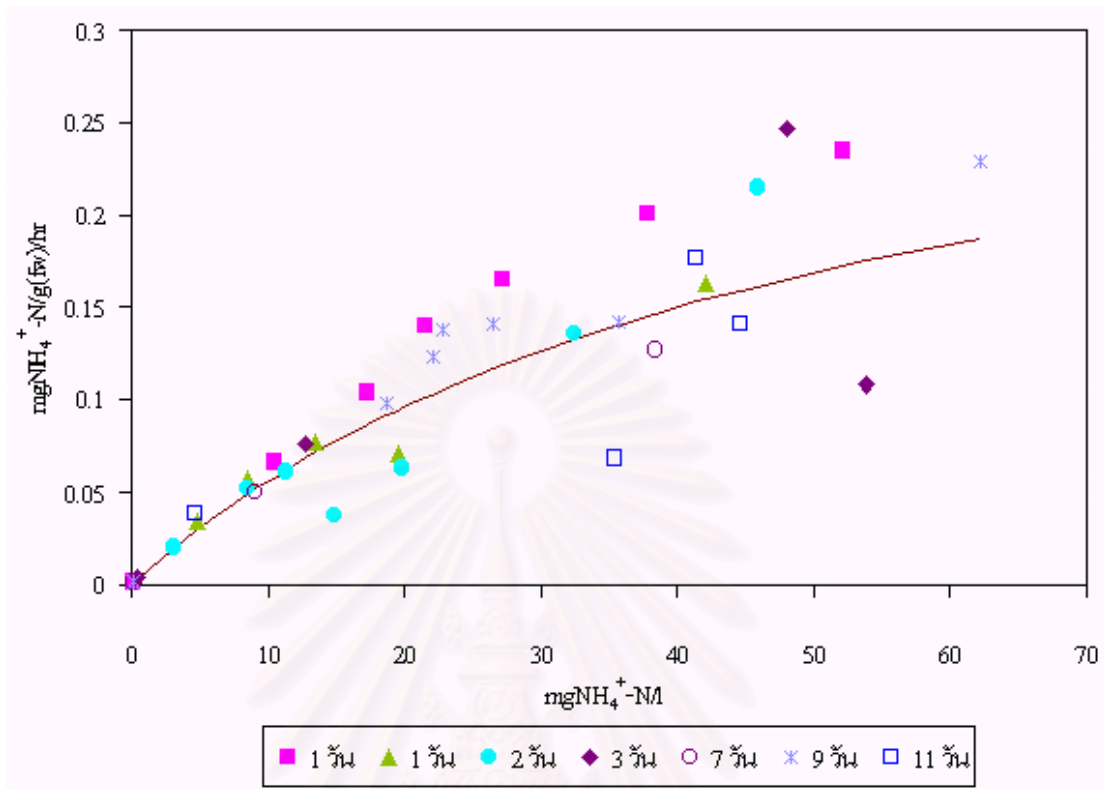
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า V_{\max} และ K_m ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนาม (*A. spicifera*) ระหว่างชุดทดลองที่ให้แสงและชุดควบคุมที่ไม่ให้แสงแก่สาหร่าย

ชุดการทดลอง	V_{\max} ; $\text{mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$	K_m ; $\text{mgNH}_4^+ \text{-N/l}$
ชุดทดลองให้แสง	0.3406	50.9554
ชุดควบคุมไม่ให้แสง	0.1726	381.9255



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) โดยชุดทดลองที่ให้แสง (เส้นทึบ) มีค่า $V_{\max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/g(fw) /hr}$ และ $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ ส่วนชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง (เส้นประ) มีค่า $V_{\max} = 0.3221 \text{ mgNH}_4^+\text{-N / g(fw) / hr}$ และ $K_m = 273.1407 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ (ข้อมูลจากการทดลอง 7 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 2

ภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บสาหร่ายก่อนนำมาทดลองตั้งแต่ 1-11 วัน ไม่มีผลต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนามกับสาหร่ายช่อพริกไทยพบว่าสาหร่ายหนามมีอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่ายสูงกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย (ตาราง ที่ 4.2 และ 4.3)



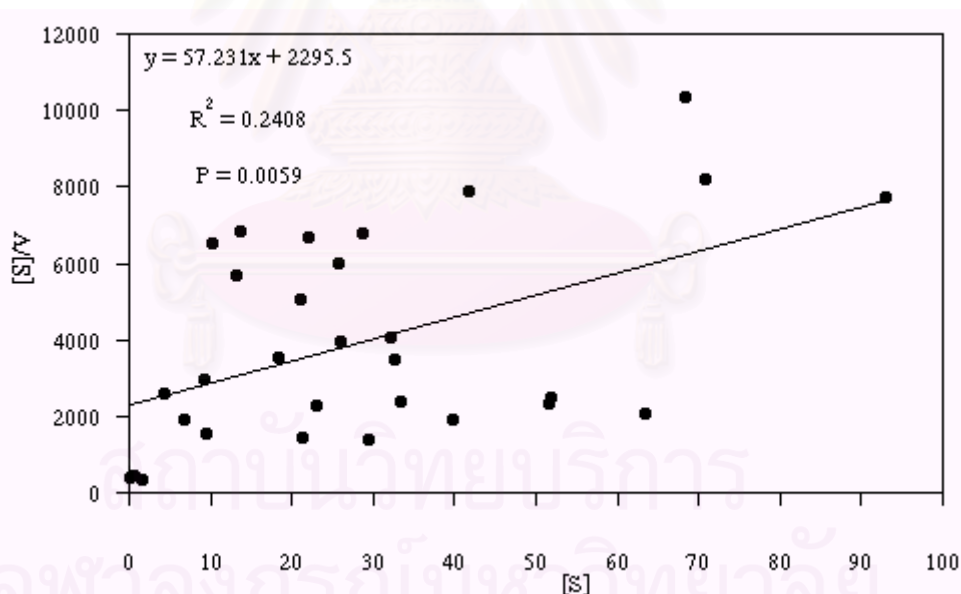
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) มีค่า $V_{\max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+\text{-N} / \text{g(fw)} / \text{hr}$ และ $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+\text{-N/l}$ จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง (ข้อมูลจากการทดลอง 7 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

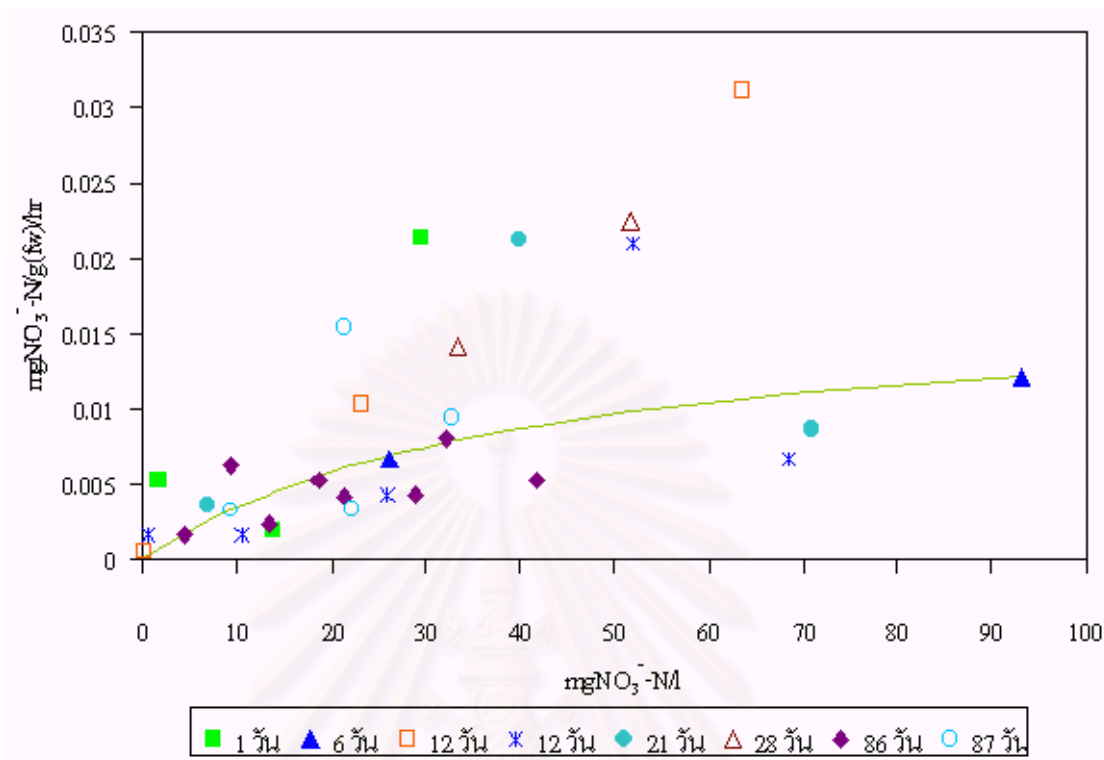
4.2.2 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

4.2.2.1 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*)

เมื่อนำค่าอัตราการลดลงของไนเตรทในน้ำโดยสาหร่ายช่อพริกไทยมาพลอตเป็นกราฟเส้นตรงฮานส์ (ภาพที่ 4.12) สามารถคำนวณค่า V_{\max} และ K_m ของสาหร่ายช่อพริกไทยได้เท่ากับ $0.0185 \text{ mgNH}_4^+-\text{N/g(fw)/hr}$ และ $63.9958 \text{ mgNH}_4^+-\text{N/l}$ ตามลำดับ โดยอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเพิ่มสูงขึ้น และสมการมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายช่อพริกไทย [S]/V (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 3

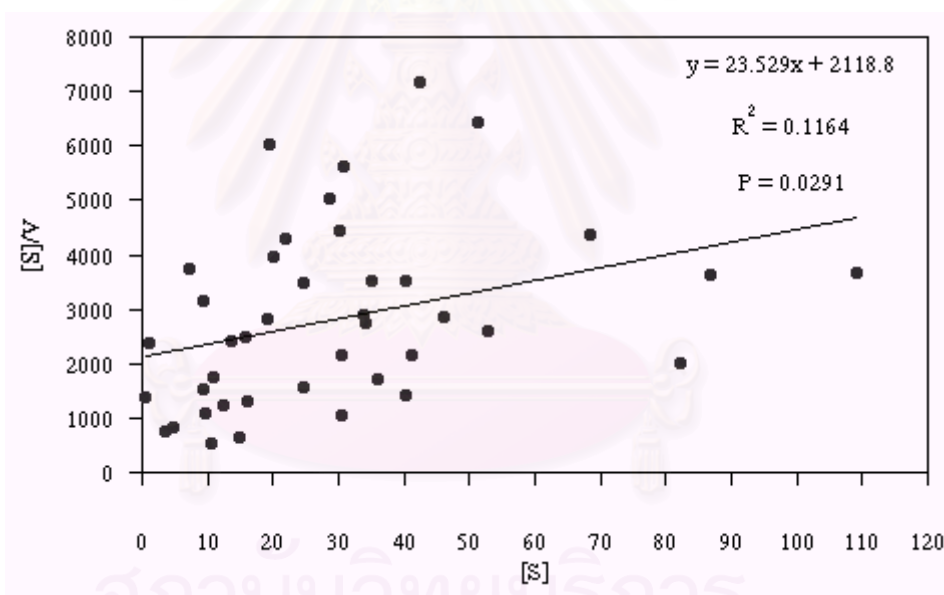


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) มีค่า $V_{\max} = 0.0175 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 40.1094 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ จุดสีต่าง ๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง (ข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ)

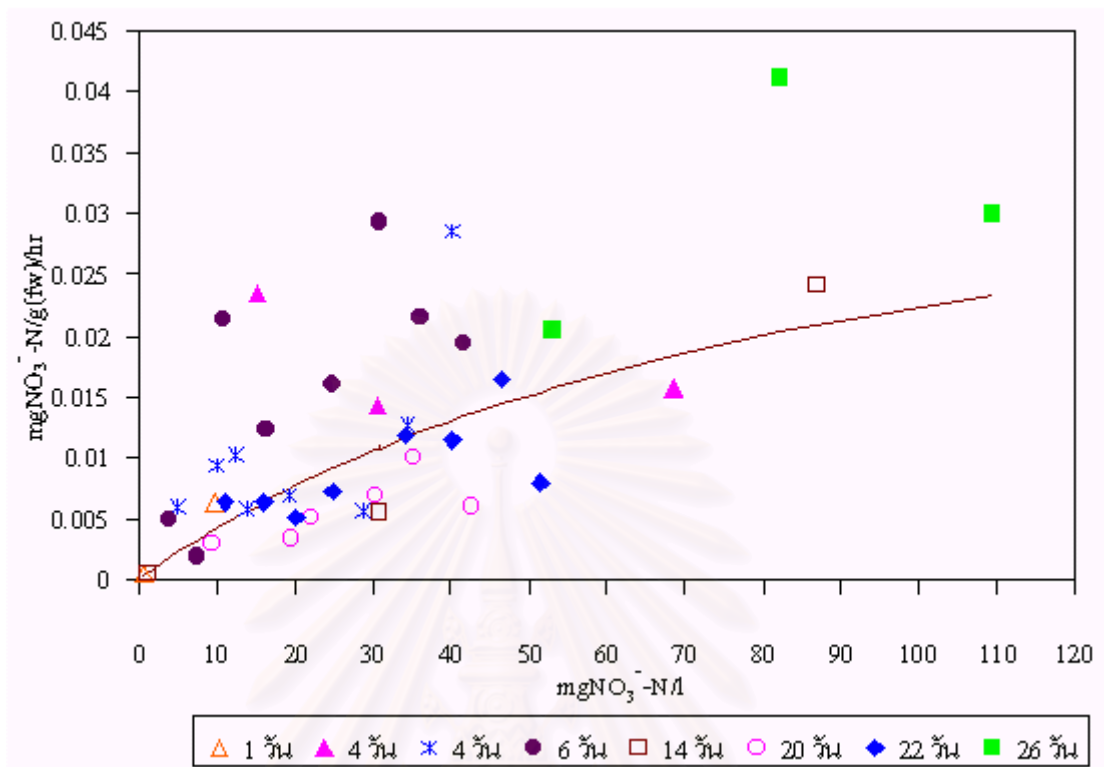
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2.2 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์โดยสาหร่าย หนาม (*Acanthophora spicifera*)

เมื่อนำค่าอัตราการลดลงของไนเตรทในน้ำโดยสาหร่ายหนามมาพลอตเป็นกราฟเส้นตรงฮานส์ (ภาพที่ 4.14) สามารถคำนวณค่า V_{\max} และ K_m ของสาหร่ายหนามได้เท่ากับ $0.0425 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$ และ $90.0506 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ตามลำดับ กลับมาเขียนในสมการของมิเกลลิส-เมนเทน โดยอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเพิ่มขึ้น และสมการมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีซึ่งอธิบายได้ตามสมการของมิเกลลิส-เมนเทน ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.14 กราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ [S] กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายหนาม $[S]/V$ (ข้อมูลจากการทดลอง 8 ครั้ง แยกกันโดยอิสระ) ข้อมูลแสดงในตารางภาคผนวกที่ 4



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*) มีค่า $V_{\max} = 0.0425 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$ และ $K_m = 90.0506 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ จุดสีต่างๆ แสดงระยะเวลาที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงเป็น stock culture ก่อนนำมาทดลอง (ข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง แยกจากกันโดยอิสระ)

จากผลการทดลองจลนพลศาสตร์ ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์สาหร่ายทั้งสองชนิดพบว่าอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.4) ซึ่งในรายงานของ Topinka (1978) กล่าวว่าประสิทธิภาพของการนำสารอาหารไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาลชนิด *Fucus spiralis* มีข้อจำกัดอยู่ที่ความเข้มข้นของสารอาหารเหล่านั้นในน้ำ และสอดคล้องกับการทดลองนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Laminaria groenlandica* (Harrison *et al.*, 1986), *Chaetomorpha linum* (Lavery and McComb, 1991), *Gracilaria pacifera* (Thomas *et al.*, 1987) และสาหร่าย *Chondrus crispus* (Amat and Braud, 1990) โดยสมการมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีซึ่งอธิบายได้ตามสมการของมิเคลลิส-เมนเทน ผลการทดลองพบว่าอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนามจะมีค่าอัตราการนำเข้าสู่สูงกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย ดังนั้นสาหร่ายหนามจึงมีประสิทธิภาพในการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย

ตารางที่ 4.4. แสดงค่า V_{\max} และ K_m ของการนำไนเตรท (NO_3^- -N) เข้าสู่เซลล์สาหร่ายทั้งสองชนิด

ชนิดของสาหร่าย	V_{\max} ; mg NO_3^- -N /g(fw)/hr	K_m ; mg NO_3^- -N /l
สาหร่ายช่อพริกไทย	0.0175	40.1094
สาหร่ายหนาม	0.0425	90.0506

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองครั้งนี้ ได้ทดลองนำข้อมูลมาแปลงเป็นกราฟเส้นตรง โดยเปรียบเทียบวิธีของฮานส์และไลน์วีเวอร์-เบอร์ค ซึ่งก็พบว่าสมการของฮานส์ให้ค่าความแม่นยำดีกว่าการใช้สมการของไลน์วีเวอร์-เบอร์ค ซึ่งที่จุดต่างๆ จะรวมกันอยู่บริเวณแกน $1/V_0$ ส่งผลให้ค่าความชันของกราฟที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอย (regression analysis) มีความผิดพลาดได้มาก ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้กราฟของฮานส์ (Hanes-Plots) เพื่อคำนวณหาค่า V_{\max} และ K_m เช่นเดียวกับการทดลองของ Qi and Zhu, (1994) ที่ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Prorocentrum micans*, *Chaetoceros lorenzianus*, *Bibbulphia aurita* (Underhill, 1977), *Asterionella japonica* (Eppley and Thomas, 1969) และ *Macrocystis pyrifera* (Kopozak, 1994) และรวมทั้งการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Enteromorpha* sp. และ *Osmundaria colensoi* (Taylor and Rees, 1999) และ *Fucus spiralis* (Topinka, 1978) ก็ได้เลือกใช้กราฟเส้นตรงฮานส์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[S]/V$ กับ $[S]$ มาใช้ในการแสดงข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

ผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงว่าสาหร่ายหนามและสาหร่ายช่อพริกไทยมีประสิทธิภาพในการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าในเตรท เนื่องจากสาหร่ายสามารถนำแอมโมเนียมไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างกรดอะมิโน (amino acid) ได้โดยตรง ในขณะที่ถ้าต้องการใช้ในเตรทจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อน เซลล์จึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นแอมโมเนียมจึงเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนของสาหร่ายส่วนใหญ่ (Lobban and Harrison, 1994) และจากการศึกษาของ Cloern and DeBore (1978) พบว่าสาหร่าย *Cryptomonas ovata* จะเลือกนำแอมโมเนียมในน้ำเข้าสู่เซลล์จนหมดก่อนจึงจะเปลี่ยนมาเลือกใช้ในเตรทต่อจากแอมโมเนียมที่หมดไป

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาการเก็บสาหร่ายจากบ่อเลี้ยงที่บรจจฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา มาเลี้ยงในห้องปฏิบัติการก่อนการทดลองในแต่ละครั้งพบว่า อายุของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่นำมาพักไว้ในถังไฟเบอร์กลาสที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt และเติมอาหารเหลวสูตรดัดแปลงจากสูตรของกิลสตาร์ต (F/2 medium) ได้รับแสงและอุณหภูมิตามธรรมชาติ (27-34^o) และเป่าอากาศ โดยมีพลาสติกใสคลุมด้านบน เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ไม่มีผลต่ออัตราการนำแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม

4.3 การทดลองหาน้ำหนักแห้งของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

เนื่องจากสาหร่ายทั้งสองชนิดมีลักษณะต่างกัน โดยสาหร่ายช่อพริกไทยมีลักษณะอวบน้ำมากกว่า ผลการทดลองหาน้ำหนักแห้งของสาหร่ายทั้งสองชนิด ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายหนามจะมีน้ำหนักแห้ง (Dry Weight: D.W.) มากกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเปียก (Fresh weight: F.W.) ของสาหร่ายทั้งสองชนิดในปริมาณที่เท่ากันสาหร่ายช่อพริกไทยจะมีปริมาณของน้ำหนักสาหร่ายที่แท้จริงน้อยกว่าสาหร่ายหนาม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าของอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการใช้น้ำหนักเปียกเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสาหร่ายก็ยังคงมีความจำเป็นเมื่อพิจารณาถึงสภาพที่เป็นจริงเมื่อมีการนำสาหร่ายไปใช้กับระบบบำบัดน้ำทิ้ง

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักแห้งของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*)

น้ำหนักเปียกสาหร่าย; F. W. (กรัม)	น้ำหนักแห้งสาหร่าย; D. W. (กรัม)	(D.W./F.W.)* 100
9.9355	0.589	5.93%
10.4247	0.6092	5.84%
9.1296	0.5141	5.63%
8.8915	0.492	5.53%
9.335	0.5148	5.51%
ค่าเฉลี่ย =		<u>5.69±0.19%</u>

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักแห้งของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

น้ำหนักเปียกสาหร่าย; F. W. (กรัม)	น้ำหนักแห้งสาหร่าย; D. W. (กรัม)	(D.W./F.W.)* 100
5.6758	0.4689	8.26%
5.1532	0.4201	8.15%
4.9246	0.4108	8.34%
4.6113	0.3952	8.57%
5.0044	0.4064	8.12%
ค่าเฉลี่ย =		<u>8.29±0.18%</u>

4.4 การเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามในห้องปฏิบัติการ

4.4.1 การศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ของสาหร่ายช่อพริกไทยในห้องปฏิบัติการ

การทดลองนี้ทำในสภาพปลอดเชื้อ โดยนำสาหร่ายช่งน้ำหนักเปียกประมาณ 40 กรัม มาผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายโดยใช้ยาปฏิชีวนะตามวิธีดังภาพที่ 3.6 จากนั้นนำมาแช่ในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ที่ผ่านการนิ่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำปริมาตร 3 ลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ครั้ง โดยใช้ระยะเวลาการทดลองต่างกัน ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1

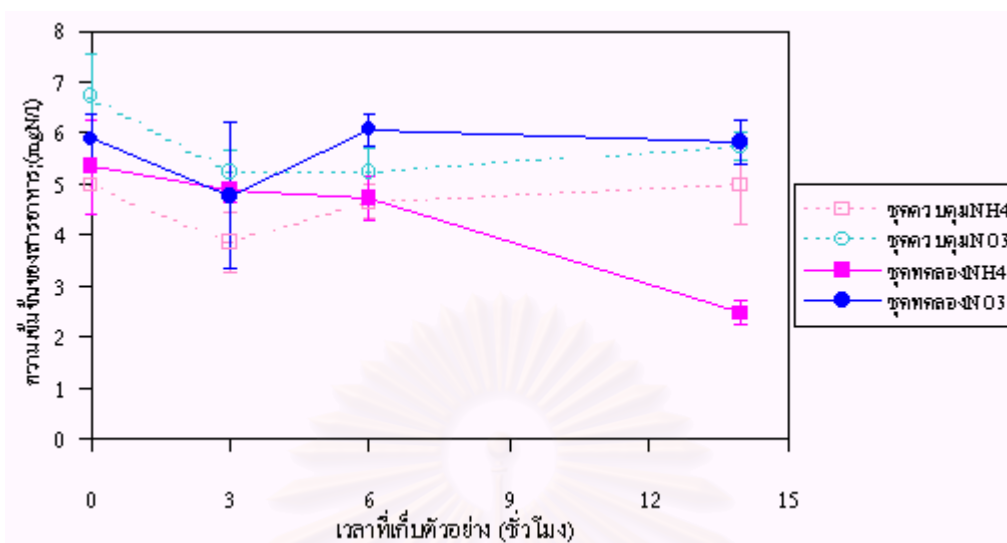
การทดลองครั้งที่ 1 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ใช้เวลาประมาณ 18 ชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ในน้ำมีความเข้มข้นเท่ากันประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองในภาพที่ 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นว่า เมื่อในน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทในปริมาณที่เท่ากัน สาหร่ายช่อพริกไทยจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ก่อนที่จะเลือกใช้ไนเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ยังไม่พบแนวโน้มการใช้ไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทย จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองครั้งที่สองโดยขยายระยะเวลาการทดลองเป็น 24 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่ 2

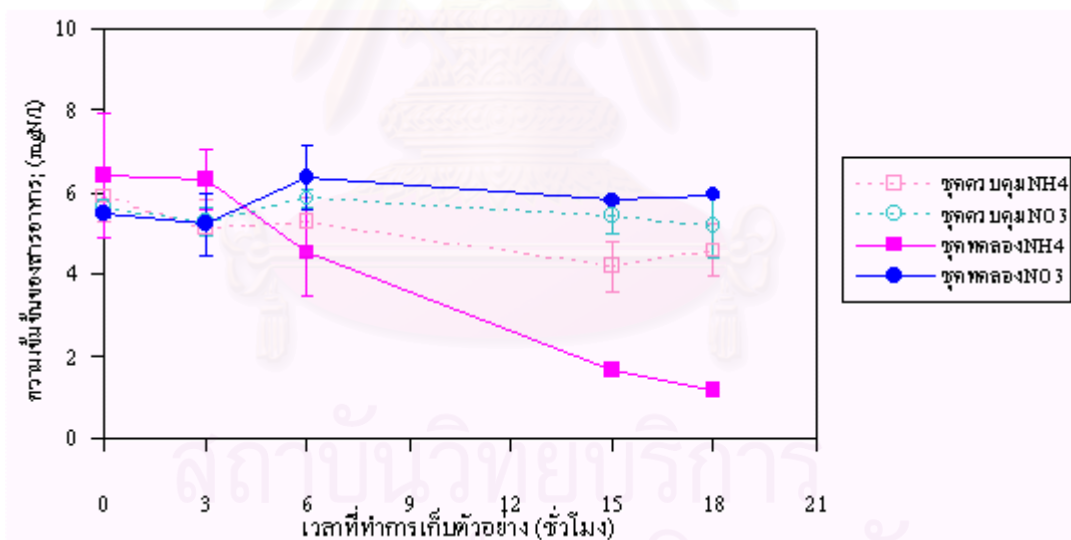
การทดลองครั้งที่ 2 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ใช้ระยะเวลาการทดลองประมาณ 24 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ใช้เวลาประมาณ 26 ชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทเริ่มต้นเท่ากันประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนของสาหร่ายมีลักษณะเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1 คือ สาหร่ายช่อพริกไทยจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ก่อนที่จะเลือกใช้นิเตรท ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่สาหร่ายใช้เริ่มหมดประมาณชั่วโมงที่ 24 พอดี จึงยังไม่พบแนวโน้มการใช้ไนเตรทของสาหร่าย จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมในระยะที่สามโดยขยายระยะเวลาการทดลองเป็น 72 ชั่วโมง และลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมลง

การทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 3 ได้ขยายระยะเวลาการทดลองเป็น 72 ชั่วโมง และลดความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมเหลือเท่ากับ 2 mgN/l ส่วนความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าเท่าเดิมประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองพบว่ามีลักษณะเดียวกับผลการทดลองในระยะที่หนึ่งและสอง คือ สาหร่ายช่อพริกไทยจะเลือกใช้แอมโมเนียมก่อนไนเตรท จนกระทั่งแอมโมเนียมเริ่มหมดประมาณชั่วโมงที่ 24 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไนเตรทปริมาณสูงกว่าแอมโมเนียมก็ไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย สำหรับแนวโน้มการเปลี่ยนมาใช้ไนเตรทแทนแอมโมเนียมของสาหร่ายช่อพริกไทยหลังชั่วโมงที่ 24 นั้นเห็นผลไม่ชัดเจนแม้ว่าปริมาณแอมโมเนียมในน้ำจะลดลงจนหมดแล้วก็ตามดังแสดงในภาพที่ 4.20

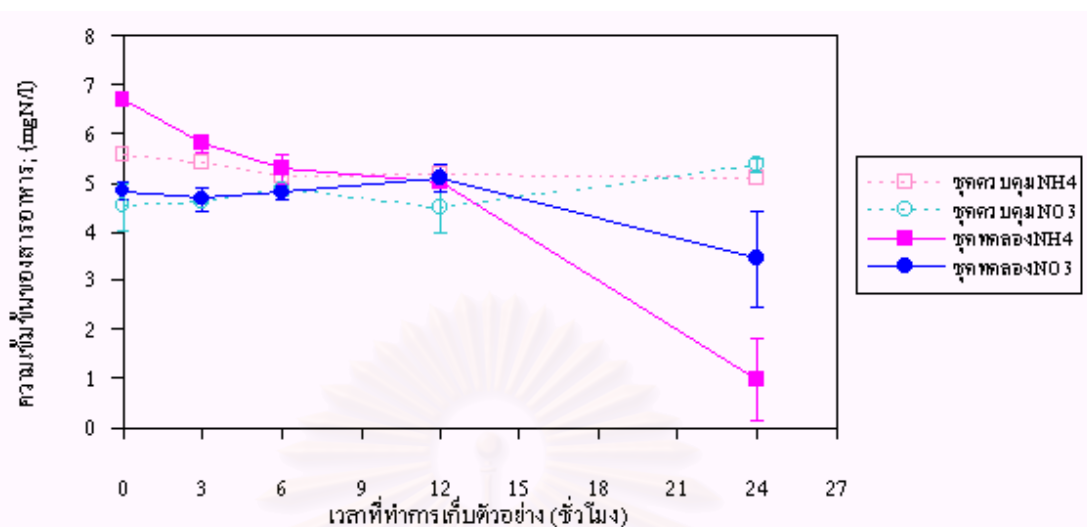


ภาพที่ 4.16 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ของชุดการทดลองที่ใส่สาหร่ายช่อพริกไทย เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย ใช้ระยะเวลาทดลอง 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 5)

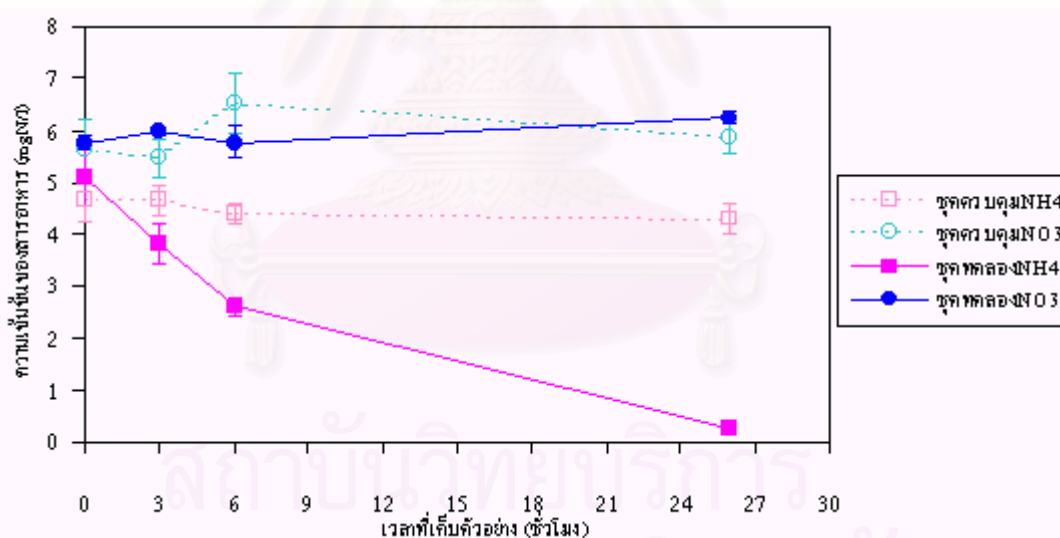


ภาพที่ 4.17 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ของชุดการทดลองที่ใส่สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 6)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดควบคุม NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดทดลอง NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย
 ชุดทดลอง NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย

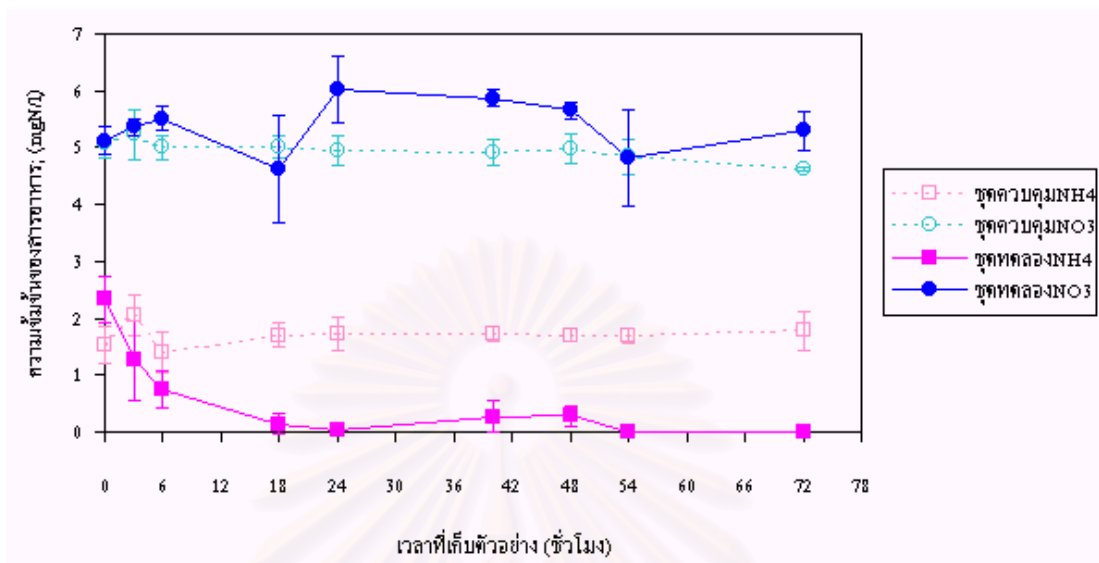


ภาพที่ 4.18 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สำหรับช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 7)



ภาพที่ 4.19 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สำหรับช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 8)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH_4^+ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดควบคุม NO_3^- คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดทดลอง NH_4^+ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย
 ชุดทดลอง NO_3^- คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย



ภาพที่ 4.20 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลา ที่ใส่สาหร่ายช่อพริกไทย ใช้ระยะเวลาทดลอง 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3 ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 9)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดควบคุม NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดทดลอง NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย
 ชุดทดลอง NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายช่อพริกไทย

4.4.2 การศึกษาการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) และไนเตรท (NO₃⁻-N) ของสาหร่ายหนามในห้วงปฏิบัติการ

ทำการทดลองในสภาพปลอดเชื้อ เช่นเดียวกับการศึกษาในสาหร่ายช่อพริกไทย และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ครั้ง เช่นเดียวกัน ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 1 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ใช้เวลาประมาณ 18 ชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) และไนเตรท (NO₃⁻-N) ในน้ำมีความเข้มข้นเท่ากันประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองมีลักษณะเดียวกับการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทยโดยสาหร่ายหนามจะเลือกใช้แอมโมเนียมก่อนไนเตรท แต่สาหร่าย

หนามสามารถทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำลดลงเร็วกว่าการใช้สาหร่ายช่อพริกไทย ดังแสดงในภาพที่ 4.21 และ 4.22 การทดลองในระยะแรกยังไม่พบแนวโน้มการใช้ในเตรทเช่นเดียวกัน จึงได้มีการขยายระยะเวลาการทดลองออกเป็น 24 ชั่วโมง

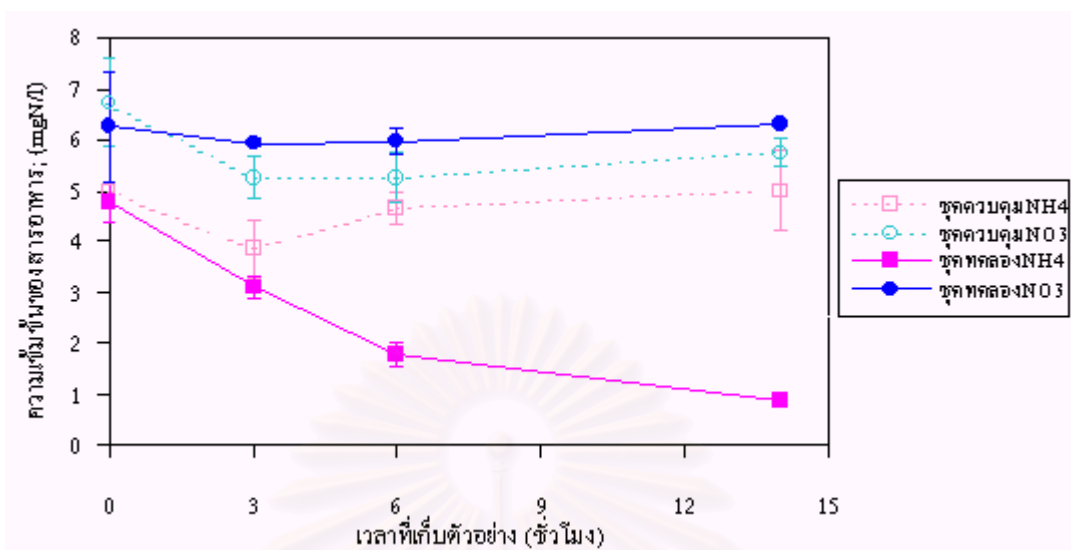
การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ใช้ระยะเวลาการทดลองประมาณ 24 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ใช้เวลาประมาณ 26 ชั่วโมง และมีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทในน้ำเริ่มต้นเท่ากันประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทย คือสาหร่ายหนามจะเลือกใช้สารอาหารที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อนไนเตรท แต่อัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนามจะมีค่าสูงกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย สำหรับแนวโน้มการใช้ไนเตรทหลังจากเมื่อแอมโมเนียมเริ่มหมดประมาณชั่วโมงที่ 20 ยังเห็นผลไม่ชัดเจนดังภาพที่ 4.23 และ 4.24

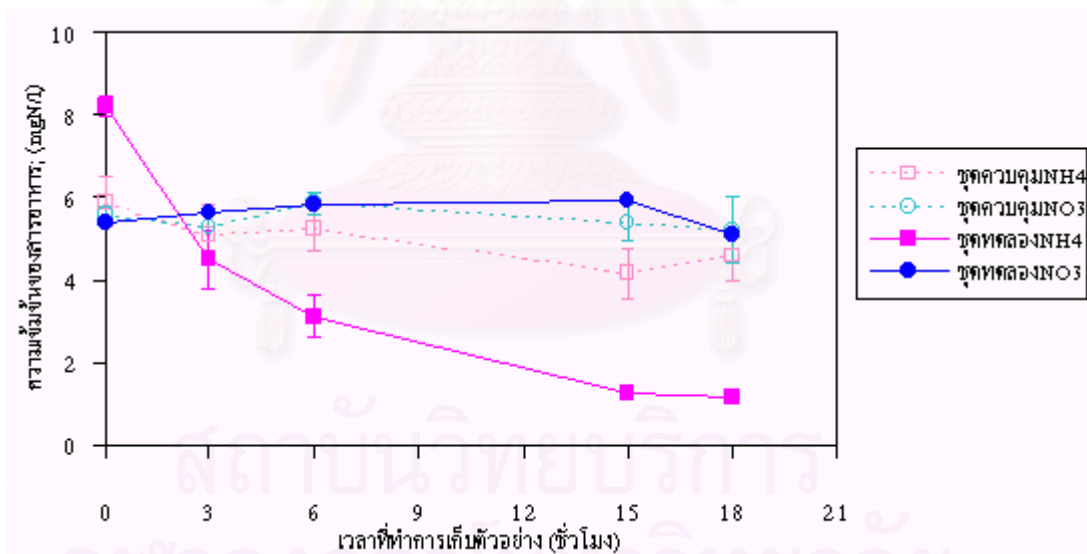
การทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 3 ได้ขยายระยะเวลาการทดลองเป็น 72 ชั่วโมง และลดความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมเหลือเท่ากับ 2 mgN/l ส่วนความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าเท่าเดิมประมาณ 5 mgN/l ผลการทดลองพบว่ามีลักษณะเดียวกับผลการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทย คือสาหร่ายหนามจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อนไนเตรท จนกระทั่งปริมาณแอมโมเนียมเริ่มหมดประมาณชั่วโมงที่ 8 และความเข้มข้นของไนเตรทที่มากกว่าแอมโมเนียมก็ไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์สาหร่ายหนามเช่นเดียวกัน แต่อัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์โดยสาหร่ายหนามจะมีค่าอัตราการนำเข้าสูงกว่าในสาหร่ายช่อพริกไทย สำหรับแนวโน้มการใช้ไนเตรทโดยสาหร่ายหนามเห็นผลไม่ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 4.25

สำหรับผลการทดลองในชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย พบว่าค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง เพราะทำการทดลองในสภาพปลอดเชื้อโดยมีการนำน้ำทะเลมาล้างด้วยไอน้ำเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำทะเลตามธรรมชาติ ดังนั้นแบคทีเรียจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ ส่วนค่าความเข้มข้นของไนเตรทพบว่ามีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกัน

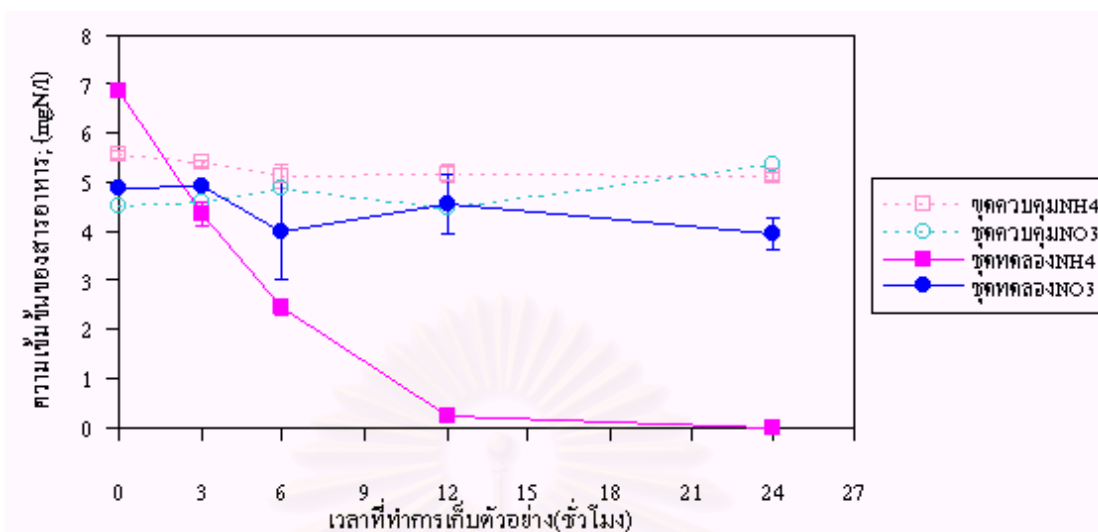


ภาพที่ 4.21 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 10)

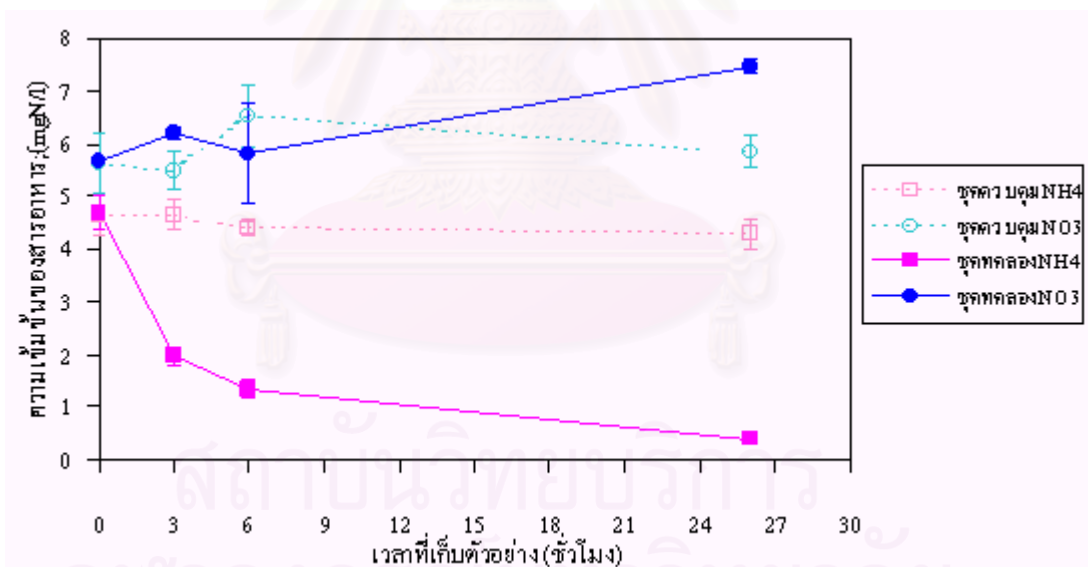


ภาพที่ 4.22 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 11)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดควบคุม NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดทดลอง NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายหนาม
 ชุดทดลอง NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายหนาม

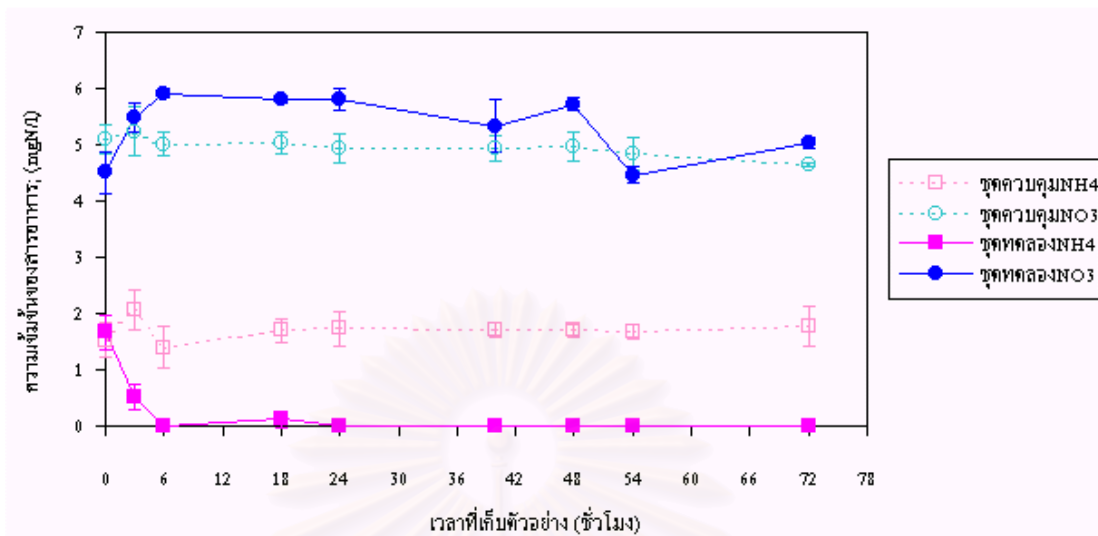


ภาพที่ 4.23 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สารฆ่าหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 12)



ภาพที่ 4.24 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สารฆ่าหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2) ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 13)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสารฆ่า
 ชุดควบคุม NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสารฆ่า
 ชุดทดลอง NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สารฆ่าหนาม
 ชุดทดลอง NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลนิ่งด้วยไอน้ำ + สารฆ่าหนาม



ภาพที่ 4.25 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม และไนเตรท (mgN/l) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้รับสาหร่ายหนาม ใช้ระยะเวลาทดลอง 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3 ข้อมูลแสดงในตารางผนวกที่ 14)

หมายเหตุ : ชุดควบคุม NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดควบคุม NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ ไม่มีสาหร่าย
 ชุดทดลอง NH₄⁺ คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายหนาม
 ชุดทดลอง NO₃⁻ คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำทะเลหนึ่งด้วยไอน้ำ + สาหร่ายหนาม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดมีความสามารถในการลดปริมาณแอมโมเนียมในน้ำได้อย่างรวดเร็วหลังจากนำสาหร่ายลงแช่ในน้ำที่มีแอมโมเนียมความเข้มข้นสูง ส่วนผลการทดลองที่ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำไม่มีแนวโน้มที่จะลดลงเลย แม้ว่าปริมาณของแอมโมเนียมในน้ำจะเหลือน้อยอาจเนื่องจากสาหร่ายยังคงมีปริมาณไนโตรเจนที่สะสมไว้ในเซลล์อยู่สูง (ศิริวรรณ คัดประเสริฐ, 2538) สำหรับการที่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายหนามสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียม (NH₄⁺-N) ในน้ำได้ดีกว่าในสาหร่ายช่อพริกไทย ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับข้อมูลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนาม (หัวข้อ 4.2) ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่า V_{max} และ K_m ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสูงกว่าไนเตรท และพบว่าสาหร่ายหนามสามารถนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้เร็วกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย เนื่องจากสาหร่ายสามารถนำแอมโมเนียมไป

ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างกรดอะมิโนได้โดยตรง ในขณะที่การใช้ไนเตรตจะต้องเปลี่ยนไนเตรตให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อน เซลล์จึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นแอมโมเนียมจึงเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่ (Lobban and Harrison, 1994)

นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นอีกว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมและไนเตรตในน้ำมีปริมาณเท่ากัน สาหร่ายหนามและสาหร่ายช่อพริกไทยจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ก่อนที่จะเลือกใช้ไนเตรต ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) และปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตที่สูงกว่าแอมโมเนียมก็ไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการเลือกใช้แอมโมเนียม และไนเตรตในสาหร่ายชนิดต่างๆ เช่น ในรายงานของ สุชาติ อิงธรรมจิตร และสมโภชน์ ทวีศรี (2535) ที่กล่าวว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถใช้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียมได้ดีกว่าไนเตรต กล่าวคือเมื่อมีทั้งแอมโมเนียมและไนเตรตอยู่ในอาหารเลี้ยงสาหร่ายแล้ว สาหร่ายจะใช้แอมโมเนียมก่อน ซึ่งแสดงว่าแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจนอย่างดีที่สุดสำหรับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

Keeney (1970) อ้างโดย เกรียงไกร แก้วสุรลิขิต (2537) กล่าวว่า แอมโมเนียมจะถูกใช้เป็นอันดับแรก ส่วนไนเตรตเป็นสารประกอบที่พบในธรรมชาติน้อย ซึ่งบางส่วนเกิดจากแบคทีเรียเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในโตรเจน เช่น โปรตีนและกรดอะมิโน มาเป็นสารอนินทรีย์ในโตรเจนคือ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และเป็นไนเตรตในที่สุด ซึ่งแพลงก์ตอนพืชจะนำไนเตรตไปใช้ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อน และ Neori and Shpigel (1999) ซึ่งทำการทดลองในบ่อบำบัดน้ำทิ้งโดยใช้สาหร่ายทะเลชนิด *Ulva lactuca* และ *Gracilaria conferta* พบว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมเป็นส่วนใหญ่ ในกรณีที่มีทั้งแอมโมเนียมและไนเตรตในน้ำสาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียมจนหมดก่อนจึงจะใช้ไนเตรต นอกจากนี้ Cloern and DeBoer (1978) พบว่าแอมโมเนียมเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนของสาหร่าย *Cryptomonas ovata* เพราะสาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียมจนหมดก่อนจึงจะเปลี่ยนมาเลือกใช้ไนเตรต และ *C. ovata* สามารถใช้แอมโมเนียมแทนสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนแทนสารที่จำเป็นตัวอื่นที่สาหร่ายไม่สามารถใช้ได้ในตอนกลางคืน และในที่น้ำลึก โดยเฉพาะไนเตรตนั้นจะต้องใช้แสงเป็นปัจจัยที่สำคัญ สำหรับการทดลองในสาหร่ายทะเล เช่น *Laminaria saccharina* และ *Nereocystis luetkeana* จากกระชังเลี้ยงปลาแซลมอน (Ahn et al., 1998) *Laminaria longicuris* (Harlin and Craigie, 1978) *Laminaria saccharina* (Subander et al., 1993) และสาหร่าย *Hypnea*

musciformis และ *Macrocystis pyrifera* (Haines and Wheeler, 1978) ผลการทดลองไม่พบการยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจากปริมาณไนเตรทความเข้มข้นสูง และไม่พบการยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจากปริมาณของแอมโมเนียมที่เพิ่มขึ้นในน้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้

อย่างไรก็ตามยังมีสาหร่ายอีกหลายชนิดที่มีพฤติกรรมการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่แตกต่างออกไป เช่น ในรายงานของ Hanisak and Harlin (1978) พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำมีผลยับยั้งการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย *Codium fragile* และการทดลองของ Elia and DeBoer (1978) พบการยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายสีแดงชนิด *Neogardhiella baileyi* และ *Gracilaria foliifera* เนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ ส่วนการทดลองของ Topinka (1978) ในสาหร่ายสีน้ำตาลชนิด *Fucus spiralis* พบว่าสาหร่ายชนิดนี้สามารถนำทั้งแอมโมเนียม และไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายได้พร้อมๆ กัน โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่สูงกว่าไนเตรทหรือปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทที่สูงกว่าแอมโมเนียมก็ไม่มีผลยับยั้งการนำสารอาหารทั้งสองชนิดเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย

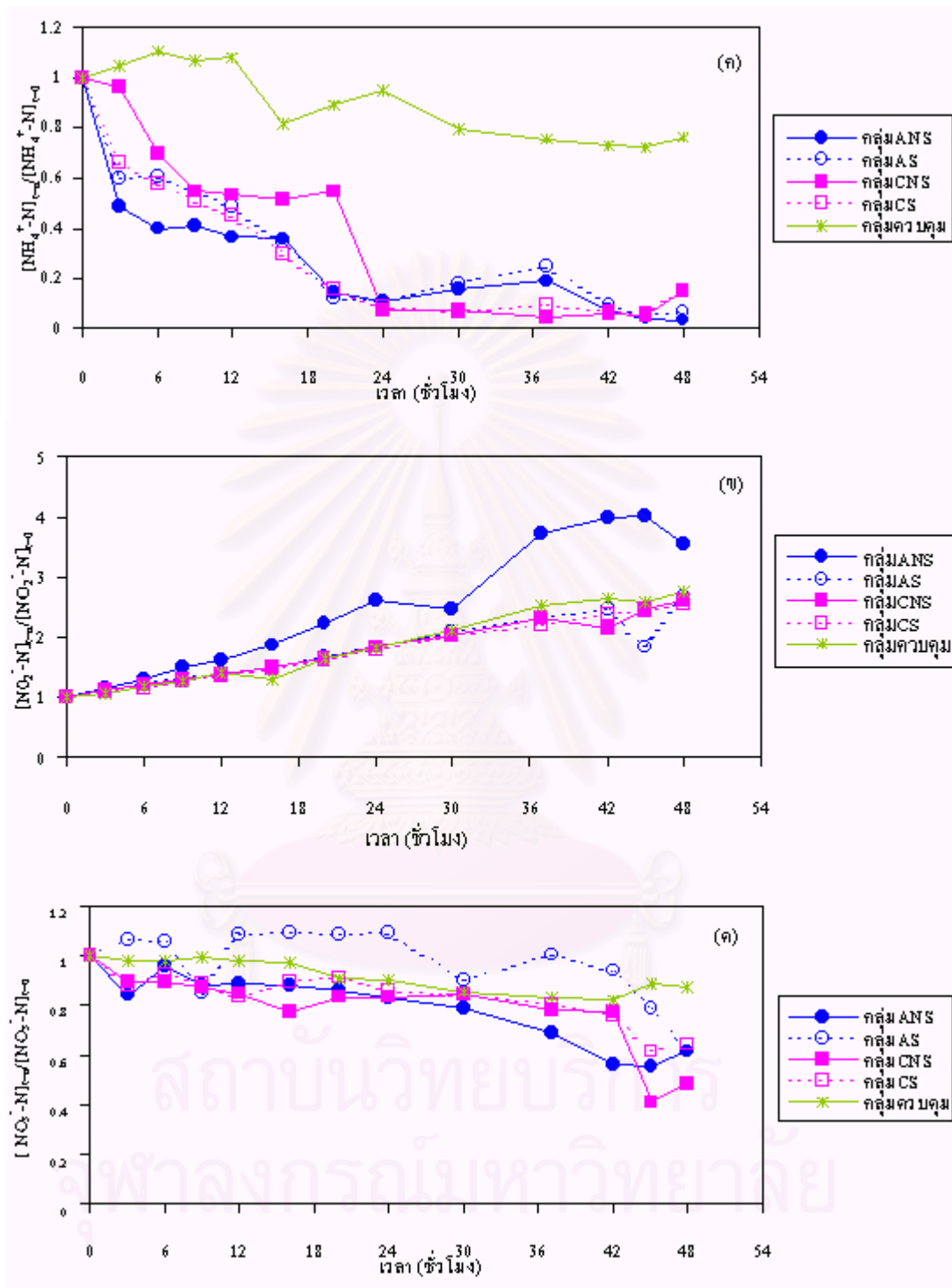
4.5 ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในสภาพแสงธรรมชาติเปรียบเทียบกับทำให้แสงคงที่ตลอดในห้องปฏิบัติการ

4.5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม ที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรีย

จากการศึกษาผลของแบคทีเรียต่ออัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายในหัวข้อ 4.2.1.1 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของแอมโมเนียมในน้ำเกิดจากผลของสาหร่ายนำเข้าสู่เซลล์โดยตรงประมาณหนึ่งในสาม ส่วนอีกสองในสามจะเป็นผลของแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ และแบคทีเรียที่บริเวณผิวของสาหร่ายที่นำมาทดลอง แต่เนื่องจากในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งมีแบคทีเรียอยู่แล้วตามธรรมชาติ การทดลองในครั้งนี้จึงทดสอบการกำจัดเฉพาะแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายเท่านั้น โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย และชุดที่ไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรีย เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย โดยดำเนินการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองในสภาวะที่ให้แสงในสภาพแสงธรรมชาติและสภาวะที่ให้แสงที่ระดับความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ ซึ่งเป็นระดับอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการ

(ก) การทดลองภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ

การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม ในชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ ใช้ระยะเวลาทดลองประมาณ 48 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักเปียกของสาหร่ายทั้งสองชนิดในปริมาณที่เท่ากันอย่างละ 200 กรัม ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำปริมาตร 8 ลิตร มีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเริ่มต้นประมาณ $8 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ และไนเตรทประมาณ $2 - 2.5 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่ลดลงในชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 6 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอัตราการลดลงของแอมโมเนียมจะมีค่าไม่คงที่โดยมีแนวโน้มการเพิ่มและลดลงเป็นช่วงๆ ตลอดจนถึงสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 เนื่องจากระดับความเข้มแสงในธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในช่วงกลางวัน และช่วงกลางคืนที่สาหร่ายไม่ได้รับแสง ดังแสดงในภาพที่ 4.26 (ก) ส่วนภาพที่ 4.26 (ข) แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ของไนไตรท์ ($\text{NO}_2^- \text{-N}$) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่าย ผลการทดลองพบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนไตรท์มีการเพิ่มขึ้นตลอดจนถึงสิ้นสุดการทดลอง และพบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายเฉพาะสาหร่ายหนาม ในภาพที่ 4.26 (ค) แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ของไนเตรท ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่าย ผลการทดลองไม่พบความแตกต่างระหว่างสาหร่ายในชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย

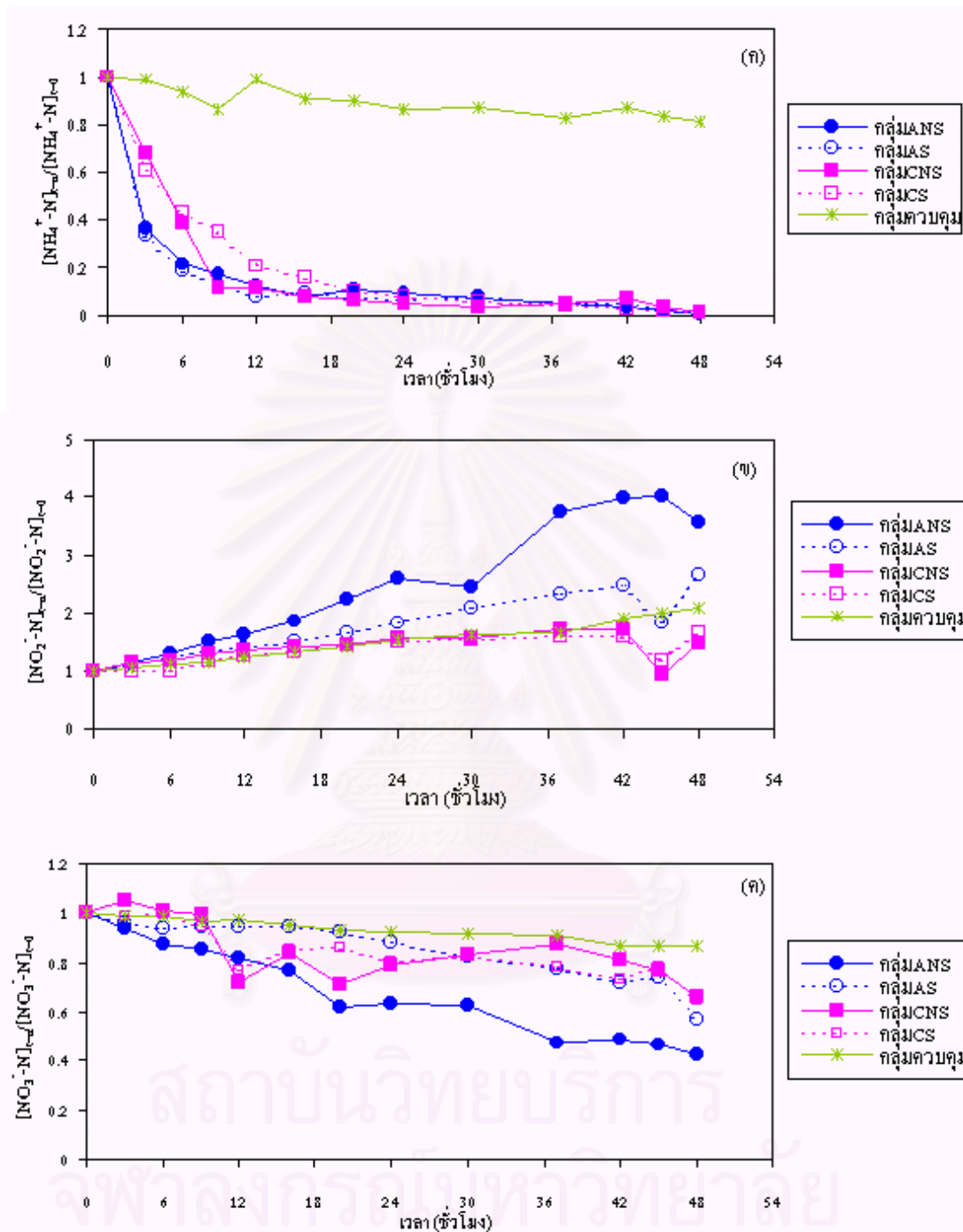


ภาพที่ 4.26 แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียม (ก) ไนไตรท์ (ข) และไนเตรท (ค) แต่ละช่วงเวลาที่ใส่สาหร่ายหนามและสาหร่ายช่อพริกไทยอย่างละ 200 g ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ

หมายเหตุ : ANS คือ สาหร่ายหนามที่ไม่กำจัดแบคทีเรีย, AS คือ สาหร่ายหนามที่กำจัดแบคทีเรีย, CNS คือ สาหร่ายช่อพริกไทยที่ไม่กำจัดแบคทีเรีย, CS คือ สาหร่ายช่อพริกไทยที่กำจัดแบคทีเรีย

(๗) การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดลองนี้ได้เตรียมการทดลองในลักษณะเดียวกับการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ แต่เปลี่ยนมาใช้แสงต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ กล่าวคือไม่พบความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย ส่วนอัตราการลดลงของแอมโมเนียมจะลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 6 จนกระทั่งหมดในชั่วโมงที่ 12 หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจะมีค่าคงที่โดยไม่เพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 ดังภาพที่ 4.27 (ก) ส่วนภาพที่ 4.27 (ข) แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ของไนเตรท ($NO_2^- - N$) ซึ่งมีการเพิ่มขึ้น และพบว่ามีค่าแตกต่างระหว่างชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเฉพาะของสาหร่ายหนาม และภาพที่ 4.27 (ค) แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ของไนเตรท ($NO_3^- - N$) ในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่าย ผลการทดลองพบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมาเฉพาะในสาหร่ายหนาม



ภาพที่ 4.27 แสดงปริมาณสัมพัทธ์ (N/N_0) ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียมในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามอย่างละ 200 กรัม ภายใต้สภาพคงที่ในห้องปฏิบัติการ

หมายเหตุ : ANS คือ สาหร่ายหนามที่ไม่กำจัดแบคทีเรีย, AS คือ สาหร่ายหนามที่กำจัดแบคทีเรีย, CNS คือ สาหร่ายช่อพริกไทยที่ไม่กำจัดแบคทีเรีย, CS คือ สาหร่ายช่อพริกไทยที่กำจัดแบคทีเรีย

4.5.2 ผลของแสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนาม

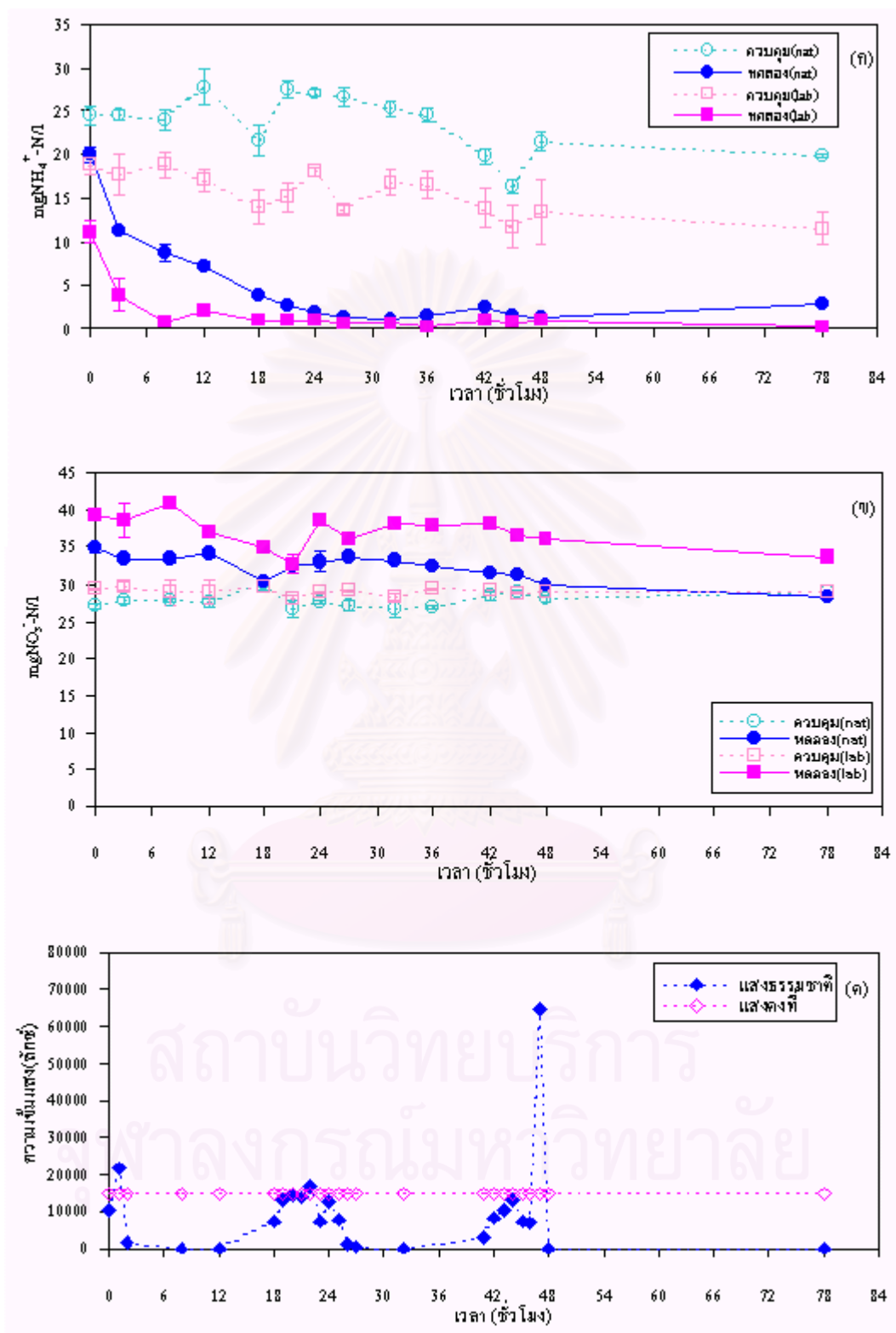
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแสงในธรรมชาติและแสงคงที่ ที่จุดอิมตัวของ การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลักซ์ ในห้องปฏิบัติการต่อการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายทั้งสองชนิดจะเลือกแสดงผลของสาหร่าย ในชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่าย เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมา ในหัวข้อ 4.5.1 ไม่พบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายทั้งสองชนิด ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแสงในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำจึงไม่ต้องคำนึงถึงผลของแบคทีเรียที่ติดอยู่บริเวณผิวของสาหร่าย

4.5.2.1 ผลของแสงในธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*)

การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแสงในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ครั้ง ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 78 ชั่วโมง และใช้น้ำหนักเปียกของสาหร่ายช่อพริกไทยประมาณ 300 กรัม ใส่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำปริมาตร 8 ลิตรมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้นประมาณ 15-20 mgNH₄⁺-N/l ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.28 (ก) พบว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการมีอัตราการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมอย่างรวดเร็ว และมีการลดลงอย่างสม่ำเสมอโดยไม่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีกหลังจากสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ เนื่องจากพบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 78 ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากเป็นช่วงเวลากลางคืนที่สาหร่ายไม่ได้รับแสง (ภาพที่ 4.28 (ค)) เพราะการทดลองในสภาพแสงธรรมชาตินั้นระดับความเข้มแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในช่วงกลางวัน และช่วงกลางคืนที่สาหร่ายไม่ได้รับแสง ส่วนภาพที่ 4.28 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำหลังจากแช่สาหร่ายที่ช่วงเวลาต่างๆ ผลการทดลองไม่พบแนวโน้มการใช้ไนเตรทของสาหร่ายช่อพริกไทยทั้งในสภาพแสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าสูงประมาณ 35-40 mgNO₃⁻-N/l



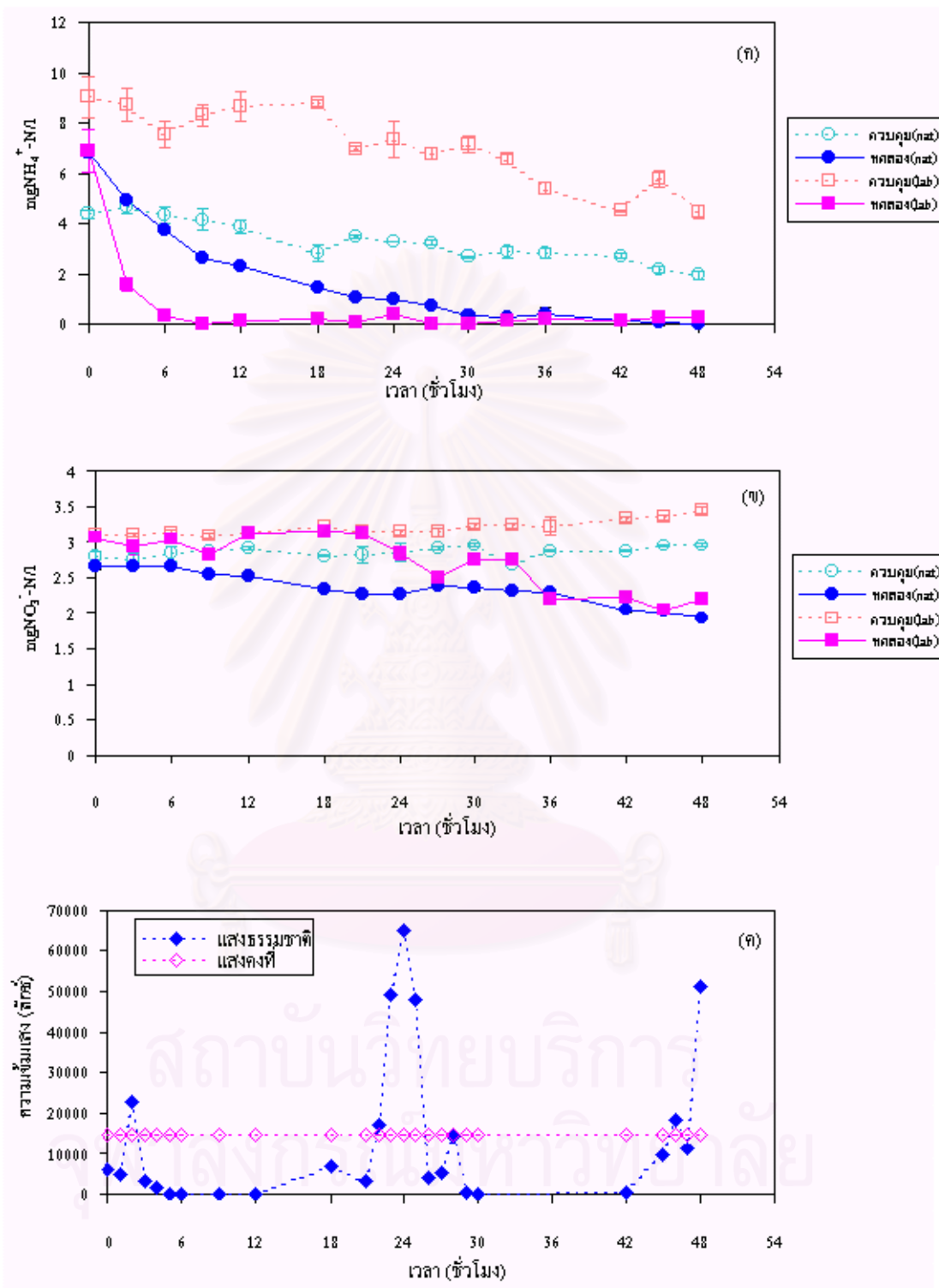
ภาพที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียม และ ไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย 300 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 48 ชั่วโมง ใช้สาหร่ายช่อพริกไทยน้ำหนักเปียกประมาณ 300 กรัม และมีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมประมาณ $7 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 1 คือ ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมของชุดทดลองในห้องปฏิบัติการมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอมากกว่าชุดทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ โดยพบว่าในสภาพแสงคงที่ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจะหมดประมาณชั่วโมงที่ 6 และไม่พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีก ส่วนในสภาพแสงธรรมชาติพบว่าหมดประมาณชั่วโมงที่ 30 และไม่พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีกหลังจากสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 ดังภาพที่ 4.29 (ก) เนื่องจากยังเป็นช่วงเวลากลางวันและระดับความเข้มแสงยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 20,000-50,000 ลักซ์ ดังภาพที่ 4.29 (ค)

ภาพที่ 4.29 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใช้สาหร่ายและมีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นประมาณ $2.5\text{-}3 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ผลการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่ให้แสงคงที่ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดการทดลองและการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทยังเห็นผลไม่ชัดเจน ส่วนในชุดทดลองให้แสงในสภาพธรรมชาติพบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทลดลงจากตอนเริ่มต้น โดยมีการลดลงครั้งแรกประมาณชั่วโมงที่ 18 หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นมาอีกเล็กน้อยประมาณชั่วโมงที่ 24 และเริ่มลดลงอีกครั้งประมาณชั่วโมงที่ 36 จนสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มต้นทดลองและพบว่ามีแนวโน้มลดลงอีก การลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำนี้สอดคล้องกับระดับความเข้มแสงที่วัดได้ในธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.29 (ค)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



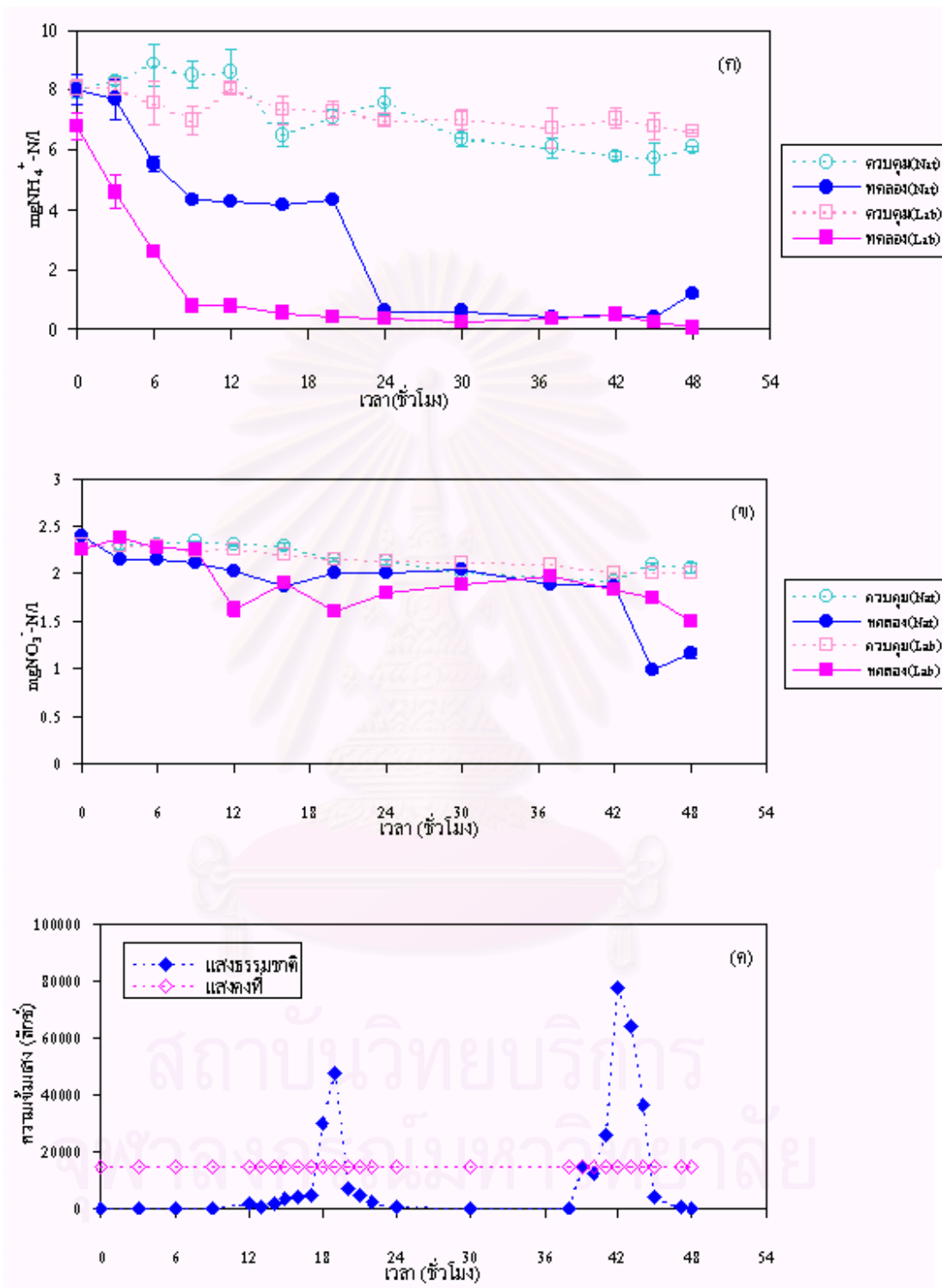
ภาพที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียม และ ไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย 300 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 3 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 48 ชั่วโมง ลดน้ำหนักของสาหร่ายช่อพริกไทยลงเหลือประมาณ 200 กรัม และมีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมประมาณ 7–8 mgNH₄⁺-N/l ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 คือ ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมของชุดทดลองในห้องปฏิบัติการมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอมากกว่าชุดทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ โดยพบว่าในสภาพแสงคงที่ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจะหมดประมาณชั่วโมงที่ 6 และไม่พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีกเพราะได้รับแสงคงที่ประมาณ 15,000 ลักซ์ ตลอดการทดลอง สำหรับในสภาพแสงธรรมชาติพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำหมดประมาณชั่วโมงที่ 24 และพบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีกหลังจากสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 ดังภาพที่ 4.30 (ก) เนื่องจากเป็นช่วงเวลากลางคืนซึ่งสาหร่ายไม่ได้รับแสงดังภาพที่ 4.30 (ค) ทำให้สาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้จึงมีผลต่อการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายโดยตรง

ภาพที่ 4.30 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่ายและมีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นประมาณ 2–2.5 mgNO₃⁻-N/l ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองในครั้งที่ 2 คือ ชุดการทดลองที่ให้แสงคงที่ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง และการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทยังเห็นผลไม่ชัดเจน ส่วนในชุดทดลองให้แสงในสภาพธรรมชาตินั้นพบว่าไนเตรทในน้ำมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นในธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.30 (ค) โดยพบว่าปริมาณไนเตรทมีแนวโน้มลดลงประมาณชั่วโมงที่ 12 และ 36 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 พบว่าระดับความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นช่วงเวลากลางคืนที่สาหร่ายไม่ได้รับแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียและไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย 200 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนีย (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 3

4.5.2.2 ผลของแสงในธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายหนาม (*Acanthophora spicifera*)

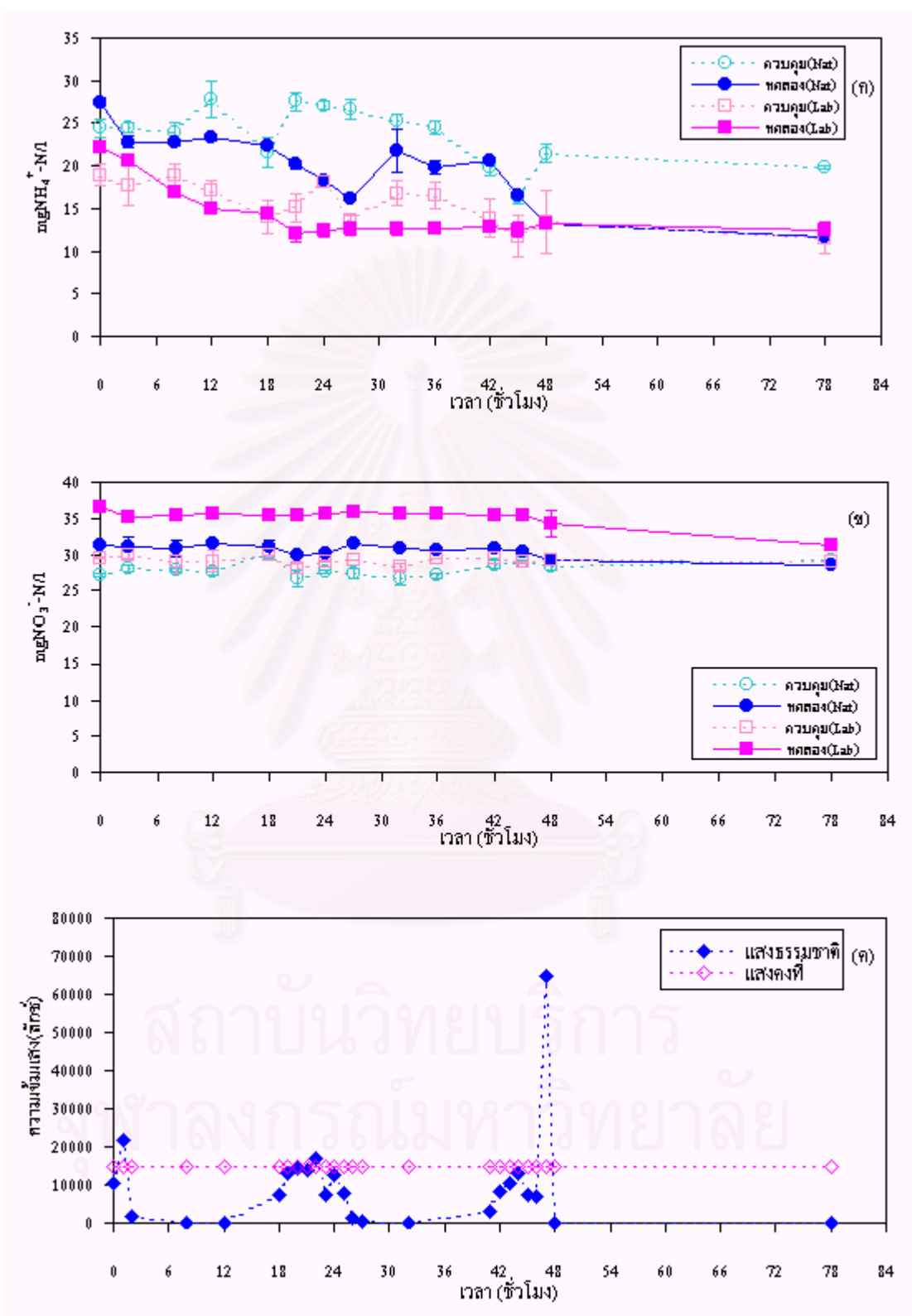
การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแสงในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของสาหร่ายช่อพริกไทย แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ครั้ง ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 78 ชั่วโมง และใช้น้ำหนักเปียกของสาหร่ายหนามประมาณ 150 กรัม ใส่ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำปริมาตร 8 ลิตร มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้นประมาณ 20 - 30 mgNH₄⁺-N/l ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลอง ครั้งที่ 1 ในสาหร่ายช่อพริกไทย คือ ชุดการทดลองที่ได้รับแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการจะมีอัตราการลดลงของแอมโมเนียมรวดเร็วและสม่ำเสมอว่าชุดการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติ เมื่อสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 78 พบว่าค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำยังมีค่าเหลืออยู่ค่อนข้างสูง เนื่องจากน้ำหนักของสาหร่ายที่ใช้มีน้อยเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 4.31 (ก)

ภาพที่ 4.31 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ใส่สาหร่ายและมีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นประมาณ 30 - 35 mgNO₃⁻-N/l ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสาหร่ายช่อพริกไทยครั้งที่ 1 คือ ไม่พบแนวโน้มการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

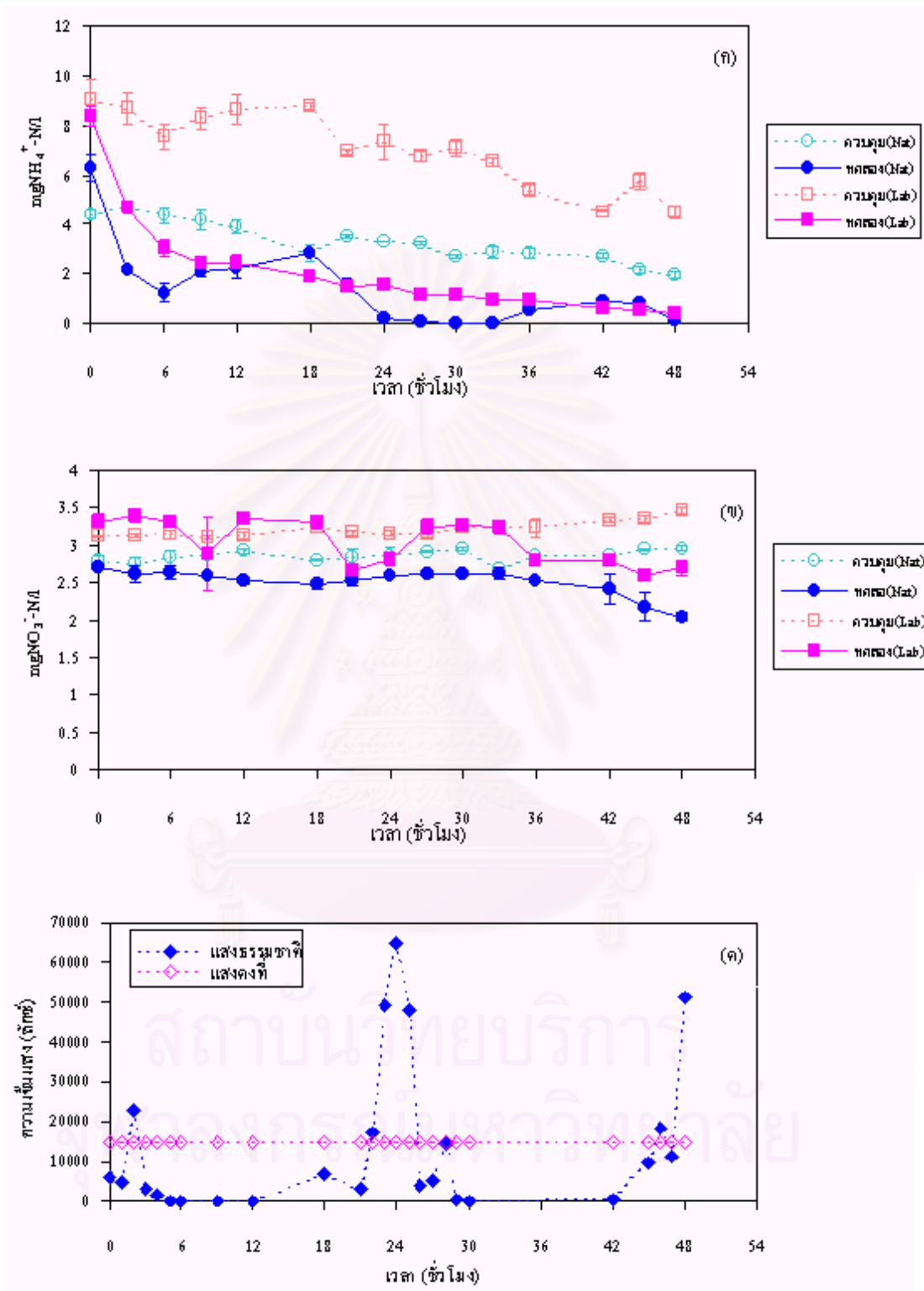


ภาพที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียม และ ไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม 150 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 48 ชั่วโมง และใช้สาหร่ายหนามน้ำหนักเปียกประมาณ 150 กรัม มีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเริ่มต้นประมาณ $7-8 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 2 ในสาหร่ายช่อพริกไทย คือ ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในชุดทดลองที่ให้แสงคงที่ในห้องปฏิบัติการจะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แต่อัตราการลดลงโดยสาหร่ายหนามจะน้อยกว่าในชุดทดลองที่ใช้สาหร่ายช่อพริกไทยเนื่องจากปริมาณน้ำหนักเปียกที่ใช้ในสาหร่ายช่อพริกไทยจะมากกว่าสาหร่ายหนามถึง 2 เท่า ส่วนผลการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติพบว่าอัตราการลดลงของแอมโมเนียมค่อนข้างไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับกรที่ให้แสงคงที่ (ภาพที่ 4.32 (ก)) เพราะปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆ เนื่องจากระดับความเข้มแสงธรรมชาติไม่คงจึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายลดลง (ภาพที่ 4.32 (ค))

ภาพที่ 4.32 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่ายและมีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นประมาณ $2.5-3.5 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 2 ในสาหร่ายช่อพริกไทย คือ พบว่าในชุดการทดลองที่ให้แสงคงที่ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง และการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทยังเห็นผลไม่ชัดเจน ส่วนในชุดทดลองที่ให้แสงในสภาพธรรมชาติพบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยเห็นผลการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทประมาณชั่วโมงที่ 42 และพบแนวโน้มว่าจะมีการลดลงอีกหลังจากสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 ซึ่งสอดคล้องกับระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 42 และหลังจากสิ้นสุดการทดลอง ดังภาพที่ 4.32 (ค)



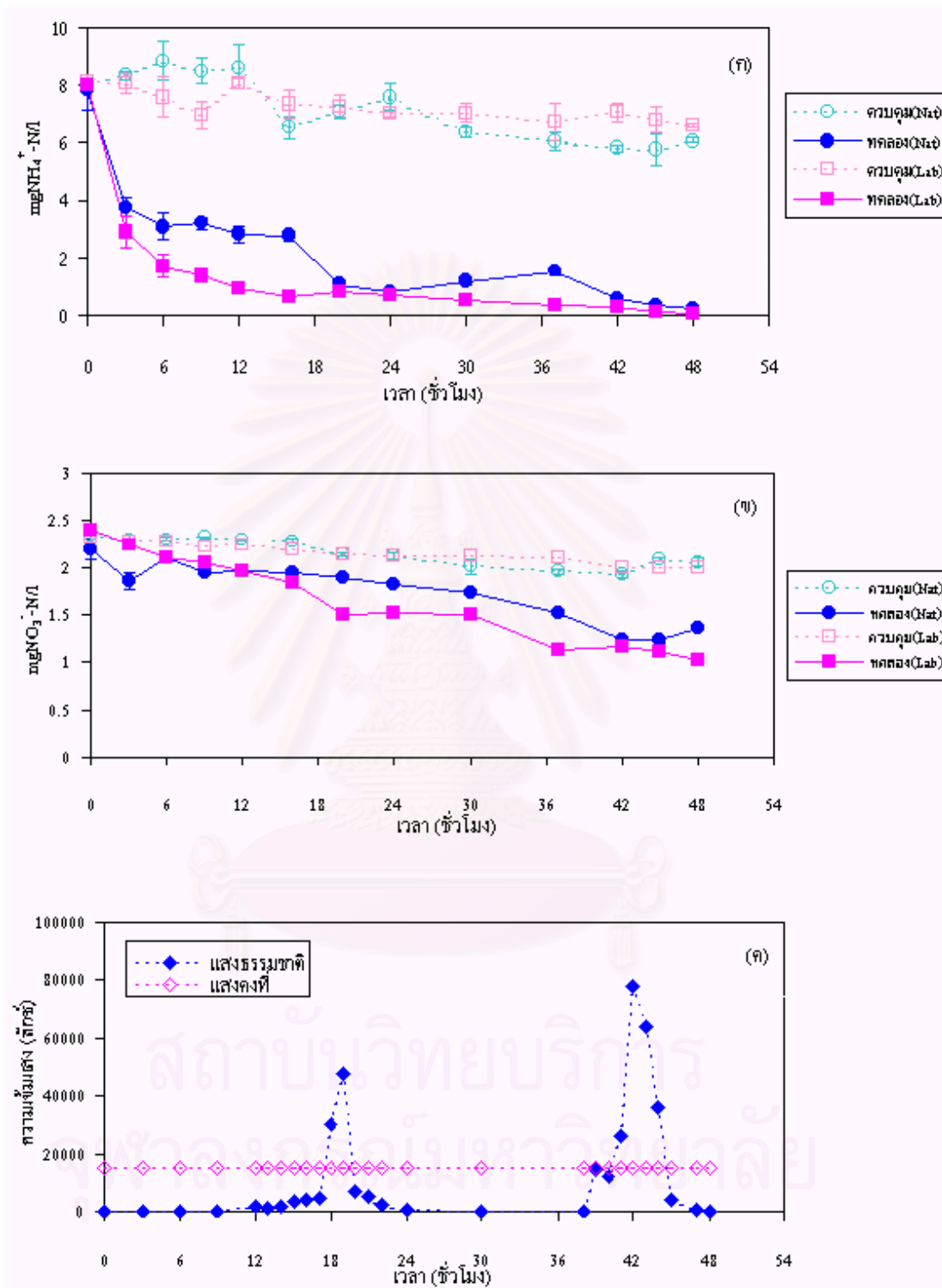
ภาพที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียม และ ไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม 150 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 3 ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 48 ชั่วโมง และเพิ่มน้ำหนักเปียกของสาหร่ายหนามให้เท่ากับสาหร่ายช่อพริกไทยคือประมาณ 200 กรัม และมีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเริ่มต้นประมาณ $7-8 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 3 ในสาหร่ายช่อพริกไทย คือ ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในชุดทดลองที่ให้แสงคงที่ในห้องปฏิบัติการจะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอโดยไม่พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอีกหลังจากสิ้นสุดการทดลอง ส่วนการทดลองที่ให้แสงในธรรมชาติพบว่า การลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำมีการลดลงและเพิ่มขึ้นเป็นช่วงๆ (ภาพที่ 4.33 (ก)) ซึ่งสอดคล้องกับระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นและลดลงในธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 4.33 (ค)

ส่วนภาพที่ 4.33 (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำแต่ละช่วงเวลาที่ได้สาหร่าย และมีความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้นประมาณ $2-2.5 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ผลการทดลองพบการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทอย่างชัดเจนทั้งในชุดการทดลองที่ให้แสงคงที่และชุดการทดลองที่ให้แสงในธรรมชาติ แต่ในชุดการทดลองที่ให้แสงคงที่จะมีอัตราการลดลงสูงกว่าการทดลองในชุดที่ให้แสงในธรรมชาติและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ หลังจากสิ้นสุดการทดลองเนื่องจากปริมาณของแอมโมเนียมในน้ำที่หมดในชั่วโมงที่ 48 และการได้รับแสงคงที่ตลอดการทดลองทำให้สาหร่ายสามารถสังเคราะห์แสงและเปลี่ยนมาเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรทแทนแอมโมเนียมที่หมดไป สำหรับในชุดการทดลองพบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 48 ซึ่งสอดคล้องกับระดับความเข้มแสงที่ลดลงจนเป็นศูนย์ในธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 4.33 (ค)

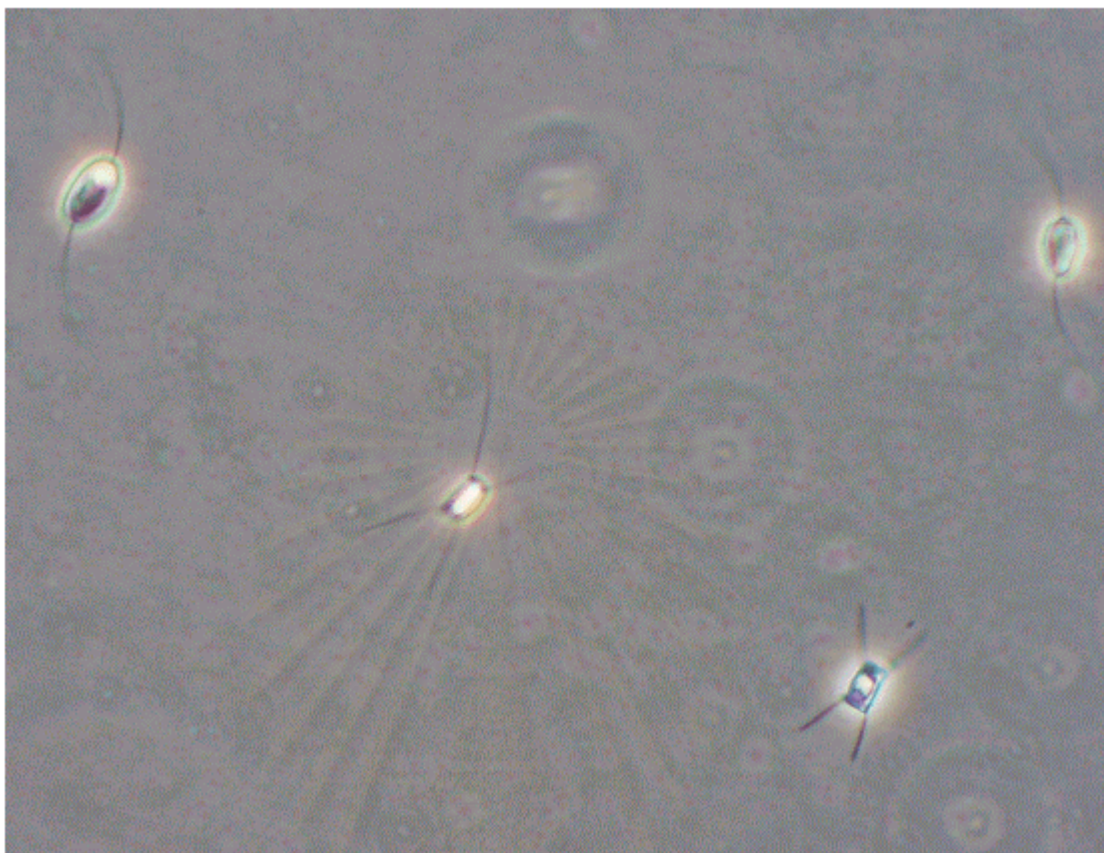
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบการให้แสงธรรมชาติและแสงคงที่ในห้องปฏิบัติการต่อการนำแอมโมเนียม และ ไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม 200 g ในน้ำทะเล 8 ลิตร (ก) แสดงปริมาณแอมโมเนียม (ข) แสดงปริมาณไนเตรท และ(ค) แสดงความเข้มแสงในระหว่างการทดลองครั้งที่ 3

สำหรับผลการทดลองในชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายทั้งในสภาพแสงธรรมชาติและแสงคงที่ภายในห้องปฏิบัติการผลการทดลองทั้งสามครั้งพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำมีอัตราการลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากผลของแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถเจริญอยู่ในน้ำที่จกบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำและตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป และอาจมีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนไตรท์ และไนเตรทได้ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification)

จากการสังเกตสีที่ปรากฏของน้ำในชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายพบว่าน้ำมีลักษณะสีเหลืองขุ่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่ทดลองและเมื่อนำน้ำจากชุดควบคุมไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่ามามีไดอะตอมพวก *Chaetoceros* sp. แสดงไว้ในภาพที่ 4.34 ซึ่งสามารถใช้แอมโมเนียมได้เช่นเดียวกับสาหร่าย และมักพบอยู่ในน้ำที่จกบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเสมอเนื่องจากผู้ประกอบการนิยมใช้เป็นอาหารเลี้ยงกุ้งวัยอ่อน ดังนั้นค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่ลดลงส่วนหนึ่งอาจเกิดจากผลของไดอะตอมและแพลงก์ตอนบางชนิดในน้ำ ที่สามารถใช้สารอาหารได้เช่นเดียวกับสาหร่าย ส่วนปริมาณค่าความเข้มข้นของไนไตรท์ และไนเตรทในชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายนั้นพบว่าไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

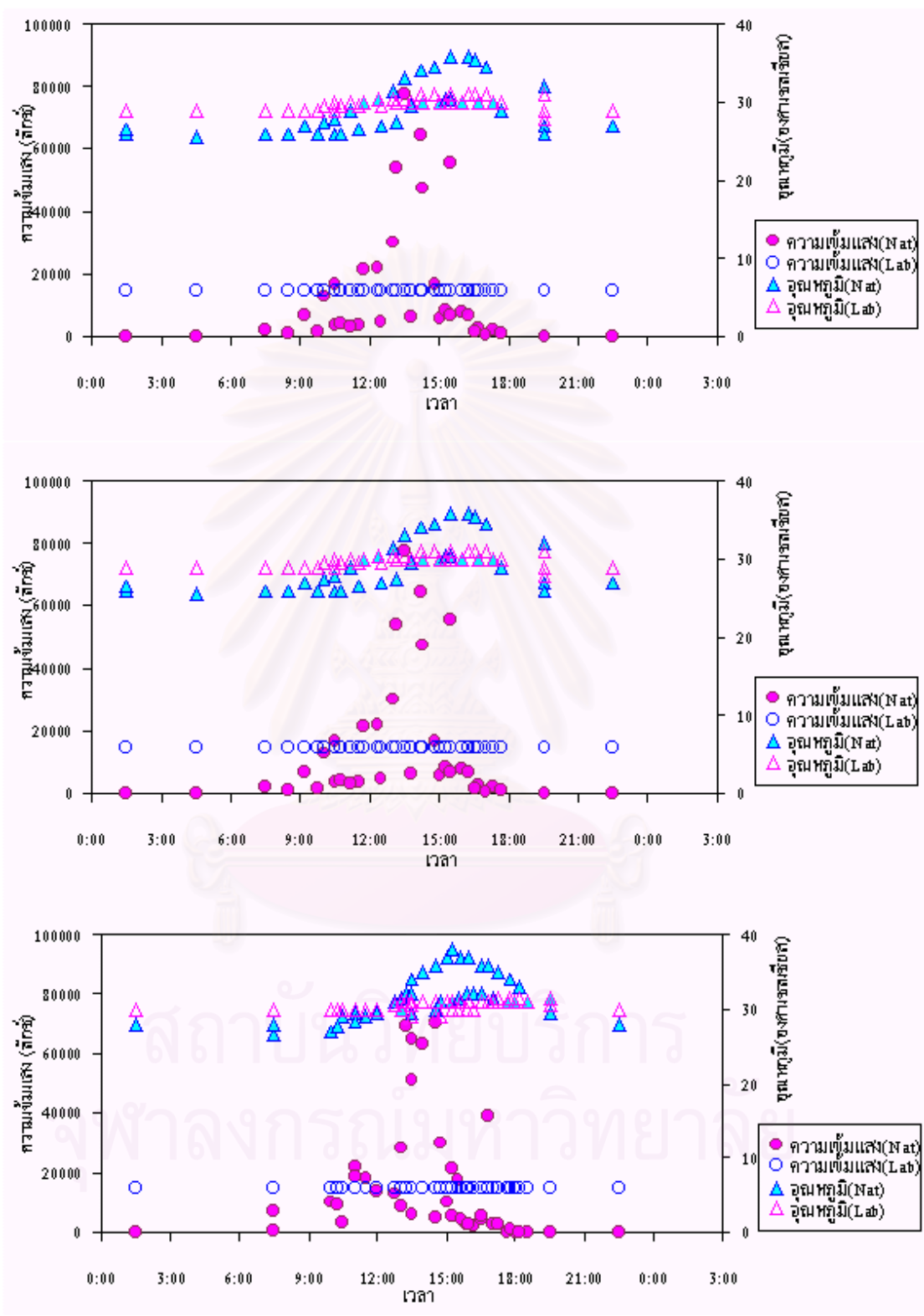


ภาพที่ 4.34 ภาพถ่ายไดอะตอม *Chaetoceros* sp. ซึ่งตรวจพบในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำของชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิในสภาพแสงธรรมชาติและแสงในห้องปฏิบัติการระหว่างการทดลองในครั้งที่ 1, 2 และ 3 แสดงไว้ในภาพที่ 4.35 จากการวัดผลทั้งสามครั้งพบว่า มีลักษณะคล้ายกัน คือ อุณหภูมิในน้ำจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นในธรรมชาติ โดยค่าความเข้มแสงจะมีค่าเฉลี่ยสูงในช่วงกลางวันตั้งแต่เวลา 11:00–16:00 น. ที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 – 20,000 ลักซ์ ซึ่งเป็นระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามที่ใช้ในการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ แต่บางครั้งระดับความเข้มแสงในธรรมชาติบางช่วงของการทดลองที่มีค่าสูงมากในเวลากลางวัน จากการทดลองครั้งที่ 2 พบว่ามีค่าความเข้มแสงสูงถึงประมาณ 80,000 ลักซ์ การที่สาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มไม่คงที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการใช้สาหร่ายในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเช่นกัน

ผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 แสดงให้เห็นว่า แม้สาหร่ายจะได้รับแสงแดดเต็มที่ในตอนกลางวันก็ไม่ได้ส่งผลให้สาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการที่ปล่อยสาหร่ายไว้ในบ่อที่ได้รับแสงโดยตรงจะทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนขึ้นจนบางครั้งน้ำมีการแยกชั้นของอุณหภูมิ (thermal stratification) และอาจทำให้สาหร่ายตายหรือเสื่อมสภาพได้ (สรวิศ เผ่าทองสุข, 2543) นอกจากนี้ผลการทดลองในสภาพแสงธรรมชาติยังมีแนวโน้มว่าค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำมีอัตราการลดลงไม่สม่ำเสมอ โดยพบว่าหลังจากเมื่อค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำหมดแล้วก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใหม่อีก เนื่องจากระดับความเข้มแสงในธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในช่วงกลางวัน และช่วงกลางคืนที่สาหร่ายไม่ได้รับแสงทำให้สาหร่ายต้องใช้เวลาในการปรับสภาพเซลล์ให้เข้ากับสภาวะที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต



ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของชุดทดลองในธรรมชาติ และห้องปฏิบัติการ การของการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. สาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามมีจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 – 20,000 ลักซ์
2. แบคทีเรียในน้ำและแบคทีเรียที่ติดมากับสาหร่ายมีผลต่อการลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำ
3. จลนพลศาสตร์ของการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยในชุดการทดลองที่ให้แสงมีค่า $V_{max} = 0.0897 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$; $K_m = 18.5822 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ส่วนในสาหร่ายหนามมีค่า $V_{max} = 0.3406 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/g(fw)/hr}$; $K_m = 50.9554 \text{ mgNH}_4^+ \text{-N/l}$ ดังนั้นสาหร่ายหนามมีประสิทธิภาพในการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย
4. จลนพลศาสตร์ของการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทยมีค่า $V_{max} = 0.0175 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$; $K_m = 40.1094 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ส่วนในสาหร่ายหนามมีค่า $V_{max} = 0.0425 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/g(fw)/hr}$; $K_m = 90.0506 \text{ mgNO}_3^- \text{-N/l}$ ดังนั้นสาหร่ายหนามมีประสิทธิภาพในการนำไนเตรทสู่เซลล์ได้ดีกว่าสาหร่ายช่อพริกไทย
5. สาหร่ายช่อพริกไทยและสาหร่ายหนามจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมก่อนไนเตรทเสมอ โดยความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำไม่มีผลยับยั้งการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทั้งสองชนิด
6. ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำจะลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อให้สาหร่ายได้รับแสงคงที่ที่จุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องปฏิบัติการ

ข้อเสนอแนะ

1. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามควรวีให้แสงที่จุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มแสงประมาณ 15,000 – 20,000 ลักซ์ หากเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกลางแจ้งควรมีแผ่นกรองแสงประมาณ 40% ช่วยลดระดับความเข้มแสงที่มีความเข้มสูงในตอนเที่ยงวัน เพื่อป้องกันการเกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photoinhibition) ของสาหร่าย
2. ควรมีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามในรูปแบบของสารอาหารชนิดอื่นที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งจากนาุ้ง เช่น ฟอสฟอรัส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบบำบัดน้ำทิ้ง
3. ควรมีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการนำสารประกอบไนโตรเจนในรูปแบบของแอมโมเนียมและไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งโดยใช้สาหร่ายชนิดต่างๆ เพื่อคัดเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งที่ดีที่สุด และอาจใช้ร่วมกันหลายๆ ชนิดในบ่อน้ำทิ้งเพื่อบำบัดสารอาหารแต่ละชนิด
4. ควรจะนำค่า V_{max} และ K_m มาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มที่ประกอบกิจกรรมเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ โดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทย และสาหร่ายหนามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบบำบัดน้ำทิ้งโดยใช้สาหร่ายสองชนิดนี้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กาญจนภานันท์ ลีวมนอนต์. 2527. สาหร่าย. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- กาญจนภานันท์ ลีวมนอนต์, สุจินต์ ดีแท้, อุดม สิทธิภู่งประเสริฐ, ปิยะพงศ์ โชติพันธ์, ลิขิต ชูจิต และ ประเสริฐ พลอยประดับ. 2536. รายงานการวิจัยเรื่องการคัดเลือกชนิดของสาหร่ายวุ้นเพื่อการเพาะเลี้ยง. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 135 หน้า.
- เกรียงไกร แก้วสุรลิขิต. 2537. การใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* (Xia & Abbott) Abbott, Zhang & Xia ช่วยลดปริมาณแอมโมเนีย, ไนโตรเจน, ไนเตรต, และฟอสเฟต ในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 82 หน้า.
- คณิต ไชยคำ และคุณิต ตันวิไลย์. 2535. การทดลองใช้หอยแมลงภู่และสาหร่ายผสมนางำบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. ในรายงานการสัมมนาวิชาการประจำปี. สถาบันวิจัยเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง: 413-423.
- ชลอ ลิมสุวรรณ. 2535. คัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. ฐานเศรษฐกิจ. กรุงเทพฯ. 202 หน้า.
- เชาวน์ ชิโนรักษ์ และพรณี ชิโนรักษ์. (2528). ชีววิทยา 3. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 510 หน้า.
- ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิตยา เลาหะจินดา. 2528. นิเวศวิทยา. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 289 น.
- นรินทร์ ชาติตพันธ์. 2539. น้ำเปลี่ยนสี. วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 1 ฉบับที่ 3 (พ.ค.-มิ.ย. 39): 39-43.
- ปัญญา สุวรรณสัญญา. 2531. การลดมลภาวะในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ. การเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 133-134.
- พัชรา วีระกะลัส. 2541. เอมไซม์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 344 หน้า.
- พายัพ ชัยปักษิ. 2543. บทบรรณาธิการ. ใน วารสารสัตว์น้ำ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 132 สิงหาคม. หน้า 4.

- พิรุณ วิสุทธิแพทย์ และจิระพรรณ สุขศิริ. 2540. รายงานการวิจัยการใช้สาหร่ายบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. หน้า 56-81.
- เม็ก แอนเดอร์สัน. 2533. การควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อมของน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา ใน รายงาน การสัมมนาเชิงวิชาการ ปัญหาสิ่งแวดล้อมในเขตพื้นที่การเลี้ยงกุ้งทะเล บริเวณก้นอ่าวไทย, ณ โรงแรมริเจนท์ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี, กรมประมง: 25-31.
- มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 214 หน้า.
- ยงยุทธ์ ปริดาลัมพะบุตร เพิ่มศักดิ์ เฟิงมาก พุทธ ส่องแสงจินดา สุภโยก สุวรรณมณี และวิชาญ ชูสุวรรณ. 2532. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 10/2532. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง สงขลา. 20 น.
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2540. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 103-104.
- วรรณนิภา เพ็ญนัฏคร. 2539. การใช้แบคทีเรียเป็นโพรไบโอติกเสริมในอาหารกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวรรณ สิงห์ทวีศักดิ์ และฐิติมา ทองศรีพงษ์. 2544. การเลี้ยงสาหร่ายผสมนางร่วมกับกุ้งกุลาดำในบ่อดิน. วารสารเพื่อนชาวกุ้ง ฉบับที่ 24 ปีที่ 2: 35-44 .
- ศิริวรรณ คิดประเสริฐ. 2538. การใช้สาหร่ายทะเลช่วยลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์นิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 90 หน้า.
- สิริ ทูกษ์วินาศ. 2527. ผลของ Nitrite-Nitrogen และ Ammonia-Nitrogen ต่ออัตราการตายของลูกกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) วัยอ่อนและลูกปลากระพงขาว (*Lates calcarifer*) วัยอ่อน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 6/2537. สถาบันเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา กรมประมง. 32 น.
- สิริ ทูกษ์วินาศ. 2541. แนวทางการปรับวิธีการเลี้ยงกุ้งทะเลตามระบบ ISO 14001. วารสารการประมง 51(3): 249-254.
- สรวิศ เผ่าทองสุข, 2543. สาหร่าย. “ศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศไทย”. เอกสารเผยแพร่ชุดโครงการอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 356 หน้า.

- สุชาติ อิงธรรมจิตร และสม โภชน์ ทวีศรี, 2535. ผลของแอมโมเนียต่อการเจริญของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 130. สถาบันวิจัยประมงน้ำจืด กรมประมง: หน้า 1-5.
- สุรวดี นาคชน. 2539. การลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรด้วยสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. วิทยานิพนธ์นิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อักษร ศรีเปล่ง, 2529. สาหร่าย. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 51 หน้า.

ภาษาอังกฤษ

- Abbott, I.A. and Dawson, E.Y. 1978. Seaweed. 2nd ed. Brown Company Publisher. pp.15-45.
- Allan, G.L., Maguire, G.B. and Hopkins, S.J.1990. Acute and chronic toxicity of ammonia to juvenile *Metapenaeus macleayi* and *Penaeus monodon* and the influence of low dissolved oxygen levels. Aquaculture 91: 265-280 .
- Amat, M.A. and Braud, J.P. 1990. Ammonium uptake by *Chondrus crispus* Stackhouse (Gigartinales; Rhodophyta) in culture. Hydrobiologia 204/205: 467-471.
- Chapman, A.R.O., Markham, J.W. and Lüning, K. 1978. Effect of nitrate concentration on the growth and physiology of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) in culture. Journal of Phycology 14(2): 195-198.
- Chen, J.C. Liu, P.C. and Lei, S.C. 1990. Toxicity of ammonia and nitrite to *Penaeus monodon* adolescent. Aquaculture 89: 127-137.
- Cloern, J.E. and DeBoer, J.A. 1978. Effect of light intensity and temperature on *Cryptomonas ovata* (Cryptophyceae) growth and nutrient uptake rates. Journal of Phycology 13: 389-395.
- Colt, J.E. and Armstrong, D.A. 1981. Nitrogen toxicity to crustaceans, fish and molluscs. In Allen, L.J. and Kinney, E.C. (eds.). Fish Culture Section of American Fisheries Society and the Northeast Society of Conservation Engineer. Bethesda. Maryland. pp. 24-49.
- DeBoer, J.A. 1981. Nutrient. In Lobban, C.S. & Wynne (eds), The Biology of Seaweeds. Oxford: Blackwell Scientific. pp. 356-91.

- Devlin, R.M. and Barker, A.V. 1971. Factors affecting the rate of photosynthesis. In Devlin, R.M and Barker (eds) Photosynthesis. Litton Educational Publishing. p. 251-272.
- Einav, R., Breckle, S. and Beer, S. 1995. Ecophysiological adaptation strategies of some intertidal marine macrophytes of the Israeli Mediterranean coast. Marine Ecology Progressive Series 125: 219-228.
- Elia, C.F. D. and DeBoer, J.A. 1978. Nutritional studies of two red algae. II. Kinetics of ammonium and nitrate uptake. Journal of Phycology 14: 266-272.
- Eppley, R.W. and Thomas, W.H. 1969. Comparison of half-saturation constants for growth and nitrate uptake of marine phytoplankton. Journal of Phycology 5: 375-379.
- Fogg, G.E. 1966. Algal Culture and Phytoplankton Ecology. 2nd ed: The University of Wisconsin Press. 175 p.
- Gómez, I., Wiencke, C. and Thomas, D.N. 1996. Variation in photosynthetic characteristic of Antarctic marine blown alga *Ascoseria mirabilis* in relation to thallus age and size. European Journal of Phycology 31: 167-172.
- Guillard, R.R.L. 1973. Method for microflagellates and nanoplankton. In Stein, J.R. (ed) Handbook of Phycology Method. Cambridge University Press: pp. 69-86.
- Häder, D-P., Herrmann, H., Schäfer, J. and Santas, R. 1996. Photosynthetic fluorescence induction and oxygen production in two Mediterranean *Cladophora* species measure on site. Aquatic Botany 56: 253-264.
- Häder, D-P., Porst, M. Herrmann, H., Schäfer, J. and Santas, R. 1997. Photosynthesis of the Mediterranean green alga *Caulerpa prolifera* measured in the field under solar irradiation. Journal of Photochemistry and Photobiology 37: 66-73.
- Haines, K.C. and Wheeler, P.A. 1978. Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophytes *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta). Journal of Phycology 14: 319-324.
- Hall, D.O. and Rao, K.K. 1994. Photosynthesis (5th ed.) Cambridge University Press, 211p.
- Hanisak, M.D and Harlin, M.M. 1978. Uptake of inorganic nitrogen by *Codium fragile* subsp. *tomentoroides* (Chlorophyta). Journal of Phycology 14: 450-458.

- Harrison, P.J. 1988. Determining phosphate uptake rate of phytoplankton. In Lobban C.S. *et al.* Experiment Phycology a Laboratory manual. Cambridge University Press. 339-343p.
- Harrison, P.J., Druehl, L.D. Lloyd, K.E. and Thompson, P.A. 1986. Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales: Phaeophyta). Marine Biology 93: 29-35.
- Harlin, M.M. and Craigie, J.S. 1978. Nitrate uptake by *Laminaria longicuris* (Phaeophyceae). Journal of Phycology 14: 464-467.
- Herbert, K., Hanelt, D. and Nuitsch, W. 1990. Photoinhibition resistance in the red alga *Porphyra perforata*. The role of photoinhibition repair. Plant Physiology 92: 514-519.
- Kanwisher, J.W. 1966. Photosynthesis and respiration in some seaweed. In Barnes, H. (ed.) Some Contemporary Studies in Marine Science. Allen & Unwin, London, pp. 407-420.
- Keeney, D.R. 1970. Nitrates in plant and waters. Journal of Milk Food Technology 33: 425-432.
- Kopozak, C.D. 1994. Variability of nitrate uptake capacity in *Macrocystis pyrifera* (Laminariales, Phaeophyta) with nitrate and light availability. Journal of Phycology 30 :573-580.
- Kübler, J.E. and Davison, A.I. 1995. Thermal acclimation of light-use characteristics of *Chondrus crispus* (Rhodophyta). European Journal of Phycology 30: 189-195.
- Lavery, P.S. and McComb, A.J. 1991. The nutritional ecophysiology of *Chaetomorpha linum* and *Ulva rigida* in Peel Intel, Western Australia. Botanical Marine 34:251-60.
- Laponite, B.E. and Duke, C.S. 1984. Biochemical strategies for growth of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta) in relation to light intensity and nitrogen availability. Journal of Phycology 20: 488-495.
- Lewmanomont, K. 1998. The seaweed resources of Thailand. In Critchley, A.T, Ohno, M. Largo, D.B. and Gillespie (eds). Seaweed Resources of the world. Kanagawa International Fisheries Training Center, Japan International Cooperation Agency. 70-77 p.
- Lewmanomont, K. and Ogawa, H. 1995. Common seaweeds and seagrasses of Thailand. Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok: Integrate Promotion Technology Co.,Ltd., 164 p.

- Lin, C.K. 2536. Resource recovery from wastewater of intensive shrimp farming. ใน การสัมมนาเรื่องผลกระทบทางบวกของอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ต่อระบบนิเวศน์วิทยา ความอุดมสมบูรณ์ของชายฝั่ง และสภาพเศรษฐกิจ สังคม ในประเทศไทย. 31 มกราคม 2536 ณ โรงแรมหาดแก้วรีสอร์ท จังหวัดสงขลา. หน้า 126-137.
- Lobban, C.S. and Harrison, P.J. 1994. Seaweed Ecology and Physiology. Cambridge University Press. 366p.
- Lüning, K. 1981. Light. In Lobban, C.S. and Wynne, M.J. (eds.), The Biology of Seaweeds. Oxford: Blackwell Scientific. pp. 326-55.
- Meyer, B.S., Anderson, D.B. and Bohning, R.H. 1964. Introduction to Plant Physiology. D. Van Nostrad Company, Inc. 238-365.
- Menasveta, P. 1997. Intensive and efficient shrimp culture system-the Thai way-can save mangroves. Aquaculture Asia: 38-44.
- Neori, A. and Shplgel, M. 1999. Using to treat effluent and feed invertebrates in sustainable integrated mariculture. Journal of the World Aquaculture society 30: pp. 46-51.
- Odum, E.P. 1971. Fundamentals of Ecology. Philadelphia W.B. Saunders Company : 574 p.
- Palmisano, A.C., SooHoo, S.B. and Sullivan, C.W. 1985. Photosynthesis-irradiance relationships in sea ice microalgae from McMurdo Sound, Antarctica. Journal of Phycology 21: 341-346.
- Powtongsook, S., Chokwiwattanawanit, A. and Menasveta, P. 2000. Optimal photosynthetic activities of two macroalgae used in recirculating seawater systems in Thailand. In Menasveta, P. (ed) Marine Biotechnology Application for Sustainable Shrimp Culture. Bangkok: Marine Biotechnology Research Unit. Chulalongkorn university, pp. 162-169.
- Pinchetti, J.L.G., Fernandez, E.D.C., Diez, P.M. and Reina, G.G. 1998. Nitrogen availability influences the biochemical composition and photosynthesis of tank-cultivated *Ulva rigida* (Chlorophyta). Journal of Applied Phycology 10: 383-389.
- Qi, Y.Z. and Zhu, C.J. (1994). A comparative study of nitrate uptake kinetics by two red tide Causative algae. Asian Marine Biology 11: 103-106.

- Qiang, H., Zarmi, Y. and Richmond, A. 1998. Combined effects of light intensity Light-path and culture density on output rate of *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). European Journal of Phycology 33: 165-171.
- Robledo, D.R., Sosa, P.A., Garcia-Reina, G. and Muller, D.G. 1994. Photosynthetic performance of health and virus-infected *Feldlaris irregularis* and *F. simplex* (Phaeophyceae). European Journal of Phycology 30: 189-195.
- Rodrigues, M.A., Yoneshigue-Valentin, Y. and Santos, C.P.D. 1993. A comparative analysis of wild and laboratory grown *Laminaria abyssalis* (Phaeophyta) using modulated fluorescence. Hydrobiologia 260/261: 463-469.
- Sagert, S. Forster, R.M., Feuerpfeil, P. and Schubert, H. 1997. Daily course of photosynthesis and photoinhibition in *Chondrus crispus* (Rhodophyta) from different shore levels. European Journal of Phycology 32: 363-371.
- Smit, A.J. Robertson B.L. and du Preez D.R., 1997. Influence of ammonium-N pulse concentrations and frequency tank condition and nitrogen starvation on growth rate and biochemical composition of *Gracilaria gracilis*. Journal of Applied Phycology 8: 473-481.
- Sosa, P.A., Río, M.J.D and Reina G.G. 1993. Physiological comparison between gametophytes and tetrasporophytes of *Gelidium canariensis* (Gelidiaceae: Rhodophyta). Hydrobiologia. 260/261: 445-449.
- Sprague, J.B., 1972. Measurement of pollutant toxicity to fish, sublethal effects and safe concentration. Water Research 5: 245-266.
- Stein, J.R., 1973. Handbook of phycological methods culture methods and growth measurements. Cambridge University Press. 448 p.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. 2nd ed. Fisheries Research Board of Canada. Ottawa. 310p.
- Subandar, A., Petrell, R.J. and Harrison, P.J. 1993. *Laminaria culture* for reduction of dissolved inorganic nitrogen in salmon farm effluent. Journal of Applied Phycology 5: 455-463.
- Syrett, P.J. (1981). Nitrogen metabolism of microalgae. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 210: 182-210.

- Taylor, M.W. and Rees, T.A.V. 1999. Kinetics of ammonium assimilation in two seaweeds, *Enteromorpha* sp. (Chlorophyceae) and *Osmundaria colensoi* (Rhodophyceae). Journal of Phycology 35: 740-746.
- Thomas, T.E. Harrison, P.J. and Turpin, D.H. 1987. Adaptation of *Gracilaria pacifera* (Rhodophyta) to nitrogen procurement at different intertidal location. Marine Biology 93: 569-580.
- Topinka, J.A. 1978. Nitrogen uptake by *Fucus spiralis* (Phaeophyceae). Journal of Phycology 14: 241-247.
- Underhill, P.A. 1977. Nitrate uptake kinetics and clonal variability in the neritic diatom *Biddulphia aurita*. Journal of Phycology 13: 170-176.
- Vonshak, A. and Guy, R. 1988. Photoinhibition as a limiting factor in outdoor cultivation of *Spirulina platensis*. In Stadler, T. Molliom, J., Verdus, M.-C., Karamanos, Y. Morvan, H. & Christiaen. (eds), Algal Biotechnology. Elsevier Applied Science Publishers. pp. 365-370.
- Whitson, J. Turk, P. and Lee, P. 1993. Biological Denitrification in a Closed Recirculating marine culture System. Aquaculture Engineering Conference. Spokane, WA (USA).pp. 21-23.
- Williams, S.L. 1985. Uptake of sediment ammonium and translocation in a marine green macroalga *Caulerpa cupressoides*. Limnological Oceanography 29(2): 374-379.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อาหารเหลวสูตรดัดแปลงจากสูตรของกิลลาร์ด (Guillard Medium ; F/2)

สูตรอาหารเลี้ยงสาหร่ายประกอบด้วยสารละลาย 3 ส่วนคือ

สารละลายส่วนที่ 1

NaNO ₃	42.074	กรัม
Na ₂ HPO ₄ ·H ₂ O	3.0	กรัม
FeCl ₃	1.45	กรัม
Na ₂ EDTA	5.0	กรัม
Vitamin B1	0.2	กรัม
Vitamin B12	0.001	กรัม
Biotin	0.005	กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

สารละลายส่วนที่ 2

CuSO ₄ ·H ₂ O	1.96	กรัม
ZnSO ₄	4.40	กรัม
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	1.26	กรัม
[หรือใช้ (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O แทน โดยใช้น้ำหนัก 6.43 กรัม]		
MnCl ₂ ·4H ₂ O	36.0	กรัม
CoCl ₂ ·6H ₂ O	2.0	กรัม

เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

สารละลายส่วนที่ 3

สารละลายส่วนที่ 3 เป็นสารละลายที่สกัดจากดิน (soil extract) สกัดโดยเก็บดินบริเวณที่มีต้นไม้ขึ้น ใสในขวดประมาณ $\frac{1}{4}$ ของปริมาตรขวดขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่น้ำจนครบ 1 ลิตร และเติม CaCO_3 ประมาณ 0.05 มิลลิกรัม เพื่อปรับค่า pH จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ (autoclave) เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วจึงนำมากรองเพื่อสกัดเอาแร่ธาตุในดิน

เตรียมอาหารโดยนำสารละลายส่วนที่ 1 และ 3 มาอย่างละ 2 มิลลิลิตร และสารละลายส่วนที่ 2 มา 1 มิลลิลิตร เติมน้ำในน้ำทะเลที่กรองแล้ว 1 ลิตร นำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

(ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์แอมโมเนียม – ไนโตรเจน (NH_4^+ -N/I)

ก. สารเคมีที่ใช้

1. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ไม่มีแอมโมเนียม (de-ionized water)
2. Sodium nitroprusside ; $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. Phenol
4. Sodium citrate
5. Sodium hydroxide ; NaOH
6. Sodium hypochlorite
7. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

ข. การเตรียมสารละลาย

1. Phenol Solution

ละลาย Phenol 20 กรัม ใน 95% v/v ethyl alcohol 200 มิลลิลิตร

2. Sodium nitroprusside Solution

ละลาย $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.0 กรัม ในน้ำกลั่น (de-ionized water) 200 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชาเป็นเวลาอย่างต่ำ 1 เดือน

3. Alkaline Reagent

ละลาย Sodium citrate 100 กรัม และ NaOH 5 กรัม แล้วเจือจางให้เป็น 500 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น (de-ionized water)

4. Oxidizing Reagent

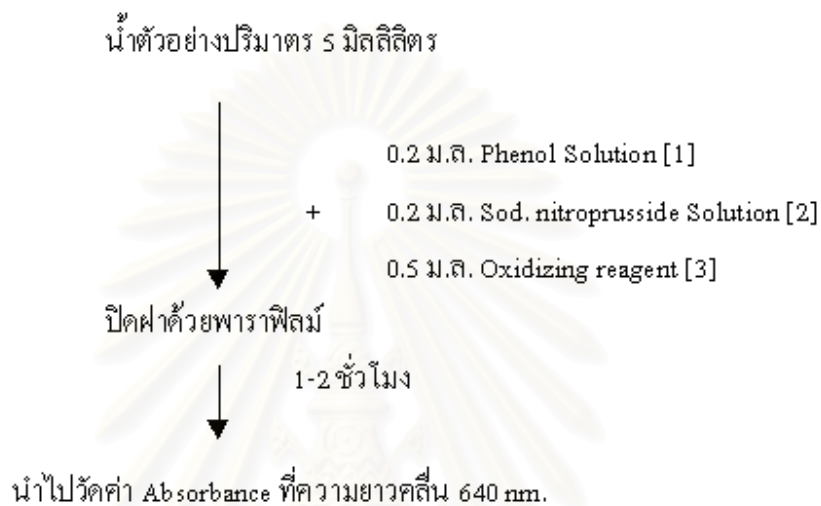
100 มิลลิลิตร Alkaline Reagent [3] รวมกับ 25 มิลลิลิตร Sodium hypochlorite (เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำทดสอบ)

5. Ammonium Stock Solution (เข้มข้น 200 mgNH_4^+ -N/l)

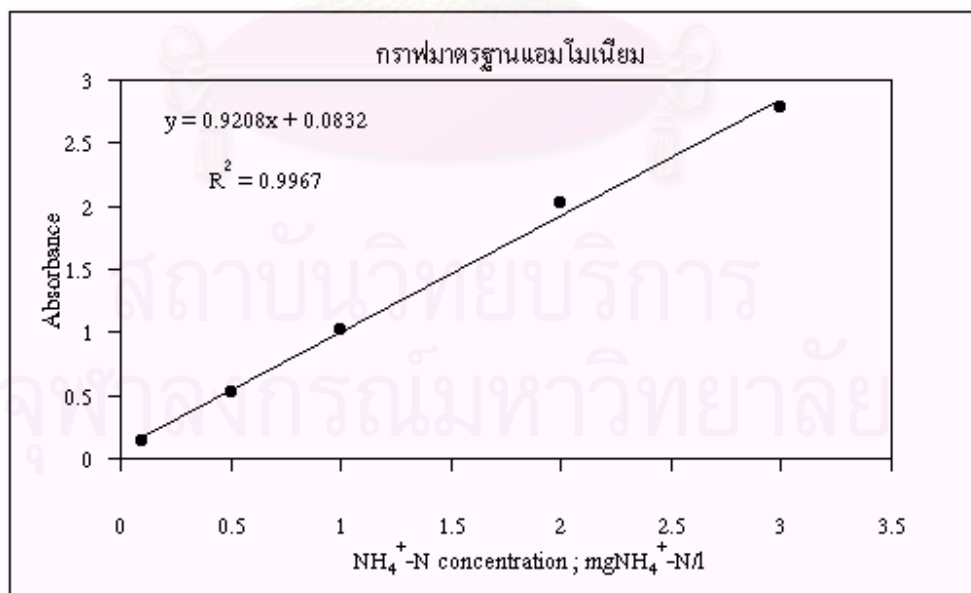
ชั่ง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.9433 กรัม ละลายในน้ำกลั่น (de-ionized water) แล้วเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มิลลิลิตร

ค. ขั้นตอนการวิเคราะห์

ถ้าตัวอย่างน้ำมีสารแขวนลอยให้กรองโดยใช้แผ่นกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอนก่อนนำไปวิเคราะห์



(Strickland and Parsons, 1972)



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนียม-ไนโตรเจน

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ไนไตรท์ – ไนโตรเจน (NO_2^- -N/I)

ก. สารเคมีที่ใช้

1. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ไม่มีไนไตรท์ (Distilled water)
2. Sulphanilamide
3. N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride

ข. การเตรียมสารละลาย

1. Sulphanilamide Solution

เติมกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร แล้วละลาย Sulphanilamide 5 กรัม เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เก็บได้นาน 2-3 เดือน

2. NED Dihydrochloride

ละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชาต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งหรือเมื่อสารละลายมีสีน้ำตาล ควรทำกราฟมาตรฐานใหม่ทุกครั้ง ที่เตรียมสารละลายนี้ใหม่

3. Nitrite Stock Solution (เข้มข้น 10 mgNO_2^- -N/I)

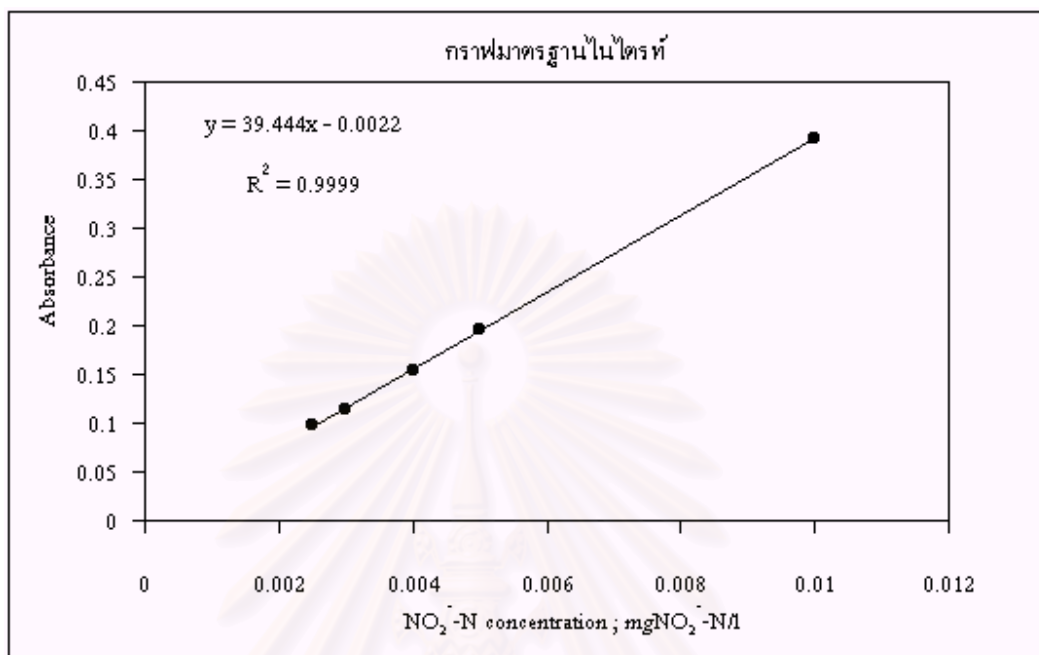
ชั่ง NaNO_2 0.690 กรัม (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C นาน 1 ชั่วโมง) ละลายในน้ำกลั่น (D.W.) แล้วเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มิลลิลิตร

ค. ขั้นตอนการวิเคราะห์

ถ้าตัวอย่างน้ำมีสารแขวนลอยให้กรองโดยใช้แผ่นกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอนก่อนนำไปวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างปริมาตร 5 มล.
2. เติม 0.1 มล. Sulphanilamide Solution [1] เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 2-10 นาที
3. เติม 0.1 มล. NED [2] เขย่าทันที ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมง
4. นำไปวัดค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่น 543 nm.

(Strickland and Parsons, 1972)



ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานไนไตรท์-ไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ไนเตรท – ไนโตรเจน (NO_3^-/N)

ก. สารเคมีที่ใช้

1. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ไม่มีไนเตรท (Distilled water)
2. Sulphanilamide
3. N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride
4. Ammonium chloride ; NH_4Cl
5. เกร็ดแคดเมียมเคลือบทองแดง (Copper-Cadmium Granules)

ข. การเตรียมสารละลาย

1. Sulphanilamide Solution

เติมกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร แล้วละลาย Sulphanilamide 5 กรัม เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เก็บได้นาน 2-3 เดือน

2. NED Dihydrochloride

ละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชาต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งหรือเมื่อสารละลายมีสีน้ำตาล ควรทำกราฟมาตรฐานใหม่ทุกครั้ง ที่เตรียมสารละลายนี้ใหม่

3. น้ำทะเลสังเคราะห์ (Synthetic seawater)

ละลาย 310 กรัม NaCl + 100 กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0.05 กรัม NaHCO_3 ละลายในน้ำกลั่น (D.W.) แล้วเจือจางให้เป็นปริมาตร 10 ลิตร

4. Concentration ammonium chloride Solution

ละลาย 125 กรัม NH_4Cl ในน้ำกลั่น 500 มล. เก็บในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก

5. Dilute ammonium chloride Solution

นำสารละลายเข้มข้นแอมโมเนียมคลอไรด์ [ข้อ4] มา 50 มล. เติมน้ำกลั่น (D.W.) ให้เป็น 2000 มล. เก็บในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก

6. 2% w/v $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

ละลาย 2 กรัม $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น (D.W.) 100 มิลลิลิตร

7. Nitrate Stock Solution (เข้มข้น 100 $\text{mgNO}_3^-/\text{N/l}$)

ชั่ง KNO_3 0.7218 กรัม(ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C นาน 24 ชั่วโมง) ละลายในน้ำกลั่น (D.W.) แล้วเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มิลลิลิตร

ค. ขั้นตอนการวิเคราะห์

การเตรียมคอลัมน์แคดเมียม (Cadmium Column)

1. เติมน้ำกลั่นลงในคอลัมน์เปล่าที่จัดเตรียมไว้
2. บรรจุเม็ดแคดเมียมลงในคอลัมน์ให้ได้ความสูงประมาณ 18.5 ซม. รักษาระดับน้ำให้ท่วมเม็ดแคดเมียมเสมอ เพื่อป้องกันมิให้เกิดฟองอากาศ (ยกปลายท่อน้ำออกให้สูงกว่าระดับแคดเมียมในหลอด)
3. ล้างเม็ดแคดเมียมโดยเทสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจาง [ข้อ 5] ผ่านคอลัมน์อย่างช้าๆ

การเตรียมตัวอย่างน้ำ

1. ถ้าตัวอย่างน้ำมีสารแขวนลอยให้กรองโดยใช้แผ่นกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอนก่อนนำไปวิเคราะห์
2. เจือจางน้ำตัวอย่างด้วยน้ำทะเลสังเคราะห์ และใช้น้ำทะเลสังเคราะห์เป็น Blank
3. เติม 2 มล. Concentration ammonium chloride Solution [ข้อ 4] ลงในน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. เขย่าให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

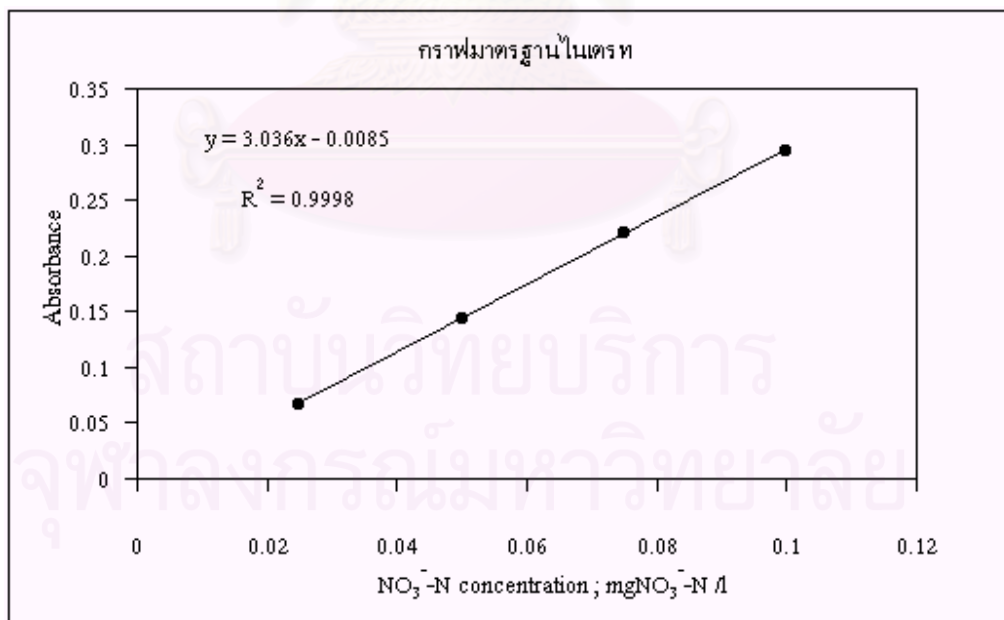
การผ่านน้ำตัวอย่างลงในคอลัมน์

1. ปรับอัตราการไหลของน้ำกลั่นให้ได้ 25 มล./ 4 นาที
2. เมื่อระดับน้ำกลั่นอยู่เหนือลำไลเยแก้วเล็กน้อย เทน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้ลงในคอลัมน์ ปล่อยให้ตัวอย่างน้ำ (ตอนนี้มีปริมาตรรวม 100 มล.) ไหลผ่านคอลัมน์ในอัตรา 25 มล./ 4 นาที ที่น้ำ 25 มล. แรกที่รองได้และเก็บปริมาตรที่เหลืออีก 75 มล. ไว้วิเคราะห์

3. หลังจากเทน้ำตัวอย่างลงในคอลัมน์ทุกครั้งต้องล้างคอลัมน์ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจาง [ข้อ 5] ปริมาตร 200 มล. ก่อนที่จะทำการเทตัวอย่างใหม่ต่อไป
4. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์มา 5 มล.
5. เติม 0.1 มล. Sulphanilamide Solution [1] เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 2-10 นาที
6. เติม 0.1 มล. NED [2] เขย่าทันที ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมงนำไปวัดค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่น 543 nm.

หมายเหตุ : ไม่จำเป็นต้องล้างคอลัมน์ในระหว่างที่มีการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ถ้าหยุดใช้คอลัมน์เป็นเวลาหลายๆ ชั่วโมงหรือนานกว่านั้น ให้เทสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางผ่านคอลัมน์และต้องรักษาชั้นแคดเมียมไม่ให้แห้งเป็นอันขาด ทำกราฟมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการเตรียมคอลัมน์ใหม่

(Strickland and Parsons, 1972)



ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานไนเตรท-ไนโตรเจน



ภาพผนวกที่ 4 คอลัมน์บรรจุเม็ดแคดเมียมสำหรับวิเคราะห์ไนเตรท-ไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย

ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์; V_L						ไม่ให้แสง; V_D				
อายุ สาหร่าย (วัน)	น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง		น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง	
		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_D$
		ชั่วโมงที่ 0 ; [S]	ชั่วโมงที่ 6				ชั่วโมงที่ 0	ชั่วโมงที่ 6		
4 วัน	30.36	0.2864	0.0932	0.1932	0.0011	30.51	0.1262	0.0259	0.1002	0.0005
	30.34	26.2284	14.1890	12.0393	0.0661	30.82	29.7861	20.6355	9.1505	0.0495
	30.47	53.0606	44.7220	8.3385	0.0456	30.75	48.2043	41.7239	6.4804	0.0351
	30.33	77.1080	72.1736	4.9344	0.0271	28.57	76.6084	75.9525	0.6559	0.0038
11 วัน	30.28	0.8781	0.0226	0.8555	0.0047	30.2	0.9169	0.6392	0.2777	0.0015
	30.12	8.8585	3.7509	5.1076	0.0283	30.22	9.4532	5.1231	4.3301	0.0239
	31.02	53.1150	46.0818	7.0333	0.0378	30.63	56.6728	50.8187	5.8542	0.0319
17 วัน	30.15	0.5011	0.1844	0.3167	0.0018	30.55	0.7477	0.6856	0.0621	0.0003
	30.15	19.7610	10.1900	9.5711	0.0529	30.55	18.9370	13.9429	4.9940	0.0272
	30.4	32.5192	20.6116	11.9076	0.0653	30.65	26.8268	24.4705	2.3564	0.0128
	30.25	37.0003	25.7877	11.2126	0.0618	30.5	31.0564	27.7601	3.2963	0.0180
	30.4	40.7069	27.9587	12.7482	0.0699	30.2	47.7098	36.8017	10.9081	0.0602

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์; V_L						ไม่ให้แสง; V_D				
อายุ สำหรับ (วัน)	น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง		น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง	
		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$			$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/g(fw)/h; V_D$	
		ชั่วโมงที่ 0 ; [S]	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$		ชั่วโมงที่ 0	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/h; V_D$
30 วัน	30.15	0.3071	0.0392	0.2679	0.0015	30.4	0.3375	0.2364	0.1011	0.0006
	30.6	9.6535	3.6325	6.0210	0.0328	30.5	6.4986	5.5041	0.9946	0.0054
	31.3	18.7652	9.0724	9.6927	0.0516	31.2	20.3622	15.9882	4.3740	0.0234
	30.35	31.8480	16.3197	15.5283	0.0853	30.35	28.6397	22.3228	6.3168	0.0347
	30.65	43.3980	25.4242	17.9738	0.0977	30.1	39.0418	32.2473	6.7945	0.0376
	31.2	53.6147	32.7249	20.8898	0.1116	30.3	51.3047	40.4534	10.8513	0.0597
	30.3	60.9012	41.7938	19.1074	0.1051	30.85	59.7177	46.9414	12.7763	0.0690
59 วัน	40.38	0.9352	0.0173	0.9179	0.0038	40.67	0.9872	0.1129	0.8744	0.0036
	40.04	2.3102	0.0000	2.3102	0.0096	39.96	2.3603	0.1397	2.2206	0.0093
	39.29	2.7650	0.0000	2.7650	0.0117	39.45	2.5107	0.0000	2.5107	0.0106
	39.96	4.8532	0.4513	4.4019	0.0184	40.22	4.2980	1.5258	2.7722	0.0115
	39.8	8.6139	0.9348	7.6791	0.0322	39.72	8.1304	1.0458	7.0845	0.0297
	39.17	8.0014	1.2393	6.7622	0.0288	38.39	8.5494	5.2650	3.2844	0.0143
	61 วัน	30.4	0.0299	0.0037	0.0262	0.0001	29.8	0.0348	0.0119	0.0229
31		2.8832	0.2937	2.5895	0.0139	31.15	2.5394	0.8166	1.7228	0.0092
31		4.3195	0.2400	4.0795	0.0219	31.75	3.7930	1.2894	2.5036	0.0131

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์; V_L						ไม่ให้แสง; V_D					
อายุ สำหรับ (วัน)	น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย		อัตราแอมโมเนียที่ลดลง		น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย		อัตราแอมโมเนียที่ลดลง		
		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$			$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/g(fw)/h; V_D$		
		ชั่วโมงที่ 0 ; [S]	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$		ชั่วโมงที่ 0	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/h; V_D$	
61 วัน (ต่อ)	31.05	8.8682	1.1246	7.7436	0.0416	30.65	9.0186	2.8797	6.1390	0.0334	
	29.9	7.4928	0.8596	6.6332	0.0370	31.75	3.7930	1.2894	2.5036	0.0131	
	31.4	10.3582	2.7973	7.5609	0.0401	30.55	10.3474	3.8575	6.4900	0.0354	
71 วัน	40	10.1054	5.3041	4.8012	0.0200	40.15	12.6317	8.2695	4.3622	0.0181	
	40.05	20.0112	9.2154	10.7958	0.0449	40	16.9341	10.8437	6.0904	0.0254	
	40.1	21.2085	14.6153	6.5932	0.0274	40.05	20.4103	16.3075	4.1028	0.0171	
	40.05	23.0364	14.7510	8.2854	0.0345	40.1	21.2883	16.1558	5.1325	0.0213	
	40.15	30.4997	16.0680	14.4317	0.0599	40.15	26.2452	24.9282	1.3170	0.0055	
	40.2	31.9764	20.8493	11.1271	0.0461	40.15	32.3595	29.2305	3.1290	0.0130	
	40.4	54.0549	37.9151	16.1398	0.0666	40.25	50.0159	37.2605	12.7554	0.0528	
75 วัน	30.3	8.8443	3.3946	5.4497	0.0300	30.3	9.0104	5.5311	3.4794	0.0191	
	30.25	11.4080	4.8087	6.5993	0.0364	30.35	12.3033	7.0435	5.2598	0.0289	
	30.45	20.4286	11.2588	9.1698	0.0502	30.4	22.0429	15.0095	7.0334	0.0386	
	30.25	23.6571	13.9853	9.6717	0.0533	30.45	25.5901	16.5898	9.0003	0.0493	
	30.05	32.3386	17.5325	14.8060	0.0821	30.55	30.5277	23.2976	7.2301	0.0394	
	30.6	30.1004	21.9072	8.1932	0.0446	30.6	31.2330	27.4417	3.7914	0.0207	
	30.45	36.1978	26.1191	10.0787	0.0552	30.55	39.3177	32.9897	6.3280	0.0345	

ตารางภาคผนวกที่ 2 ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม

อายุ สาหร่าย (วัน)	ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์; V_L					ไม่ให้แสง; V_D				
	น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม $mgNH_4^+-N/l$		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง		น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม $mgNH_4^+-N/l$		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง	
	ชั่วโมงที่ 0 ; [S]	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/hr; V_L$	ชั่วโมงที่ 0	ชั่วโมงที่ 6	$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/g(fw)/h; V_D$		
1 วัน	21.15	0.1256	0.0054	0.1202	0.0009	20.7	0.1385	0.1319	0.0066	0.0001
	20.25	10.4271	2.3528	8.0743	0.0665	20.45	9.1366	8.1278	1.0088	0.0082
	20.4	17.3321	4.5879	12.7442	0.1041	20.45	18.3802	13.7780	4.6022	0.0375
	20.5	26.4509	9.0831	17.3677	0.1412	20.9	29.1744	25.8377	3.3367	0.0266
	20.05	38.3930	23.1356	15.2574	0.1268	20.15	34.2935	28.2475	6.0459	0.0500
	20.1	32.4398	16.0559	16.3839	0.1359	20.1	45.9147	38.9277	6.9870	0.0579
	24.05	44.6171	24.1837	20.4335	0.1416	22.35	47.2266	40.6816	6.5450	0.0488
1 วัน	20.45	4.8092	0.5987	4.2106	0.0343	20.1	4.8212	2.7219	2.0993	0.0174
	20.1	8.5129	1.6483	6.8646	0.0569	20	9.6384	7.1719	2.4665	0.0206
	20.05	13.4738	4.1587	9.3151	0.0774	20.05	12.1049	9.7861	2.3188	0.0193
	20.1	19.5083	10.9515	8.5568	0.0710	20	23.0603	19.6440	3.4163	0.0285
	20.35	45.9451	19.6839	26.2612	0.2151	20	40.5172	29.4859	11.0313	0.0919
2 วัน	20	3.1729	0.7543	2.4186	0.0202	20.1	3.0532	2.7618	0.2913	0.0024
	20.05	8.4491	2.2789	6.1702	0.0513	20.1	7.0602	7.0083	0.0519	0.0004
	20	11.3426	4.0868	7.2557	0.0605	20.05	12.3364	9.3151	3.0212	0.0251
	20.05	14.9425	10.4646	4.4780	0.0372	20.15	15.0942	14.9266	0.1676	0.0014
	20.1	19.8515	12.2286	7.6229	0.0632	20.1	21.0888	17.4090	3.6798	0.0305
	20.15	35.4486	27.1951	8.2535	0.0683	20.1	32.5112	29.8850	2.6261	0.0218

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)

อายุ สำหรับ (วัน)	ให้แสงที่ความเข้ม 15,000 ลักซ์; V_L					ไม่ให้แสง; V_D				
	น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง		น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม		อัตราแอมโมเนียมที่ลดลง	
		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/(g(fw))/hr; V_L$		$mgNH_4^+-N/l$		$mgNH_4^+-N/l$	$mgNH_4^+-N/(g(fw))/hr; V_D$
3 วัน	15.09	0.3615	0.1106	0.2509	0.0028	15.05	0.4687	0.2889	0.1798	0.0020
	15.03	12.6956	5.8647	6.8308	0.0757	15	15.3094	10.3041	5.0053	0.0556
	15.08	48.0026	25.6875	22.3151	0.2466	14.33	40.7095	40.3805	0.3289	0.0038
	15.07	53.8822	44.0612	9.8210	0.1086	15.06	49.2799	45.8926	3.3873	0.0375
7 วัน	20.2	0.1807	0.0553	0.1254	0.0010	20.1	0.1659	0.1276	0.0383	0.0003
	20.1	9.0888	3.1244	5.9644	0.0495	20.3	8.9571	7.2643	1.6928	0.0139
	20.1	42.0537	22.3373	19.7165	0.1635	20.1	43.4667	36.8914	6.5753	0.0545
	20.4	62.1899	34.0888	28.1011	0.2296	20.15	58.0162	48.4751	9.5411	0.0789
9 วัน	20.3	0.1098	0.0151	0.0948	0.0008	20.5	0.0811	0.0729	0.0082	0.0001
	20.4	18.6822	6.7152	11.9670	0.0978	20.15	17.9864	17.3897	0.5967	0.0049
	20.3	35.7698	18.4420	17.3278	0.1423	20.1	43.2526	37.7656	5.4870	0.0455
	20.5	52.0775	23.1962	28.8813	0.2348	20.45	50.2649	38.1716	12.0933	0.0986
11 วัน	20	4.6296	0.0239	4.6057	0.0384	20	4.6815	3.3046	1.3769	0.0115
	20	21.5078	4.6775	16.8303	0.1403	20	21.5797	18.2631	3.3166	0.0276
	20	22.8688	6.3378	16.5310	0.1378	20	22.6133	20.6657	1.9476	0.0162
	20	27.2669	7.3914	19.8755	0.1656	20	26.4208	22.8049	3.6159	0.0301
	20	37.8352	13.7851	24.0501	0.2004	20	39.2241	31.6092	7.6149	0.0635
	20	41.4431	20.2107	21.2324	0.1769	20	45.1389	43.3030	1.8359	0.0153
	20	22.0626	7.2158	14.8467	0.1237	20	24.0262	22.5096	1.5166	0.0126

ตารางภาคผนวกที่ 3 ข้อมูลการทดลองหาอัตราการไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายช่อพริกไทย

อายุ สาหร่าย (วัน)	น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของไนเตรท $mgNO_3^- - N/l$		อัตราไนเตรทที่ลดลง	
		ชั่วโมงที่ 0; [S]	ชั่วโมงที่ 6	$mgNO_3^- - N/l$	$mgNO_3^- - N/g(fw)/hr; V$
1 วัน	50.53	1.7569	0.1479	1.6089	0.0053
	50.79	13.7085	13.0952	0.6133	0.0020
	51.06	29.5094	22.9437	6.5657	0.0214
6 วัน	50.4	26.1361	24.1327	2.0035	0.0066
	50.86	93.1612	89.4730	3.6882	0.0121
12 วัน	50.67	0.2040	0.0344	0.1696	0.0006
	50.65	23.2056	20.0787	3.1269	0.0103
	50.66	63.4959	54.0563	9.4396	0.0311
12 วัน	30.39	0.6458	0.3495	0.2963	0.0016
	31.07	10.3740	10.0756	0.2984	0.0016
	30.71	25.8737	25.0766	0.7971	0.0043
	30.2	51.8905	48.0891	3.8013	0.0210
	31.8	68.3834	67.1163	1.2671	0.0066
21 วัน	30.56	6.9027	6.2300	0.6727	0.0037
	30.71	39.8609	35.9539	3.9070	0.0212
	31.39	70.8199	69.1879	1.6320	0.0087
28 วัน	31.08	33.5728	30.9352	2.6376	0.0141
	31.09	51.6111	47.4052	4.2059	0.0225

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

อายุ สำหรับ (วัน)	น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของไนเตรท		อัตราไนเตรทที่ลดลง	
		mgNO ₃ ⁻ -N/l			
		ชั่วโมงที่ 0; [S]	ชั่วโมงที่ 6	mgNO ₃ ⁻ -N/l	mgNO ₃ ⁻ -N/g(fw)/hr;V
86 วัน	30.65	4.3997	4.08618	0.3135	0.0017
	30.45	9.5182	8.383155	1.1351	0.0062
	30.2	13.3071	12.882818	0.4243	0.0023
	30.5	18.5743	17.60949	0.9648	0.0053
	30.45	21.2795	20.50657	0.7729	0.0042
	30.35	28.7870	28.014115	0.7729	0.0042
	30.85	32.2787	30.792285	1.4864	0.0080
	30.4	41.7915	40.81856	0.9729	0.0053
87 วัน	30.8	9.3175	8.7297641	0.5878	0.0032
	30.2	21.4411	18.645888	2.7953	0.0154
	30.35	22.2131	21.603661	0.6094	0.0033
	30.7	32.8064	31.062034	1.7443	0.0095

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลการทดลองหาอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายหนาม

อายุ สาหร่าย (วัน)	น้ำหนัก สาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นของไนเตรท mgNO ₃ ⁻ -N/l		อัตราไนเตรทที่ลดลง v	
		ชั่วโมงที่ 0; [S]	ชั่วโมงที่ 6	mgNO ₃ ⁻ -N/l	mgNO ₃ ⁻ -N/g(fw)/hr
1 วัน	15.12	0.6596	0.6155	0.0441	0.0005
	15.79	9.5384	8.9347	0.6037	0.0064
4 วัน	50.02	15.0518	7.9989	7.0529	0.0235
	50.04	30.4932	26.2085	4.2846	0.0143
	50.02	68.6096	63.8798	4.7298	0.0158
4 วัน	20.05	4.9830	4.2541	0.7289	0.0061
	20.05	9.8535	8.7364	1.1172	0.0093
	20	13.8249	13.1335	0.6914	0.0058
	20.05	19.2847	18.4571	0.8277	0.0069
	20	12.5170	11.2909	1.2262	0.0102
	20.05	28.7329	28.0449	0.6880	0.0057
	20	34.4005	32.8814	1.5191	0.0127
	20.07	40.2588	36.8188	3.4401	0.0286
6 วัน	20.05	3.7589	3.1560	0.6028	0.0050
	20.05	7.3202	7.0846	0.2356	0.0020
	20	10.7092	8.1408	2.5684	0.0214
	20.05	16.2082	14.7163	1.4919	0.0124
	20	24.7062	22.7811	1.9250	0.0160
	20	30.7345	27.2239	3.5106	0.0293
	20	36.0638	33.4903	2.5735	0.0214
	20	41.4387	39.1033	2.3354	0.0195
14 วัน	50.02	1.1529	1.0062	0.1468	0.0005
	50.06	30.9185	29.2613	1.6572	0.0055
	50.04	86.9317	79.6874	7.2443	0.0241

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

อายุ สำหรับ (วัน)	น้ำหนัก สำหรับ (กรัม)	ความเข้มข้นของไนเตรท		อัตราไนเตรทที่ลดลง	
		mgNO ₃ ⁻ -N/l		V	
		ชั่วโมงที่ 0 ; [S]	ชั่วโมงที่ 6	mgNO ₃ ⁻ -N/l	mgNO ₃ ⁻ -N/g(dw)/hr
20 วัน	20	9.3993	9.0390	0.3604	0.0030
	20	19.6331	19.2402	0.3929	0.0033
	20	22.1493	21.5292	0.6201	0.0052
	20	30.2402	29.4220	0.8182	0.0068
	20	35.2987	34.0844	1.2143	0.0101
	20	42.6623	41.9480	0.7143	0.0060
22 วัน	20	11.1080	10.3378	0.7702	0.0064
	20	15.8302	15.0663	0.7639	0.0064
	20	20.1263	19.5139	0.6124	0.0051
	20	24.8958	24.0373	0.8586	0.0072
	20	34.0720	32.6452	1.4268	0.0119
	20	40.2904	38.9142	1.3763	0.0115
	20	46.3763	44.4129	1.9634	0.0164
	20	51.3763	50.4167	0.9596	0.0080
26 วัน	30.06	53.0334	49.3374	3.6959	0.0205
	30.09	82.2174	74.7907	7.4268	0.0411
	29.33	109.4140	104.1316	5.2824	0.0300

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ 5 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท
ของสาหร่ายช่อพริกไทยใช้ระยะเวลา 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	4.9974	0.0280	6.7360	1.0648	5.3415	1.1514	5.8852	0.5809
3	3.8589	0.4961	5.2465	0.5161	4.8584	0.2059	4.7796	1.5445
6	4.6532	0.1966	5.2445	0.6055	4.7127	0.1310	6.0568	0.3743
14	4.9907	0.9173	5.7548	0.3226	2.4887	0.1498	5.8115	0.5085

ตารางภาคผนวกที่ 6 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท
ของสาหร่ายช่อพริกไทยใช้ระยะเวลา 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	0.1179	0.0034	5.6142	0.0295	8.2204	0.3327	5.4190	0.0318
3	0.1025	0.0030	5.2882	0.2897	4.5202	0.7260	5.6201	0.2161
6	0.1213	0.0115	5.8561	0.1505	3.1299	0.4739	5.8117	0.0211
15	0.0837	0.0079	5.4126	0.3790	1.2565	0.1242	5.9088	0.0549
18	0.0920	0.0079	5.2042	0.6948	1.1894	0.0478	5.1225	0.9336

ตารางภาคผนวกที่ 7 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท
ของสาหร่ายช่อพริกไทยใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	5.5572	0.0511	4.5060	0.5764	6.6917	0.0613	4.8182	0.2438
3	5.3982	0.0511	4.5987	0.0340	5.7884	0.0102	4.6703	0.3175
6	5.1236	0.0715	4.8808	0.1810	5.2898	0.1226	4.7883	0.1834
12	5.1742	0.1635	4.4761	0.6524	5.0405	0.0971	5.0212	0.2515
24	5.1091	0.0307	5.3568	0.1304	0.9695	1.0751	3.4461	1.2595

ตารางภาคผนวกที่ 8 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท
ของสาหร่ายช่อพริกไทยใช้ระยะเวลา 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	4.6532	0.3463	5.6180	0.3902	5.0834	0.4493	5.7573	0.1101
3	4.6532	0.1030	5.4654	0.4316	3.8125	0.4493	5.9644	0.0271
6	4.4083	0.0749	6.5369	0.7348	2.6079	0.1310	5.7725	0.4078
26	4.2825	0.2715	5.8544	0.3494	0.2648	0.0374	6.2452	0.1244

ตารางภาคผนวกที่ 9 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท
ของสาหร่ายช่อพริกไทยใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3)

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	1.5295	0.1320	5.0957	0.3105	2.3410	0.3859	5.1266	0.2657
3	2.0609	0.3961	5.2372	0.4335	1.2639	0.8734	5.3683	0.1379
6	1.4003	0.3148	5.0058	0.2640	0.7396	0.0711	5.5136	0.1970
18	1.7055	0.2183	5.0247	0.2560	0.1436	0.1828	4.6264	1.2044
24	1.7306	0.3351	4.9408	0.3298	0.0467	0.0660	6.0280	0.7093
40	1.7163	0.0000	4.9277	0.2905	0.2729	0.3656	5.8746	0.1085
48	1.7055	0.0254	4.9839	0.3299	0.2801	0.1930	5.6515	0.0495
54	1.6898	0.0914	4.8384	0.3789	0.0027	0.0035	4.8310	1.0913
72	1.7812	0.1873	4.6362	0.0049	0.0000	0.0000	5.2998	0.4153

ตารางภาคผนวกที่ 10 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายหนามใช้ระยะเวลา 14 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(1))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	4.9974	0.0280	6.7360	1.0648	4.6863	0.2059	5.6718	0.0091
3	3.8589	0.4961	5.2465	0.5161	1.9658	0.0094	6.1946	0.1078
6	4.6532	0.1966	5.2445	0.6055	1.3503	0.1123	5.8111	1.2364
14	4.9907	0.9173	5.7548	0.3226	0.4038	0.1404	7.4732	0.0364

ตารางภาคผนวกที่ 11 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายหนามใช้ระยะเวลา 18 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 1(2))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	0.1179	0.0034	5.6142	0.0295	8.2204	0.3327	5.4190	0.0318
3	0.1025	0.0030	5.2882	0.2897	4.5202	0.7260	5.6201	0.2161
6	0.1213	0.0115	5.8561	0.1505	3.1299	0.4739	5.8117	0.0211
15	0.0837	0.0079	5.4126	0.3790	1.2565	0.1242	5.9088	0.0549
18	0.0920	0.0079	5.2042	0.6948	1.1894	0.0478	5.1225	0.9336

ตารางภาคผนวกที่ 12 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายหนามใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(1))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁻ -N/l	S.D.
0	5.5572	0.0511	4.5060	0.5764	6.8290	0.0715	4.8922	0.0213
3	5.3982	0.0511	4.5987	0.0340	4.3576	0.2555	4.9139	0.0634
6	5.1236	0.0715	4.8808	0.1810	2.4425	0.1635	4.0124	1.2952
12	5.1742	0.1635	4.4761	0.6524	0.2349	0.0460	4.5607	0.0298
24	5.1091	0.0307	5.3568	0.1304	0.0014	0.0000	3.9625	0.3480

ตารางภาคผนวกที่ 13 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายหนามใช้ระยะเวลา 26 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 2(2))

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁺ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁺ -N/l	S.D.
0	4.6532	0.3463	5.6180	0.3902	4.6863	0.2059	5.6718	0.0091
3	4.6532	0.1030	5.4654	0.4316	1.9658	0.0094	6.1946	0.1078
6	4.4083	0.0749	6.5369	0.7348	1.3503	0.1123	5.8111	1.2364
26	4.2825	0.2715	5.8544	0.3494	0.4038	0.1404	7.4732	0.0364

ตารางภาคผนวกที่ 14 ข้อมูลทดลองหาอัตราการเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรทของสาหร่ายหนามใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (การทดลองครั้งที่ 3)

ชั่วโมง	กลุ่มควบคุม				กลุ่มทดลอง			
	แอมโมเนียม		ไนเตรท		แอมโมเนียม		ไนเตรท	
	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁺ -N/l	S.D.	mgNH ₄ ⁺ -N/l	S.D.	mgNO ₃ ⁺ -N/l	S.D.
0	1.5295	0.1320	5.0957	0.3105	1.6732	0.3758	4.5042	0.4774
3	2.0609	0.3961	5.2372	0.4335	0.5314	0.1016	5.4869	0.3205
6	1.4003	0.3148	5.0058	0.2640	0.0000	0.0000	5.9169	0.0356
18	1.7055	0.2183	5.0247	0.2560	0.1221	0.1726	5.8161	0.0105
24	1.7306	0.3351	4.9408	0.3298	0.0000	0.0000	5.8079	0.2117
40	1.7163	0.0000	4.9277	0.2905	0.0000	0.0000	5.3382	0.6051
48	1.7055	0.0254	4.9839	0.3299	0.0000	0.0000	5.7224	0.0047
54	1.6898	0.0914	4.8384	0.3789	0.0001	0.0002	4.4669	0.0693
72	1.7812	0.1873	4.6362	0.0049	0.0000	0.0000	5.0349	0.1127

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอลิสา โชควิวัฒนวนิช เกิดเมื่อวันที่ 31 สิงหาคม 2518 อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี เป็นบุตรคนที่ 2 ของนายอภิชาติ โชควิวัฒนวนิช และนางลินีย์ เหล่าอยู่คง สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนราชวินิต มัธยม กรุงเทพฯ และสำเร็จการศึกษาชั้นเตรียมอุดมศึกษาจากโรงเรียนสตรีมหาพฤฒาราม กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาตรีสาขา วิทยาศาสตร์ทั่วไป จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541 ระหว่างการ ศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยนักวิจัยจากสถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25 ในปี พ.ศ. 2542 เรื่องประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเม็ดพริกไทย และครั้งที่ 26 ในปี พ.ศ. 2543 เรื่องจลนพลศาสตร์ของการนำไนเตรทเข้าสู่เซลล์สาหร่ายเม็ดพริกไทยและสาหร่ายหนาม และสำเร็จการศึกษาเมื่อปีการศึกษา 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย