การใช้สาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม *Penaeus vannamei* แบบพัฒนา

Use of *Caulerpa sertularioides* for Treating Nitrogen and Phosphorus in the Effluent from Intensive Culture of *Penaeus vannamei*

ศุลีมาศ สุทธิเนียม

Suleemart Sutthinium

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวาริชศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Aquatic Science
Prince of Songkla University
2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้สาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม *Penaeus vannamei* แบบพัฒนา

ผู้เขียน นางศุลีมาศ สุทธิเนียม

สาขาวิชา วาริชศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	**คณะกรรมการสอบ**
……..……..	……. ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย เชี่ยววารีสัจจะ)	(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิลป์ ผลพันธิน)
	……..…. กรรมการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(รองศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย เชี่ยววารีสัจจะ)
……..……..	……..…. กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุณี เชี่ยววารีสัจจะ)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุณี เชี่ยววารีสัจจะ)
……..……..	……..…. กรรมการ
(ดร.คมน์ ศิลปาจารย์)	(ดร.พุทธ ส่องแสงจินดา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวาริชศาสตร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การใช้สาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม *Penaeus vannamei* แบบพัฒนา
ผู้เขียน	นางศุลีมาศ สุทธิเนียม
สาขาวิชา	วาริชศาสตร์
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* ในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย 4 การทดลองคือ การทดลองแรก ศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย ใช้สาหร่ายขนนกจำนวน 1.5 ก. ทำการทดลองในขวดโหลพลาสติกซึ่งบรรจุน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน ปริมาตร 1.5 ล. ให้ความเข้มแสง 4,500 ลก. โดยใช้หลอดฟลูออร์เรสเซนท์สีขาว เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองโดยใช้สมการ Michaelis–Menten เพื่อคำนวณหาอัตราการดูดซับธาตุอาหารสูงสุด (V_{max}) พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสสูงสุด เท่ากับ 0.7665, 0.6150, 0.0524 และ 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน ตามลำดับ มีค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล., 2.8830 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล., 0.7200 มก. ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล. และ 2.9200 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.

การทดลองที่ 2 ศึกษาชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ โดยใช้สาหร่ายขนนก 20 ก. และน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ล. ใช้ปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมคลอไรด์ และโปแตสเซียมไนเตรท เป็นแหล่งไนโตรเจน ใช้โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เป็นแหล่งฟอสฟอรัส และกำหนดอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 ทำการทดลองในตู้กระจกเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะดีที่สุด (0.46 ก./วัน และ 1.77 %/วัน ตามลำดับ) เมื่อเลี้ยงโดยใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1

การทดลองที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยไนเตรทที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ โดยใช้สาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เลี้ยงในน้ำทะเล 20 ล. ที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน และใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 3, 4 และ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. โดยมีอัตราส่วนไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส เท่ากับ 8:1 ทำการทดลองในตู้กระจกเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด (1.39 ก./วัน) เมื่อเลี้ยงที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล.และมีความเข้มข้นปุ๋ยไนเตรทเท่ากับ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. แต่สาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะดีที่สุด (3.45 %/วัน) เมื่อเลี้ยงที่ความหนาแน่น 0.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทเท่ากับ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.

การทดลองที่ 4 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ โดยใช้สาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เลี้ยงในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่มีความเค็ม 20 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ล. ทำการทดลองในตู้กระจกเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่าสาหร่ายขนนกสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด (49.90 %) ในวันที่ 9 ที่ความหนาแน่น 1.0 และ 1.5 ก./ล. สามารถบำบัดไนไตรท์ได้มากที่สุด (254.19 %) ในวันที่ 11 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. สามารถบำบัดไนเตรทได้มากที่สุด (103.11 %) และสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด (41.36 %) ในวันที่ 15 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. และพบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด (0.627 มก./ก.นน.สด/วัน) ในวันที่ 1 สามารถดูดซับไนไตรท์ได้มากที่สุด (0.283 มก./ก.นน.สด/วัน) ในวันที่ 13 สามารถดูดซับไนเตรทได้มากที่สุด (0.086 มก./ก.นน.สด/วัน) ในวันที่ 15 และสามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด (0.031 มก./ก.นน.สด/วัน) ในวันที่ 13 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ผลการศึกษานี้แสดงว่าสามารถเลี้ยงสาหร่ายขนนกหรือใช้สาหร่ายขนนกบำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลได้

Thesis Title	Use of *Caulerpa sertularioides* for Treating Nitrogen and Phosphorus in the Effluent from Intensive Culture of *Penaeus vannamei*
Author	Mrs. Suleemart Sutthinium
Major Program	Aquatic Science
Academic Year	2009

ABSTRACT

Four experiments were undertaken in a laboratory in order to study the nitrogen and phosphorus removal efficiencies and the uptake rate of green seaweed (*Caulerpa sertularioides*) in the effluent from intensive culture of *Penaeus vannamei*. In the first experiment, to determine the kinetic uptake of nitrogen and phosphorus by the green seaweed, 1.5 g seaweed and 1.5 l of seawater at a salinity of 30 ppt were put into a plastic jar and illuminated with white light fluorescent lamps at 4,500 luxs for 12 hours. In accordance with the Michaelis–Menten equation, the maximum uptake rates (V_{max}) of ammonia-nitrogen (NH_4-N), nitrate-nitrogen (NO_3-N), dissolved organic nitrogen (DON) and orthophosphate-phosphorus (PO_4-P) were 0.7665, 0.6150, 0.0524 and 0.2614 mg/g-fw/d, respectively, and the constant of half-saturation (K_m) were 2.7691 mg NH_4-N/l, 2.883 mg NO_3-N/l, 0.7200 mg DON/l and 2.92 mg PO_4-P/l.

In the second experiment, to determine the best source of nitrogen fertilizer and N:P ratio for growing green seaweed under a natural light condition, 20 g seaweed and 20 l seawater at a salinity of 30 ppt with designated N:P ratios (2:1, 4:1, 8:1 and 10:1) using either urea, ammonium chloride or potassium nitrate as a nitrogen source and potassium dihydrogen phosphate as a phosphorus source were put into glass aquaria for 28 days. In this experiment, it was found that N:P ratio of 8:1 using potassium nitrate as a nitrogen source gave the best average daily gain (0.46 g/day ADG) and specific growth rate (1.77%/day SGR) of seaweed.

In the third experiment, to determine the best density of seaweeds and concentration of nitrate fertilizer for growing green seaweed under a natural light condition, three seaweed densities (0.5, 1.0 and 1.5 g/l), and 20 l seawater at a salinity of 30 ppt with designated potassium nitrate concentrations (3, 4 and 5 mg/l) and N:P ratio of 8:1 were put into glass aquaria for 28 days. It was found that 1.5 g/l seaweed with 5 mg/l fertilizer gave the best ADG (1.39 g/day), but 0.5 g/l seaweed with 5 mg/l fertilizer gave the best SGR (3.45%/day) of seaweed.

In the last experiment, in order to study the nitrogen and phosphorus removal efficiencies of green seaweed in the effluent from intensive culture of *Penaeus vannamei* under a natural light condition, seaweeds with designated densities (0.5, 1.0, and 1.5 g/l) were grown in glass aquaria containing 20 l of 20 ppt seawater for 15 days. The highest removal efficiency of ammonia-nitrogen (49.90%) was found on day 9 in treatment with 1.0 and 1.5 g/l seaweed, the highest nitrite-nitrogen (254.19 %) was on day 11 in 1.0 g/l seaweed, the highest nitrate-nitrogen (103.11%) and the orthophosphate-phosphorus (41.36%) removal efficiency was on day 15 in 1.5 g/l seaweed. The highest ammonia-nitrogen uptake rate (0.627 mg/g-fw/d) was found on day 1, the highest nitrite-nitrogen (0.283 mg/g-fw/d) was found on day 13, the highest nitrate-nitrogen (0.086 mg/g-fw/d) was found on day 15 and orthophosphate-phosphorus (0.031 mg/g-fw/d) uptake rate was found on day 13 in 0.5 g/l seaweed. The results show that it is feasible to grow or use green seaweed for treating the effluent from marine shrimp ponds.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพ	(10)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	25
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	26
วัสดุ อุปกรณ์การทดลอง และสารเคมี	26
วิธีการทดลอง	27
การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	33
การวิเคราะห์ข้อมูล	34
3. ผลการทดลอง	35
4. วิจารณ์ผลการทดลอง	63
5. สรุปผลการทดลอง	76
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	89
ก ตารางผลการทดลอง	90
ข วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	117
ค ภาพแสดงการดำเนินการทดลอง	128
ประวัติผู้เขียน	133

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	จลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ	18
2	คุณภาพน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมและเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง	21
3	ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายทะเลในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ	21
4	อัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนของสาหร่ายทะเลในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ	23
5	แหล่งของไนโตรเจนและอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ที่ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก	30
6	วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำพารามิเตอร์ต่าง ๆ	33
7	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 ในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	43
8	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นของปุ๋ย 3, 4 และ 5 มก./ล. ในแต่ละสัปดาห์ ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	47
9	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตัวแปรคุณภาพน้ำกับประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 15 วัน	62
10	ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายชนิดอื่น ๆ	72
11	อัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายชนิดอื่น ๆ	73

รายการภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides*	5
2	วัฏจักรไนโตรเจนในระบบนิเวศชายฝั่ง	11
3	การดูดซับแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และยูเรีย เข้าไปใช้ในเซลล์ของสาหร่าย	12
4	วัฏจักรฟอสฟอรัสในระบบนิเวศชายฝั่ง	15
5	กราฟเส้นโค้ง Michaelis-Menten แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหารกับอัตราการดูดซับธาตุอาหาร	17
6	กราฟเส้นตรงของฮานส์ ใช้สำหรับหาค่า V_{max} และค่า K_m	18
7	กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนีย ([S]) กับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ออัตราการดูดซับแอมโมเนีย ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.	36
8	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.	36
9	กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรท ([S]) กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการดูดซับไนเตรท ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.	37
10	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.8830 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.	38
11	กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ ([S]) กับความเข้มข้นของไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำต่ออัตราการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.	39
12	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 0.7200 มก.ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล.	39

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต ([S]) กับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่ออัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.	40
14	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.9200 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.	41
15	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	44
16	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	45
17	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นปุ๋ย เท่ากับ 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	48
18	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นของปุ๋ย 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)	49
19	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	50
20	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	51
21	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	52

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	53
23	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	54
24	ประสิทธิภาพการบำบัดไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	55
25	ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	56
26	ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	57
27	อัตราการดูดซับแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	58
28	อัตราการดูดซับไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	59
29	อัตราการดูดซับไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	60
30	อัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน	61

สัญลักษณ์และคำย่อ

%	เปอร์เซ็นต์
^{o}ซ.	องศาเซลเซียส
ก.	กรัม
ชม.	ชั่วโมง
ซม.	เซนติเมตร
ตร.ม.	ตารางเมตร
นน.	น้ำหนัก
นน.ม.	นาโนเมตร
ม.	เมตร
มค.โมล	ไมโครโมล
มค.ม.	ไมโครเมตร
มม.	มิลลิเมตร
มล.	มิลลิลิตร
ล.	ลิตร
ลก.	ลักซ์
[S]	substrate concentration
$\bar{x}$	average
ADG	Average Daily Growth
C_{t1}	concentration on day t1
C_{t2}	concentration on day t2
K_m	half-saturation constant for substrate
SD	standard deviation
SGR	Specific Growth Rate
t	time in days

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V	uptake rate
V_{max}	maximum nutrient uptake rate at saturating substrate concentration
vol	volume
w_{t1}	weight on day t1
w_{t2}	weight on day t2

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งโดยเฉพาะการเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยได้พัฒนาและขยายตัวมาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2531 มีพื้นที่เลี้ยงกุ้งทั่วประเทศ 342,364 ไร่ และเพิ่มเป็น 464,881 ไร่ ในปี 2545 เกือบทั้งหมดเป็นการเลี้ยงแบบพัฒนา (นิคม และคณะ, 2549) จากปัญหาทางการผลิตและการตลาดกุ้งกุลาดำตั้งแต่ปี 2544-2546 คือการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในหลายพื้นที่มีปัญหาการโตช้าและผลผลิตไม่ได้ตามเป้าหมาย แนวโน้มการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในทุกพื้นที่ (ชวนพิศ, 2547; ชลอ, 2550) โดยในปี 2548 มีเกษตรกรเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมประมาณ 80 % ของจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งทะเลทั้งหมด และเหลือเกษตรกรที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำประมาณ 20 % เท่านั้น (ชลอ และนิติ, 2548) การปล่อยกุ้งลงเลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูง ประกอบกับการให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนสูง น้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาจึงมีมลสารปะปนในปริมาณมาก โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ส่งผลให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบ่อเลี้ยงและแหล่งน้ำธรรมชาติ (นิคม และคณะ, 2549; Marinho-Soriano *et al*., 2009)

สาหร่ายทะเลจัดเป็นทรัพยากรจากทะเลที่เป็นประโยชน์ สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในแหล่งน้ำกร่อยและแหล่งน้ำเค็มตามธรรมชาติ ต้องการธาตุอาหารในการเจริญเติบโตหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม ซิลิกา แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งปริมาณธาตุทั้งสองชนิดนี้มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต การควบคุมทางชีวเคมี การสืบพันธุ์และการพัฒนารูปร่างของสาหร่าย น้ำที่ระบายออกมาจากบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งมักมีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณสูง หากนำสาหร่ายทะเลไปเลี้ยงในน้ำดังกล่าว นอกจากจะได้ประโยชน์จากผลผลิตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังสามารถลดปริมาณมลสารที่เหลืออยู่ในน้ำที่ระบายจากการเพาะเลี้ยงกุ้งและสัตว์น้ำกร่อยชนิดอื่น ๆ ได้ (วลีรัตน์ และพุทธ, 2547; Neori *et al*., 2000; Schuenhoff *et al*., 2003; Neori *et al*., 2004) สาหร่ายทะเลที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ สาหร่ายสกุล *Gracilaria* (ศิริวรรณ, 2538; อนงค์, 2543; พุทธ และสำรอง, 2546; ประหยัด, 2547; ธวัช และสุริยะ, 2548; Neori *et al*., 2000; Soriano *et al*., 2002; Matos *et al*., 2006; Valente, *et al*., 2006; Yang *et al*., 2006; Marinho-Soriano *et al*., 2009) สาหร่ายสกุล *Caulerpa* (สันติ, 2546; ประหยัด, 2547; วลีรัตน์ และพุทธ,

2547; จามรี และพุทธ, 2548; ธวัช และคณะ, 2548ก; มกรานนท์, 2550) สาหร่ายสกุล *Acanthophora* (ประหยัด, 2547; ธวัช และสุริยะ, 2548; ธวัช และคณะ, 2548ข) สาหร่ายสกุล *Enteromorpha* (ประหยัด, 2547; Cohen and Fong, 2004) และสาหร่ายสกุล *Ulva* (Neori *et al*., 2000; Msuya *et al*., 2006; Valente *et al*., 2006) เป็นต้น ซึ่งสาหร่ายทะเลเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการลดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอนินทรีย์ได้ดี แต่ทั้งนี้ต้องมีปริมาณที่เหมาะสม (ศิริวรรณ, 2538; สันติ, 2546; วลีรัตน์ และพุทธ, 2547; คมน์ และคณะ, 2548)

สาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* เป็นสาหร่ายทะเลชนิดหนึ่งที่พบแพร่กระจายทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ทั้งชายฝั่งทะเลอันดามันและอ่าวไทย (Hodgson *et al*., 2004) สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของสาหร่ายชนิดนี้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม รวมทั้งการใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ซึ่งสาหร่ายขนนกสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างด้วยกัน เช่น ใช้เป็นอาหารคน ใช้เป็นยาปฏิชีวนะ รักษาโรคคอพอก ลดความดันโลหิต (Trono, 1997; Lamouroux, 2008) และจากการศึกษาความเป็นไปได้ของการเลี้ยงสาหร่ายทะเลชนิดต่าง ๆ ในสภาวะแสงธรรมชาติ โดยใช้สาหร่ายทะเลชนิด *Caulerpa sertularioides*, *C. serrulata*, *C. macrophysa, Ulva lactuca, Enteromorpha* (*Ulva*) *intestinalis, Sargassum polycystum* และ *Acanthophora spiciformis* พบว่าสาหร่าย *C. sertularioides* สามารถเจริญเติบโตได้ดีและอยู่ได้นานที่สุด (ข้อมูลเบื้องต้นของผู้วิจัยซึ่งไม่ได้พิมพ์เผยแพร่) จึงคิดว่าสาหร่ายขนนกเป็นสาหร่ายทะเลอีกชนิดหนึ่งที่น่าศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ให้มากขึ้น

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก และศึกษาถึงสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก และประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาในสภาวะที่ได้รับแสงธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการขยายพันธุ์สาหร่ายให้มีปริมาณเพียงพอและประยุกต์ใช้ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม รวมทั้งการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งชนิดอื่น ๆ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบ่อเลี้ยงและแหล่งน้ำธรรมชาติ แนวทางเหล่านี้จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการนำทรัพยากรที่มีอยู่แล้วมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากขึ้น

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 สาหร่ายทะเลขนาดใหญ่ (seaweeds)

สาหร่ายทะเลขนาดใหญ่เป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำที่มีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง โดยมีส่วนที่คล้ายราก ลำต้นและใบ รวมเรียกว่าทัลลัส (thallus) มีคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) แตกต่างกันไปตามกลุ่มสาหร่าย ไม่มีระบบท่อลำเลียงอาหารจากรากสู่ลำต้นและใบแบบพืชชั้นสูง แต่จะใช้วิธีดูดซับน้ำและแร่ธาตุจากน้ำทะเลสู่เซลล์โดยตรง แพร่ขยายพันธุ์ด้วยการสร้างสปอร์และแบ่งตัว สาหร่ายทะเลแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ตามโครงสร้างและสีของสารสังเคราะห์แสงได้เป็น 3 กลุ่ม คือสาหร่ายสีเขียว (green seaweeds) สาหร่ายสีน้ำตาล (brown seaweeds) และสาหร่ายสีแดง (red seaweeds) (กาญจนภาชน์, 2527; ยุวดี, 2549)

1) สาหร่ายทะเลสีเขียวสกุล *Caulerpa* spp.

สาหร่ายทะเลสกุล *Caulerpa* มีลำต้นสีเขียวใส อวบน้ำ มี thallus ติดต่อกันตลอด มีส่วนคล้ายราก (rhizoid) เป็นฝอยทำหน้าที่ยึดเกาะและทอดแขนงมีลักษณะคล้ายไหล (stolon) ออกเป็นระยะ ๆ ส่วนที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงมีลักษณะคล้ายใบเรียกว่า ramulus หรือ frond หรือ blade ขึ้นอยู่กับลักษณะที่ปรากฏ มีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ กัน บางชนิดกลม บางชนิดแบน หรือเป็นเส้นเหมือนขนนก thallus มีขนาดใหญ่เล็กต่าง ๆ กัน บางชนิดอาจยาวถึง 1 ม. มี trabecula ซึ่งเป็นส่วนของผนังเซลล์ชั้นในยื่นเข้าไปในช่องเซลล์ (cell cavity) ลักษณะเหมือนตาข่ายประสานกันโดยมิได้ปิดกั้นการไหลเวียนของ protoplasm ภายในเซลล์ ส่วนประกอบของรงควัตถุจะเป็นชนิดเดียวกับที่พบในพืชชั้นสูง คือ chlorophyll ได้แก่ chlorophyll a, chlorophyll b และ carotenoid ได้แก่ ß-carotene, lutein, zeaxanthin, siphoxanthin และ siphonein (ยุวดี, 2549; Lewmanomont and Ogawa, 1995; Trono, 1997)

2) การแพร่กระจายของสาหร่ายทะเลสกุล *Caulerpa* spp.

สาหร่ายสกุล *Caulerpa* พบแพร่กระจายทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลเขตร้อนและทะเลเขตอบอุ่นทั่วโลก สามารถอยู่ในระดับน้ำลึกสูงสุด 110 ม. (Trono, 1997) แต่ที่พบมากอยู่ในระดับน้ำลึก 1-35 ม. ความเค็มตั้งแต่ 11- 40 ส่วนในพัน (Marine Biosecurity, 2001) แต่ความเค็มที่พบว่าสาหร่ายสามารถแพร่กระจายได้ดีอยู่ในช่วง 25-35 ส่วนในพัน อุณหภูมิตั้งแต่ 10-35 °ซ. และอุณหภูมิที่พบว่าสาหร่ายสามารถแพร่กระจายได้ดีอยู่ในช่วง 20-30 °ซ. (Lobban and Harrison, 1994; Marine Biosecurity, 2001) แพร่กระจายได้ดีในช่วงฤดูร้อนถึงฤดูใบไม้ร่วง (Marine Biosecurity, 2001; Ivesa *et al*., 2006) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสาหร่าย ได้แก่ กระแสน้ำ ความเข้มแสง ปริมาณสารอาหารในแหล่งน้ำ ปริมาณสารพิษ พื้นที่ยึดเกาะ และปริมาณสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น สัตว์น้ำที่กินสาหร่าย รวมทั้งการแก่งแย่งพื้นที่ด้วยกันเองของสาหร่าย (Lobban and Harrison, 1994) ในประเทศไทยสาหร่ายทะเลพบได้ทั้งทะเลอันดามันและอ่าวไทย โดยพบขึ้นอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลที่มีซากปะการัง เปลือกหอย ก้อนหิน พื้นโคลนเลนและโคลนปนทราย น้ำทะเลค่อนข้างใสถึงขุ่นเล็กน้อย ความเค็มประมาณ 32-34 ส่วนในพัน ความลึกประมาณ 2-5 ม. คลื่นลมไม่รุนแรงนัก พบมากในเขตน้ำขึ้นน้ำลง หรือแอ่งหินชายฝั่งที่มีน้ำทะเลท่วมขัง นอกจากนี้ยังพบสาหร่ายสกุลนี้หลายชนิดในบริเวณป่าชายเลน ตามพื้นโคลนเลน โคลนปนทราย ขึ้นตามรากแสม รากโกงกาง และบนโขดหิน (วิทยา, 2521; กาญจนภาชน์, 2522; Hoek *et al*., 1995; Lewmanomont and Ogawa, 1995)

ปัจจุบันทั่วโลกมีสาหร่ายทะเลสกุล *Caulerpa* จำนวนทั้งสิ้น 190 species (Wilkes, 2005) สำหรับในประเทศไทยมีจำนวนทั้งสิ้น 14 species ได้แก่ *C. crassifolia, C. cupressoides, C. lentillifera, C. mexicana, C. microphysa, C. racemosa* var. *corynephora*, *C. racemosa* var. *macrophysa, C. racemosa* var. *peltata*, *C. serrulata*, *C. sertularioides, C. taxifolia*, *C. verticillata, C. fastigiata* และ *C. filiformis* (Hodgson *et al*., 2004)

สำหรับสาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides* พบแพร่กระจายทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลเขตร้อนและทะเลเขตอบอุ่นทั่วโลก มักขึ้นเป็นกระจุกแน่นบนพื้นทราย เศษซากปะการัง บนรากโกงกาง บริเวณคลื่นลมสงบ (อัญชนา, 2547; Trono and Ganzon-Fortes, 1980; Lewmanomont and Ogawa, 1995; Littler and Littler, 2000) ตามแนวชายฝั่งทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (อัญชนา, 2547; Lewmanomont *et al*., 1995; Cribb, 1996; Trono, 1997; Littler and Littler, 2000) สามารถอยู่ในระดับน้ำลึกสูงสุด 110 ม. (Trono, 1997) แต่พบมากที่ระดับน้ำลึก 3-10 ม. (Trono, 1997; Littler and Littler, 2000)

ในประเทศไทยพบสาหร่ายชนิดนี้ทั้งฝั่งทะเลอันดามันและอ่าวไทย (Hodgson *et al*., 2004) พบมากบริเวณจังหวัดภูเก็ตและกระบี่ (วราริน และคณะ, 2550; Lewmanomont *et al*., 1995) โดยพบขึ้นอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลที่มีซากปะการัง ก้อนหิน โคลนปนทราย และพื้นทราย น้ำทะเลค่อนข้างใสถึงขุ่นเล็กน้อย คลื่นลมไม่รุนแรงนัก พบมากในเขตน้ำขึ้นน้ำลง หรือแอ่งหินชายฝั่งที่มีน้ำทะเลท่วมขัง (อัญชนา, 2547; Hoek *et al*., 1995; Lewmanomont and Ogawa, 1995)

สาหร่ายขนนก มีการจัดอันดับทางอนุกรมวิธาน ดังนี้ (กาญจนภาชน์ และคณะ, 2550; Wilkes, 2005)

Division : Chlorophyta

Class : Bryopsidophyceae

Order : Bryopsidales

Family : Caulerpaceae

Genus : *Caulerpa*

สาหร่ายขนนกเป็นสาหร่ายทะเลสกุล *Caulerpa* ชนิดหนึ่งซึ่งมี thallus สีเขียวสด ประกอบด้วย stolon คืบคลานไปตามผิวพื้น ส่วนที่แตกแขนงจาก stolon ตั้งตรงขึ้นเหนือพื้น ลักษณะเหมือนขนนก สูง 6-20 ซม. ส่วนโคนมีก้านสั้น ๆ หรือไม่มีก้าน ramulus ยาว 6-8 มม. ลักษณะเป็นแท่งกลม ผอมยาว โค้งเล็กน้อย ปลายกลมมน หรือมีติ่งแหลมเล็ก ๆ (ภาพที่ 1) (Lewmanomont and Ogawa, 1995; Cribb, 1996; Trono, 1997; Littler and Littler, 2000)

ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายขนนก *Caulerpa sertularioides*

1.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทะเล

1) แสง (light)

แสงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์แสงเพื่อเกิดเป็นพลังงานและใช้ในการเจริญเติบโตของสาหร่าย ตามปกติอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเข้มแสงที่ระดับหนึ่งทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงมีค่าคงที่ไม่เพิ่มสูงขึ้นอีกเรียกว่าอยู่ในระดับความเข้มแสงที่อิ่มตัว (light saturation intensity) สาหร่ายที่ได้รับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตช้า ส่งผลต่อผลผลิตของสาหร่ายลดลง ในขณะเดียวกันความเข้มแสงที่สูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (Photoinhibition) (สรวิศ, 2543) สาหร่ายแต่ละชนิดต้องการระดับความเข้มแสงซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงแตกต่างกัน (William and Dennison, 1990; Ohba *et al*., 1992; Gacia *et al*., 1996) นอกจากนี้ความเข้มแสงยังมีผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีภายในเซลล์ เช่น มีผลต่อปริมาณสารสี carotenoid และ chlorophyll (สรวิศ, 2543)

จากการศึกษาอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* ของ Powtongsook และคณะ (2000) พบว่าสาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุดที่ความเข้มแสงประมาณ 20,000 ลก. แม้ว่าสาหร่ายจะได้รับแสงแดดเต็มที่ในตอนกลางวัน (ประมาณ 100,000 ลก.) ก็ไม่ได้ส่งผลให้สาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงมากขึ้นแต่อย่างใด ในทางกลับกันการที่ปล่อยสาหร่ายไว้ในบ่อที่ได้รับแสงโดยตรง มีผลให้อุณหภูมิของน้ำร้อนขึ้น ทำให้สาหร่ายตายได้ การใช้แผ่นกรองแสงประมาณร้อยละ 40 ช่วยลดความเข้มแสง โดยเฉพาะในช่วงเที่ยงวัน พบว่าการพรางแสงช่วยให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงสูงกว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงโดยตรง สอดคล้องกับการทดลองของธีระพงษ์ และคณะ (2550) พบว่าการพรางแสงจะช่วยให้สาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูงกว่าสาหร่ายที่ได้รับแสงโดยตรงดังนั้นการหลีกเลี่ยงความเข้มแสงที่สูงจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย และจากการศึกษาความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับสารประกอบไนโตรเจนได้ดีที่ระดับความเข้มแสง 4,000-8,000 ลก. (ชลี และคณะ, 2548) สามารถดูดซับธาตุอาหารแอมโมเนียและไนเตรทได้ดีที่สุดที่ความเข้มแสง 7,000 ลก. สำหรับฟอสเฟตสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ความเข้มแสง 2,500 ลก. (ประหยัด, 2547) และจากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่นซึ่งเป็นอีกชื่อหนึ่งของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* ของนิสราภรณ์

(2543) ในห้องปฏิบัติการ พบว่าสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ความเข้มแสงตั้งแต่ 530-1500 ลก. นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงฤดูร้อนซึ่งมีความเข้มแสงสูงกว่าในช่วงฤดูฝนสาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *corynephora* มีการเจริญเติบโตดีกว่าช่วงฤดูฝน (อรกัญญา, 2551)

2) อุณหภูมิ (temperature)

เป็นปัจจัยที่ควบคุมการเจริญเติบโต การแพร่พันธุ์ของสิ่งมีชีวิต อุณหภูมิของน้ำจะมีผลต่อกระบวนการ metabolism ของสิ่งมีชีวิต และมีผลต่อกระบวนการดูดซับธาตุอาหาร โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับธาตุอาหารคืออุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต (Pedersen *et al.,* 2004) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวอยู่ระหว่าง 30-35 °ซ. อย่างไรก็ตามสาหร่ายบางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมได้ ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยทั่วไปจะเป็นไปตามกฎ Q10 ของ van Hoff กล่าวคืออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 °ซ. ทั้งนี้ต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สาหร่ายชนิดนั้นทนได้ (Azad and Borchardt, 1968 อ้างโดย นิสราภรณ์, 2543) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับอุณหภูมิยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสาหร่าย โดยเฉพาะสาหร่าย *Caulerpa racemosa* (Ohba *et al*., 1992) จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่น *Caulerpa lentillifera* ในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่าสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 25 °ซ. (นิสราภรณ์, 2543) และจากการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Caulerpa prolifera* ที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 22-28 °ซ. (Friedlander *et al.,* 2006) และจากการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Caulerpa taxifolia* พบว่าสาหร่ายจะตายเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 10 °ซ. และจะไม่เจริญเติบโตจนกว่าอุณหภูมิจะเพิ่มเป็น 18 °ซ. (Burfeind and Udy, 2009) และจากการศึกษาของ Pedersen และคณะ (2004) พบว่าอุณหภูมิที่ต่างกัน (5, 15 และ 25 °ซ.) ไม่มีผลต่อการดูดซับธาตุอาหารไนเตรทและฟอสเฟตของสาหร่าย *Porphyra* sp.

3) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทะเล โดยควบคุมกระบวนการนำไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์ (nitrogen assimilation) จัดเป็นแหล่งคาร์บอนที่สาหร่ายต้องใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี ได้มาจากบรรยากาศ การหายใจของสิ่งมีชีวิตและจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ซึ่งสาหร่ายทะเลใช้คาร์บอนอนินทรีย์ในรูปของก๊าซ CO_2, CO_3^{2-} และ HCO_3^- ที่ละลายน้ำได้ โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) เป็นตัวควบคุมรูปแบบของคาร์บอนอนินทรีย์ นั่นคือเมื่อ pH < 5.0 คาร์บอนอนินทรีย์จะอยู่ในรูป CO_2 เมื่อ pH 7-9 คาร์บอนอนินทรีย์จะอยู่ในรูป HCO_3^- และเมื่อ pH >9.5 คาร์บอนอนินทรีย์จะอยู่ในรูป CO_3^{2-} โดยเฉพาะในรูปแบบ HCO_3^- มีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์รักษาระดับ pH ในน้ำไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปมาก และมีคุณสมบัติเป็นด่างทำให้น้ำมีค่า alkalinity สูงขึ้น (มั่นสินและไพพรรณ, 2539; สมหมาย, 2539) ซึ่งความต้องการ CO_2 ของสาหร่ายแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป แต่จากการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Ulva rigida* โดยให้ CO_2 ที่ความเข้มข้น 10,000 มค.ล./ล. เปรียบเทียบกับการให้อากาศปกติซึ่งมีความเข้มข้นของ CO_2 350 มค.ล./ล. ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของไนเตรทจำกัด (0.25 มค.โมล) กับที่ความเข้มข้นของไนเตรท 5 มค.โมล พบว่าการเจริญเติบโตของสาหร่ายขึ้นอยู่กับธาตุอาหารไนโตรเจนมากกว่า CO_2 (Gordillo *et al.,* 2001) นอกจากนี้การทดลองเป่าอากาศที่ผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 เปรียบเทียบกับการพ่นอากาศปกติของธีระพงษ์ และคณะ (2550) พบว่าไม่ได้ทำให้สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์เพิ่มมากขึ้น แต่กลับทำให้ไดอะตอมที่ติดตามผิวสาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

4) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

โดยปกติแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-9 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีเขียวเติบโตได้ดีในช่วง pH 9-10 สาหร่ายพวงองุ่นหรือสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* ที่เลี้ยงในถังไฟเบอร์กลาส บ่อซีเมนต์ และในบ่อดินสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำทะเลที่มี pH อยู่ระหว่าง 7.0-8.5 (นิสราภรณ์, 2543; วราภรณ์ และคณะ, 2547; ธวัช และคณะ, 2548ก; Horstmann, 1983)

5) ความเค็ม (salinity)

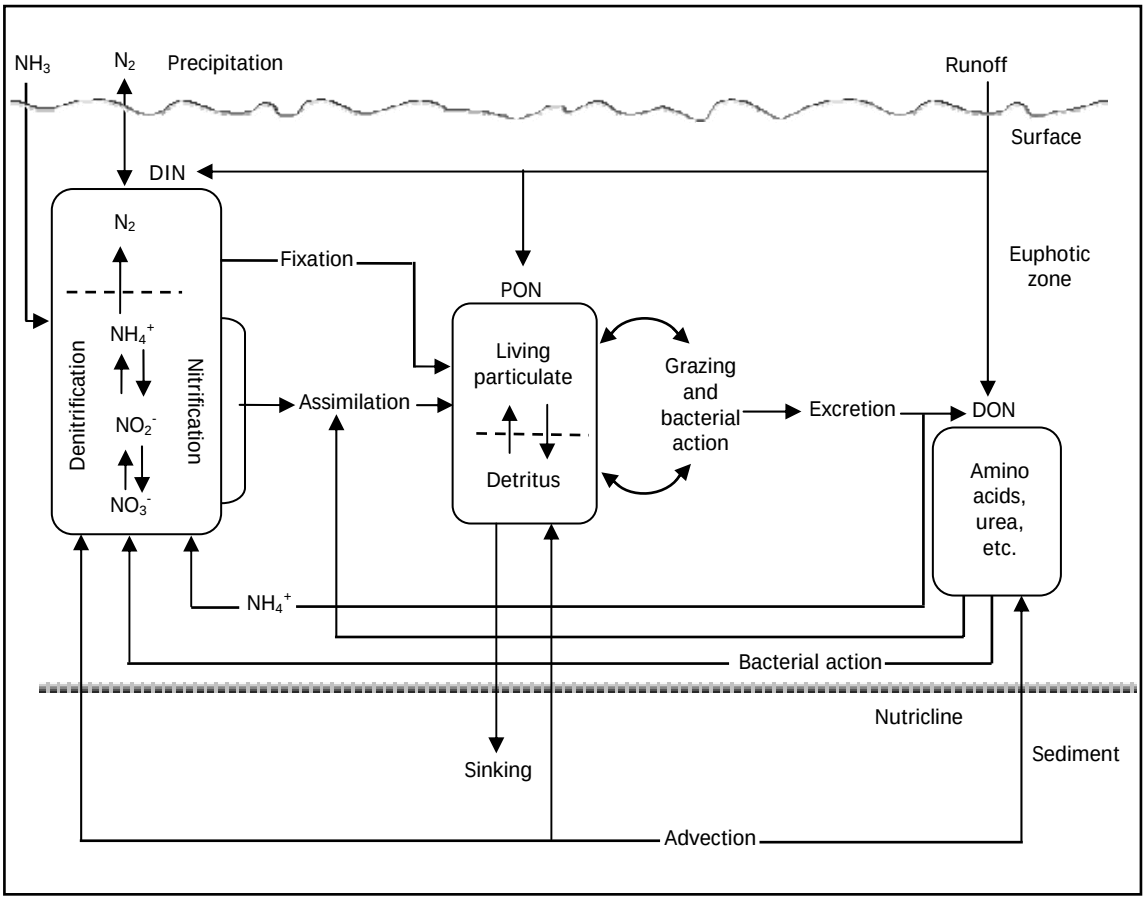
ระดับความเค็มที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย การทำฟาร์มเลี้ยงสาหร่าย *Caulerpa* ต้องห่างจากแหล่งน้ำกร่อย หรือน้ำจืด ความเค็มที่ลดต่ำลงมากจะเป็นสาเหตุทำให้สาหร่ายตาย (Trono, 1988) นอกจากนี้พบว่าสาหร่าย *Caulerpa racemosa* มีการสังเคราะห์แสงลดลงเมื่อความเค็มของน้ำทะเลที่ใช้เลี้ยงต่ำกว่า 20 ส่วนในพัน (Lobban and Harrison, 1994) สอดคล้องกับการทดลองของ Horstmann (1983) ที่พบว่าสาหร่าย *Caulerpa racemosa* สามารถสังเคราะห์แสงได้ดีที่ความเค็ม 30-40 ส่วนในพัน และจากการทดลองของสันติและคณะ (2546) พบว่าสาหร่ายพวงองุ่น *Caulerpa lentillifera* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีระดับความเค็มตั้งแต่ 25-30 ส่วนในพัน และการทดลองของนิสราภรณ์ (2543) พบว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่เลี้ยงในน้ำทะเลที่ระดับความเค็ม 30 ส่วนในพัน มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด แต่จากการทดลองของสุวรรณา และคณะ (2550) พบว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* เจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความเค็มตั้งแต่ 20-25 ส่วนในพัน และเจริญเติบโตสูงสุดที่ระดับความเค็ม 25 ส่วนในพัน

6) ธาตุอาหารและความเข้มข้นของธาตุอาหาร (nutrients and nutrient concentrations)

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีหลายชนิด เช่น C, H, O, N, P, K, Ca และ Mg เป็นต้น โดยเฉพาะธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อสาหร่ายมาก ซึ่งในสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีความต้องการธาตุอาหารทั้งสองชนิดนี้ไม่เหมือนกัน โดยส่วนมากพบว่าธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโต (Lobban and Harrison, 1994; Larned, 1998) แต่ในสาหร่ายบางชนิด เช่น สาหร่าย *Ulva rotundata*, *Enteromorpha intestinalis*, *Gracilaria gracilis* (Martínez-Aragón *et al.,* 2002) และ *Codium idule* พบว่าธาตุอาหารฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งธาตุอาหารใดจะเป็นปัจจัยในการจำกัดการเจริญเติบโตขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและความจำเพาะของถิ่นที่อยู่อาศัย (Larned, 1998)

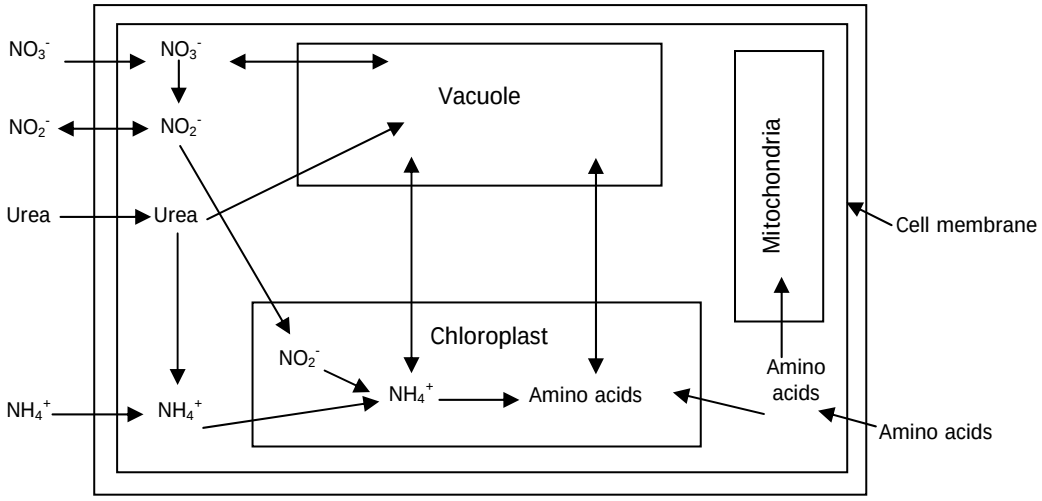
ธาตุอาหารไนโตรเจน

เป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างสารพันธุกรรมของสาหร่าย โดยเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนและรงควัตถุบางชนิด เช่น chlorophyll โดยทั่วไปรูปแบบของไนโตรเจนในน้ำแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ (total dissolved nitrogen: TDN) กับไนโตรเจนในอนุภาค (particulate organic nitrogen: PON) ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรท (NO_3^-) ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen: DON) ได้แก่ ยูเรีย ผลรวมของแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ และไนเตรท เรียกว่า ไนโตรเจนอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ (dissolved inorganic nitrogen: DIN) สำหรับไนโตรเจนในอนุภาค ได้แก่ ไนโตรเจนที่อยู่ในสิ่งมีชีวิตหรือซากสิ่งมีชีวิต ไนโตรเจนในอนุภาคนี้ส่วนหนึ่งจะตกตะกอน อีกส่วนหนึ่งจะเป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ รวมทั้งแบคทีเรีย (ภาพที่ 2) บทบาทของไนโตรเจนอนินทรีย์ที่ละลายน้ำนับว่ามีความสำคัญต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (นิคมและยงยุทธ, 2546) สาหร่ายจะใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท ยูเรีย และกรดอะมิโน (ภาพที่ 3) แต่จะใช้ในรูปแบบใดได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (ยงยุทธ, 2543; Lobban and Harrison, 1994)



ภาพที่ 2 วัฏจักรไนโตรเจนในระบบนิเวศชายฝั่ง

ที่มา: Lobban และ Harrison (1994)



ภาพที่ 3 การดูดซับแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และยูเรีย เข้าไปใช้ในเซลล์ของสาหร่าย

ที่มา: Syrett (1981) อ้างโดย Lobban และ Harrison (1994)

แอมโมเนีย

สาหร่ายและพืชได้รับแอมโมเนียจากการดูดซับเข้ามาโดยตรง การรีดิวซ์ไนเตรท การไฮโดรไลส์ยูเรีย และจากการตรึงไนโตรเจน หากสาหร่ายดูดซับแอมโมเนียมเข้าไปอยู่ในไซโตพลาสซึมแม้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำก็อาจเป็นพิษได้ สาหร่ายสามารถป้องกันความเป็นพิษจากแอมโมเนียได้โดยการนำมาสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโนและเอไมด์ และแอมโมเนียมส่วนหนึ่งถูกสะสมในแวคิวโอลซึ่งมีภาวะเป็นกรด จะช่วยป้องกันไม่ให้แอมโมเนียม (NH_4^+) เปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ที่เป็นพิษได้ (ยงยุทธ, 2543; Lobban and Harrison, 1994) สาหร่ายสามารถดูดซับแอมโมเนียได้มากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย จากการทดลองของประหยัด (2547) พบว่าสาหร่ายผมนาง *Gracilaria fisheri* สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ดีที่สุด รองลงมาคือสาหร่ายพวงองุ่น *Caulerpa lentillifera* สาหร่ายไส้ไก่ *Enteromorpha intestinalis* และสาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* ตามลำดับ แต่การทดลองของอลิสา (2543) พบว่าสาหร่าย *Acanthophora spicifera* สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ดีกว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายโดยทั่วไปมีอัตราการดูดซับแอมโมเนียสูงกว่าอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปแบบอื่น ๆ และพบว่าแอมโมเนียมมีความเกี่ยวข้องกับการดูดซับไนเตรท นั่นคือหากปริมาณแอมโมเนียม $\geq$5 มค.โมล จะยับยั้งการดูดซับไนเตรทของสาหร่าย *Gracilaria folifera* (D'Elia and Deboer, 1978 อ้างโดย Cohen and Fong, 2004) หากมีปริมาณเพียง 1 มค.โมล ก็สามารถยับยั้งการ

ดูดซับไนเตรทของสาหร่าย *Codium fragile* ได้ (Hanisak and Harlin, 1978 อ้างโดย Cohen and Fong, 2004) และหากมีปริมาณมากถึง 18 มค.โมล สามารถยับยั้งการดูดซับไนเตรทของสาหร่าย *Hypnea musciformis* ได้ถึง 50 % (Haines and Wheeler, 1978 อ้างโดย Cohen and Fong, 2004) แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานผลที่ขัดแย้งกันว่าปริมาณแอมโมเนียมที่สูงไม่มีผลต่อการดูดซับไนเตรทของสาหร่าย *Fucus spiralis* (Topinkaer, 1978 อ้างโดย Cohen and Fong, 2004) สอดคล้องกับ Corzo และ Niell (1992) รายงานว่าแอมโมเนียมไม่มีผลต่อการยับยั้งการดูดซับไนเตรทของสาหร่าย *Ulva rigita* แม้จะมีความเข้มข้นมากกว่าไนเตรท 3-4 เท่าก็ตาม และจากการศึกษาของ Cohen และ Fong (2004) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนเตรทเท่ากัน สาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* จะดูดซับแอมโมเนียมและนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าไนเตรท นอกจากนี้ผลการศึกษาของอลิสา (2543) พบว่าปริมาณไนเตรทที่เข้มข้นกว่าแอมโมเนีย ไม่มีผลยับยั้งการดูดซับแอมโมเนียของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายและพืชทั่วไปสามารถนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงเพื่อนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนและโปรตีนในการสร้างเซลล์ต่อไป ดังนั้นแอมโมเนียมจึงเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบไนโตรเจนอนินทรีย์ของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่ (ยงยุทธ, 2543; อลิสา, 2543; Lobban and Harrison, 1994) แต่การใช้ปุ๋ยแอมโมเนียก็มีข้อควรระวัง เพราะหากในน้ำมีแอมโมเนียมากเกินไป จะทำให้เกิดพิษกับสาหร่ายได้ (ยงยุทธ, 2543; สันติ, 2546) หากมีในไซโตพลาสซึมเพียงความเข้มข้นต่ำก็อาจเป็นพิษได้เช่นกัน โดยปกติทั่วไปแอมโมเนียมในไซโตพลาสซึมของพืชควรมีน้อยกว่า 15 มค.โมล (ยงยุทธ, 2543)

ไนเตรท

สาหร่ายทะเลสามารถดูดซับไนเตรทได้ดีแต่สาหร่ายจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมก่อนที่จะเลือกใช้ไนเตรท (สรวิศ, 2543; Cohen and Fong, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทที่สูงกว่าแอมโมเนียมไม่มีผลยับยั้งการดูดซับแอมโมเนียมของสาหร่าย (อลิสา, 2543) สาหร่ายแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทแตกต่างกัน จากการศึกษาของประหยัด (2547) พบว่าสาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* มีอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนเตรทดีที่สุด รองลงมาคือสาหร่าย *Acanthophora spicifera* สาหร่าย *Gracilaria fisheri* และสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มแสงที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทเช่นกัน (อลิสา, 2543; ประหยัด, 2547; Corzo and Niell, 1992) สอดคล้องกับการทดลองของอรกัญญา (2551) พบว่าสาหร่าย *Caulerpa racemosa* var. *corynephora* มีปริมาณไนเตรทสะสมในตัวสาหร่ายช่วงฤดูฝนมากกว่าช่วงฤดูร้อน

การดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ต้องอาศัยปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปไนเตรทเป็นไนไตรท์ และเปลี่ยนไนไตรท์เป็นแอมโมเนีย เพื่อนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนและโปรตีนในการสร้างเซลล์ต่อไป (ยงยุทธ, 2543; Lobban and Harrison, 1994) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ในขั้นตอนแรกคือการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นไนไตรท์โดยมีเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทส (nitrate reductase; NR) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้ (ยงยุทธ, 2543)

$$NO_3^- + NAD(P)H + H^+ \xrightleftharpoons{2e^-} NO_2^- + NAD(P)^+ + H_2O$$

ขั้นตอนที่ 2 การรีดิวซ์ไนไตรท์ให้เป็นแอมโมเนียม ซึ่งไนไตรท์จะถูกส่งเข้าไปในคลอโรพลาสต์ เพื่อเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียม โดยอาศัยเอนไซม์เฟอร์รีดอกซิน-ไนไตรท์รีดักเทส (ferredoxin-nitrite reductase; NiR) หรือที่เรียกว่าไนไตรท์รีดักเทส ดังสมการ

$$NO_2^- + 6Fe_{red} + 8H^+ \xrightleftharpoons{6e^-} NH_4^+ + 6Fe_{ox} + 2H_2O$$

สาหร่ายสามารถนำไนโตรเจนอินทรีย์ เช่น ยูเรีย ไปใช้ประโยชน์โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซีส โดยมีเอนไซม์ยูเรียเอส (urease) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2NH_3$$

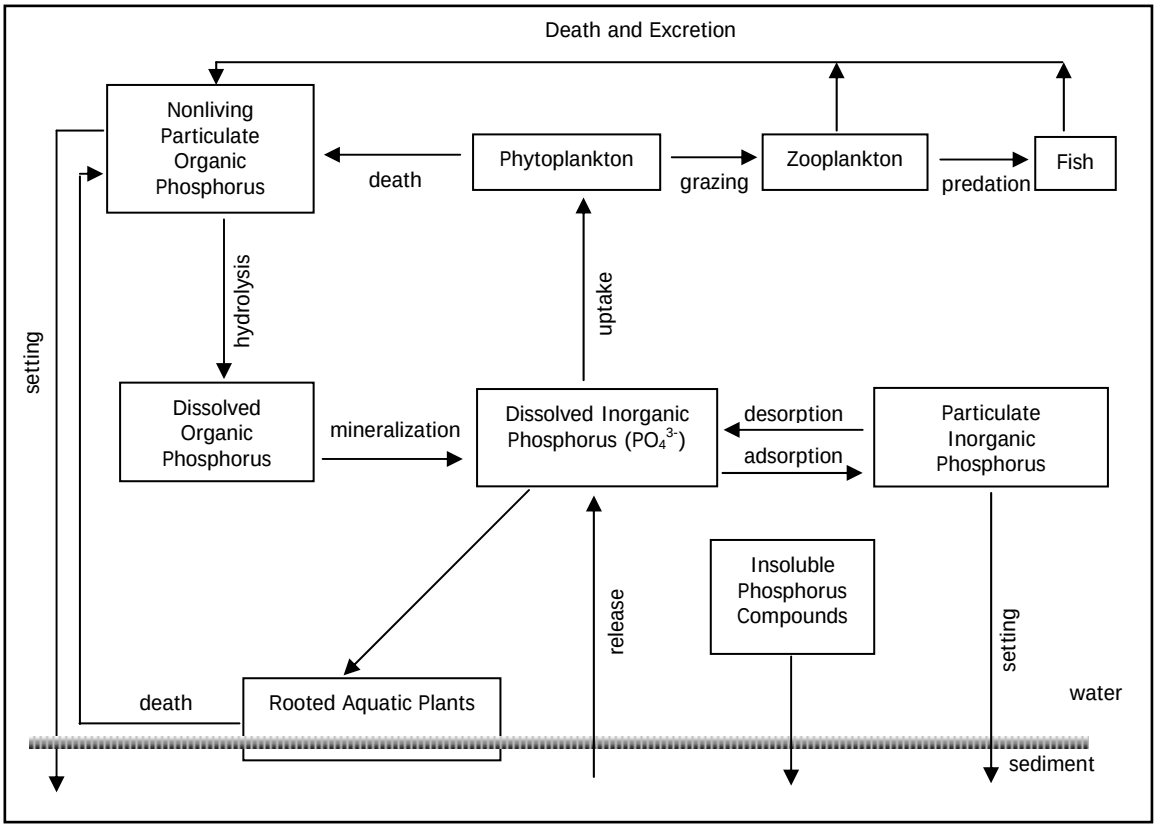
และการศึกษาเกี่ยวกับการนำยูเรียไปใช้ประโยชน์ของสาหร่ายยังมีข้อมูลน้อยมาก (Lobban and Harrison, 1994)

ธาตุอาหารฟอสฟอรัส

เป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นองค์ประกอบของ DNA RNA และ ATP ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติน้อยมาก แต่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมักมีฟอสฟอรัสสูงกว่าแหล่งน้ำธรรมชาติ การปล่อยน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำลงสู่แหล่งน้ำจึงอาจก่อมลภาวะอันเนื่องจากฟอสฟอรัส และนำไปสู่การเพิ่มจำนวนอย่างมากของแพลงก์ตอนพืชได้ ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมี 2 รูปแบบ คือ ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ (dissolved phosphorus: TDP) กับฟอสฟอรัสในอนุภาค (particulate phosphorus: PP) ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ ได้แก่ ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (dissolved inorganic phosphorus: DIP) หรือออร์โธฟอสเฟต และฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่

ละลายน้ำ (dissolved organic phosphorus: DOP) สำหรับฟอสฟอรัสในอนุภาคได้แก่ ฟอสฟอรัสที่อยู่ในสิ่งมีชีวิตหรือซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งฟอสฟอรัสในอนุภาคส่วนหนึ่งจะตกตะกอน อีกส่วนหนึ่งจะเป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ รวมทั้งแบคทีเรีย (ภาพที่ 4) รูปแบบสารประกอบออร์โธฟอสเฟตได้แก่ PO_4^{3-} HPO_4^{2-} และ $H_2PO_4^-$ สามารถละลายน้ำได้ดี เป็นรูปแบบที่แพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (นิคม และยงยุทธ, 2546; Lobban and Harrison, 1994) สำหรับรูปแบบของฟอสเฟตในแหล่งน้ำขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ในน้ำทะเลที่มีความเค็มปกติจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้เกิดออร์โธฟอสเฟตได้ ดังสมการ

$$H_3PO_4 \underset{pH = 2.2}{\longleftrightarrow} H_2PO_4^- \underset{pH = 7.2}{\longleftrightarrow} HPO_4^{2-} \underset{pH = 12.3}{\longleftrightarrow} PO_4^{3-}$$



ภาพที่ 4 วัฏจักรฟอสฟอรัสในระบบนิเวศชายฝั่ง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Gonenc และ Wolflin (2005 อ้างโดย ลักขณา, 2551)

ฟอสเฟตที่พืชโดยทั่วไปสามารถดูดไปใช้ได้ง่ายที่สุด คือ ฟอสเฟตในรูป $H_2PO_4^-$ (pH ต่ำกว่า 6.8) รองลงมาคือ HPO_4^{2-} (pH ระหว่าง 6.8-7.2) และรูป PO_4^{3-} (pH สูงกว่า 7.2) เป็นรูปที่พืชดูดใช้ได้ยากที่สุด (ยงยุทธ, 2543) ในน้ำทะเลซึ่งมีค่า pH สูงกว่า 7.2 สาหร่ายทะเลจึงสามารถดูดซับฟอสเฟตได้ในรูป PO_4^{3-}

แพลงก์ตอนพืชทะเลและสาหร่ายทะเลต้องการธาตุอาหารฟอสฟอรัสเพื่อการเจริญเติบโตในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารไนโตรเจน (ยงยุทธ, 2543; สรวิศ, 2543; คมน์ และคณะ, 2548; Lobban and Harrison, 1994; Cohen and Fong, 2004) เช่น แพลงก์ตอนพืชทะเลมีความต้องการไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N:P) ในอัตราส่วน เท่ากับ 16:1 (Redfield *et al*., 1963 อ้างโดย Lewis and Hanisak, 1996) สาหร่ายทะเลมีความต้องการ N:P ที่อัตราส่วนตั้งแต่ 5:1 ถึง 182:1 โดยเฉลี่ยทั่วไป เท่ากับ 30:1 (Atkinson and Smith, 1983 อ้างโดย Lewis and Hanisak, 1996) และความต้องการ N:P ในสาหร่ายทะเลสกุล *Caulerpa* พบว่ามีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เช่น สาหร่าย *Caulerpa taxifolia* บริเวณอ่าว Moreton ประเทศออสเตรเลียมีการแพร่กระจายได้ดีในน้ำที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 7.5:1 (Burfeind and Udy, 2009) จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ในห้องปฏิบัติการ พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 1 ก./ล. เมื่อใช้ปุ๋ยไนเตรทที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และมีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีการเจริญเติบโตดีที่สุด (สันติ, 2546) สำหรับสาหร่าย *Gracilaria fisheri* เจริญเติบโตดีที่สุดเมื่อเลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 (คมน์ และคณะ, 2548) และเมื่อหาอัตราส่วนระหว่าง DIN:PO_4^{3-} ในน้ำบริเวณอ่าว Kaneohe ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งพบว่ามีสาหร่ายทะเลเจริญเติบโตได้ดี พบว่ามีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 4:1 (Larned, 1998) จะเห็นได้ว่าสาหร่ายทะเลแต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหาร N:P ที่แตกต่างกัน

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับธาตุอาหาร (kinetics uptake of nutrients)

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหาร([S]) กับอัตราการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่าย (V) สมการ Michaelis-Menten จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาข้อมูลเชิงจลนพลศาสตร์ (kinetics) โดยอัตราการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารจนถึงจุดอิ่มตัวที่อัตราการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายมีค่าคงที่ นั่นคืออัตราการดูดซับจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารมากกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามเส้นโค้งของสมการ Michaelis-Menten (ภาพที่ 5) คือ

$V = (V_{max} \times [S])/(K_m + [S])$

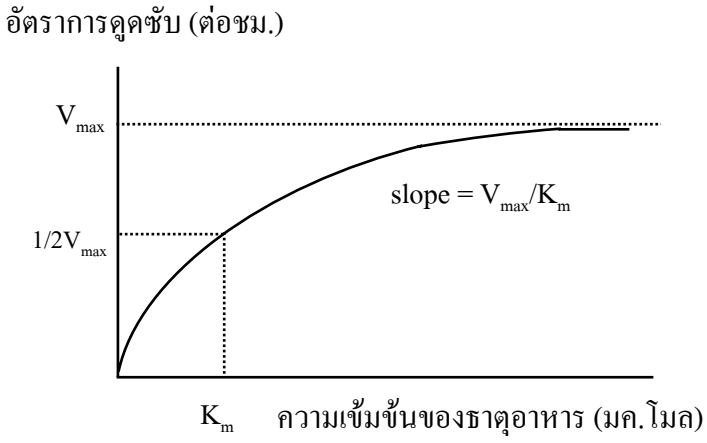
เมื่อ V = อัตราการดูดซับ (มก./ก.นน.สด/วัน)

V_{max} = อัตราการดูดซับสูงสุด (maximum nutrient uptake rate) (มก./ก.นน.สด/วัน)

K_m = ค่าคงที่ของความเข้มข้นธาตุอาหารที่ทำให้อัตราการดูดซับเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการดูดซับสูงสุด (half-saturation constant) (มก./ล.)

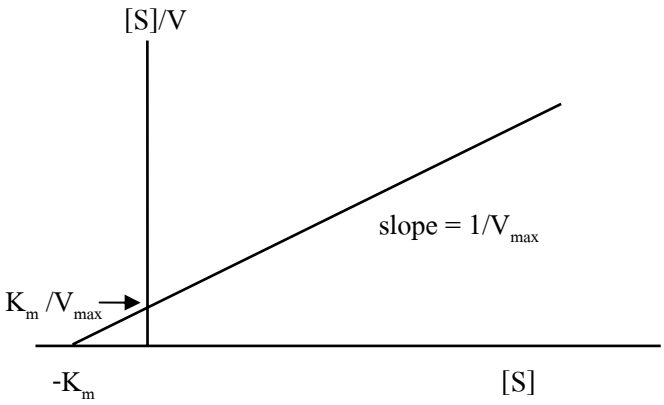
$[S]$ = ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (มก./ล.)

แต่การหาค่า V_{max} และ K_m ที่ถูกต้องจะหาจากกราฟนี้ไม่ได้ เพราะเส้นโค้งที่ได้จากกราฟจะแสดงส่วนที่อัตราการดูดซับไม่เพิ่มเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหาร ทำให้ได้ส่วนของกราฟที่มีความแบนราบเร็วเกินไป ดังนั้นในการหาค่า V_{max} และ K_m จึงนิยมแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงก่อน ซึ่งส่วนมากนิยมใช้สมการเส้นตรงของฮานส์ (ภาพที่ 6) โดยพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหาร/อัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) แล้วคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m จากนั้นนำค่าทั้งสองกลับมาแทนในสมการของ Michaelis-Menten (อลิสา, 2543; Lobban and Harrison, 1994)



ภาพที่ 5 กราฟเส้นโค้ง Michaelis-Menten แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหารกับอัตราการดูดซับธาตุอาหาร

ที่มา: ดัดแปลงจาก Lobban และ Harrison (1994)



ภาพที่ 6 กราฟเส้นตรงของฮานส์ ใช้สำหรับหาค่า V_{max} และค่า K_m
ที่มา: ดัดแปลงจาก Lobban และ Harrison (1994)

จลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ธาตุอาหาร ความเข้มข้นของธาตุอาหาร และปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเข้มแสง เป็นต้น (Taylor and Rees, 1999; Cohen and Fong, 2004; Silkin and Chubchikova, 2007) จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารแอมโมเนียของสาหร่ายโดยทั่วไปพบว่าสามารถดูดซับได้สูงสุดตั้งแต่ 0.42-0.70 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแอมโมเนียที่สูงส่งผลให้เกิดพิษกับเซลล์ของสาหร่าย (Waite and Mitchell, 1972 อ้างโดย Lobban and Harrison, 1994) และจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายชนิดต่างๆ ปรากฏดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ

ชนิดสาหร่าย	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน		ไนเตรท-ไนโตรเจน		ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส		แหล่งอ้างอิง
	V_{max}	K_m	V_{max}	K_m	V_{max}	K_m	
C. lentillifera (นน.สด)	0.0897	18.5822	0.0175	40.1094	-	-	อลิสา (2543)
A. spicifera (นน.สด)	0.3406	50.9554	0.0425	90.0506	-	-	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน		ไนเตรท-ไนโตรเจน		ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส		แหล่งอ้างอิง
	V_{max}	K_m	V_{max}	K_m	V_{max}	K_m	
Enteromorpha sp. (นน.แห้ง)	0.371	0.2548	-	-	-	-	Taylor และRees (1999)
Osmundaria colensoi (นน.แห้ง)	0.161	0.5684	-	-	-	-	Taylor และ Rees (1999)
Gelidium latifolium (นน.สด)	-	-	0.0714	0.266	0.0248	0.054	Silkin และ Chubchikova (2007)
U. rotundata (นน.แห้ง)	-	-	-	-	0.089	0.0139	Martínez-Aragón และคณะ (2002)
E. intestinalis (นน.แห้ง)	-	-	-	-	0.082	0.0195	
G. gracilis (นน.แห้ง)	-	-	-	-	0.039	0.0235	

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ศึกษา

หน่วยวัดค่า V_{max} เท่ากับ มก./ก./ชม.

หน่วยวัดค่า K_m เท่ากับ มก.ธาตุอาหาร/ล.

1.2.3 น้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล

น้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้ง หมายถึง น้ำที่ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการเลี้ยงกุ้ง และถูกถ่ายลงสู่คลองระบายน้ำหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของน้ำทางเคมี ทางฟิสิกส์ และทางชีวภาพเปลี่ยนแปลงไป (ยงยุทธ และคณิต, 2537) มักมีธาตุอาหารต่าง ๆ ละลายอยู่ในปริมาณมาก โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อแพร่กระจายไปสู่แหล่งน้ำชายฝั่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืช ก่อให้เกิดปรากฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสี ซึ่งเรียกว่า “ปรากฏการณ์ขี้ปลาวาฬ” หรือ Red Tide เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำเสื่อมโทรมและมีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งและสัตว์น้ำชายฝั่งชนิดอื่น ๆ น้อยลง ทำให้สัตว์น้ำตายเนื่องจากแหล่งน้ำขาดออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545; Marinho-Soriano *et al*., 2009) แม้ว่าปัจจุบันเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งหันมาใส่ใจกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการ

เลี้ยงกุ้งมากขึ้น รวมทั้งมีการกำหนดมาตรฐานจากหน่วยงานราชการ เช่น กรมประมง เพื่อควบคุมให้อุตสาหกรรมการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีความยั่งยืน โดยได้มีการพัฒนาเข้าสู่ระบบที่มีการตรวจสอบควบคุมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกษตรอินทรีย์ (เชาว์ และคณะ, 2548) ระบบมาตรฐานการจัดการเลี้ยงที่ดี (Good Aquaculture Practice: GAP) ซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับการผลิตกุ้งทะเลให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค มีสุขลักษณะที่ดีของฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล มีการใช้ยาและสารเคมีในการเลี้ยงอย่างถูกต้องโดยไม่ให้มีสารตกค้างในเนื้อกุ้ง และมาตรฐานการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Code of Conduct: CoC) ซึ่งเน้นการจัดระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลอย่างยั่งยืนตลอดสายการผลิตจากฟาร์มถึงโรงงานแปรรูป เพื่อพัฒนาให้ได้กุ้งคุณภาพมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค (สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล, 2552) แต่เนื่องจากความต้องการผลผลิตสูงการเลี้ยงกุ้งในปัจจุบันจึงเป็นการเลี้ยงแบบหนาแน่น (ชลอ, 2550) ดังนั้นปัญหาด้านคุณภาพน้ำจึงยังคงมีอยู่เห็นได้จากการสำรวจค่าคุณภาพน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลของสิริ และคณะ (2548) เพื่อประเมินผลกระทบต่อระบบนิเวศในทะเลสาบสงขลา พบว่าน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในฟาร์มขนาดเล็ก (น้อยกว่า 10 ไร่) และขนาดกลาง (10-50 ไร่) ในจังหวัดสงขลาและพัทลุง มีตัวแปรสารแขวนลอย แอมโมเนีย ฟอสฟอรัสรวม ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไนโตรเจนรวม มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) สอดคล้องกับการศึกษาของพุทธและคณะ (2550) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตกับคุณภาพน้ำทิ้งและตะกอนดินจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่ความหนาแน่น 100,000-240,000 ตัว/ไร่ พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งมีค่าแอมโมเนียรวม ไนโตรเจนรวม ฟอสฟอรัสรวม สารแขวนลอย และค่าบีโอดีสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (ตารางที่ 2) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าคุณภาพน้ำทิ้งมีค่าเกินมาตรฐานมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศของทะเลสาบมีโอกาสเสื่อมโทรม เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายเจริญเติบโตมากเกินไปในแหล่งน้ำ

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมและเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ (2550)	รายงานของ สิริ และคณะ (2548)	รายงานของ พุทธ และคณะ (2550)
พีเอช	6.5-9.0	7.8-8.5	-
บีโอดี (มก./ล.)	20.0	3.7-19.9	12.2-40.2
สารแขวนลอย (มก./ล.)	70.0	55.0-345.0	87.0-480.0
แอมโมเนีย (มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.)	1.1	0.1-5.5	0.4-37.2
ไนโตรเจนรวม (มก.ไนโตรเจน/ล.)	4.0	3.5-14.8	7.8-61.0
ฟอสฟอรัสรวม (มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	0.4	0.3-0.6	0.14-1.03
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./ล.)	0.01	0.1-2.2	-

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการตรวจวัด

1.2.4 การใช้สาหร่ายทะเลในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเล

มีการศึกษาการใช้สาหร่ายทะเลชนิดต่าง ๆ บำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเล โดยเลี้ยงสาหร่ายในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ พบว่าสาหร่ายทะเลแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัด (ตารางที่ 3) รวมทั้งอัตราการดูดซับธาตุอาหาร (ตารางที่ 4) ต่างกัน

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายทะเลในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ชนิดสาหร่าย	ประสิทธิภาพการบำบัด			แหล่งอ้างอิง
	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ไนเตรท-ไนโตรเจน	ออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	
C. lentillifera	33.86 % ที่ความหนาแน่น 10 ก./ล. ในวันที่ 1	74.65 % ที่ความหนาแน่น 5 และ 10 ก./ล.	17.65 % ที่ความหนาแน่น 5 และ 10 ก./ล. ในวันที่ 1	สันติ (2546)

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชนิดสาหร่าย	ประสิทธิภาพการบำบัด			แหล่งอ้างอิง
	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ไนเตรท-ไนโตรเจน	ออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	
G. fisheri	33.23 % ในวันที่ 2	16.10 % ในวันที่ 2	32.18 % ในวันที่ 2	อัจฉรียา (2544)
C. macrophysa	83.60 % ที่ความหนาแน่น 10 ก./ล.	97.50 % ที่ความหนาแน่น 5 และ 10 ก./ล.ในวันที่ 3	-	ศิริวรรณ (2538)
S. polycystum	84.04 % ที่ความหนาแน่น 5 และ 10 ก./ล.	67.25 % ที่ความหนาแน่น 10 ก./ล. ในวันที่ 3	-	
G. salicornia	98.23 % ที่ความหนาแน่น 10 ก./ล. ในวันที่ 1	95.25 % ที่ความหนาแน่น 5 ก./ล. ในวันที่ 3	-	

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการตรวจวัด

และจากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ในบ่อบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ 7.98-85.35 % ไนไตรท์ 0.11-82.61 % ไนเตรท 5.96-32.35 % ไนโตรเจนรวม 6.12-7.48 % และสารแขวนลอย 79.47 % (สันติ, 2546; วลีรัตน์ และพุทธ, 2547; จามรี และพุทธ, 2548; ธวัช และคณะ, 2548ก)

ตารางที่ 4 อัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนของสาหร่ายทะเลในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ชนิดสาหร่าย	อัตราการดูดซับ	
	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ไนเตรท-ไนโตรเจน
C. macrophysa	0.0228 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 18 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.	0.011 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 6 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.
S. polycystum	0.007 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 24 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.	0.0099 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 72 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.
G. salicornia	0.0095 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 12 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.	0.003 มก./ก.นน.สด/วัน ในชม.ที่ 6 ที่ความหนาแน่น 1 ก./ล.

ที่มา: ศิริวรรณ (2538)

1.2.5 การใช้สาหร่ายทะเลในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งชนิดอื่น ๆ

นอกจากสามารถนำสาหร่ายมาใช้ในการบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลแล้ว ยังสามารถใช้สาหร่ายเป็นตัวกรองชีวภาพในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งทะเลชนิดอื่น ๆ อีก เช่น จากการทดลองใช้สาหร่าย *Ulva pertusa* ในระบบกรองชีวภาพซึ่งเลี้ยงปลิงทะเล เป็นเวลา 90 วัน ของ Wang และคณะ (2007) พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ 68 % บำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ 26 % การใช้สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* เลี้ยงร่วมกับหอยเป๋าฮื้อเป็นระยะเวลา 168 วัน พบว่าชุดการทดลองที่มีสาหร่ายซึ่งไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมีค่าแอมโมเนียรวมและไนเตรทต่ำกว่าชุดทดลองที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำวันละ 80 % (เพ็ญแข, 2548) สอดคล้องกับการใช้สาหร่ายชนิดดังกล่าวเป็นตัวกรองชีวภาพในการเลี้ยงปลากะพงขาว พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ 25 % บำบัดไนเตรทได้ 7.17 % และบำบัดฟอสเฟตได้ 5.81 % (อรัญญา และคณะ, 2549) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สาหร่ายทะเลสีแดง ได้แก่ สาหร่าย *Chondrus crispus* สาหร่าย *Gracilaria bursa* และสาหร่าย *Palmaria palmata* ทางตอนเหนือของโปรตุเกส ในระบบกรองชีวภาพจากการเลี้ยงปลา turbot (*Scophthalmus maximus*) และปลากะพงยุโรป *Dicentrachus labrax* พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด เท่ากับ 41.3, 76.7 และ 41.0 % ในฤดูร้อน, ฤดูใบไม้ผลิถึงฤดูร้อน และฤดูใบไม้ผลิ ตามลำดับ (Matos *et al*., 2006) และการใช้สาหร่าย *Ulva reticulata* ร่วมกับการเลี้ยงปลาในประเทศแทนซาเนีย สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ 65 % บำบัดฟอสเฟตได้ 33 % (Msuya *et al*., 2006) เช่นเดียวกับ Neori และคณะ (2000) ศึกษาการเลี้ยงปลาแบบผสมผสานในประเทศ

อิสราเอลซึ่งเลี้ยงปลา *Sparus aurata* หอยเป๋าฮื้อ *Haliotis discus hannai* สาหร่าย *Gracilaria conferta* และสาหร่าย *Ulva lactuca* โดยนำน้ำที่ใช้เลี้ยงหอยเป๋าฮื้อมาเลี้ยงปลา น้ำจากบ่อเลี้ยงปลามาเลี้ยงสาหร่าย พบว่าสาหร่าย *Ulva lactuca* สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ 80 % แต่สาหร่าย *Gracilaria conferta* ไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งได้ รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงเพาะอนุบาลสัตว์น้ำของสาหร่าย *Acanthophora spicifera* พบว่าสาหร่ายสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ เท่ากับ 54.93 % ที่ความหนาแน่น 0.1 ก./ล. สามารถบำบัดไนเตรทได้ เท่ากับ 86.07 % ที่ความหนาแน่น 1.0 ก./ล. และสามารถบำบัดฟอสเฟตได้ เท่ากับ 20.72 % ที่ความหนาแน่น 0.1 ก./ล. (ธวัช และคณะ, 2548ข) และจากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้สูงสุด เท่ากับ 98.80 % ที่ความหนาแน่น 200 ก./ล. สามารถบำบัดไนเตรทได้มากที่สุด เท่ากับ 19.88 % ที่ความหนาแน่น 50 ก./ล. และสามารถบำบัดฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 20.97 % ที่ความหนาแน่น 100 ก./ล. (มกรานนท์, 2550)

สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียต่างกัน เห็นได้จากการศึกษาอัตราการดูดซับแอมโมเนียของสาหร่าย *Acanthophora spicifera*, สาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, สาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* และสาหร่าย *Gracilaria fisheri* พบว่าสาหร่าย *Acanthophora spicifera* และสาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* มีอัตราการดูดซับมากที่สุดที่แอมโมเนียความเข้มข้น 0.5 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. สามารถดูดซับได้ในอัตรา 160.43 และ 296.14 มก./ก.นน.แห้ง/วัน สำหรับสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* และสาหร่าย *Gracilaria fisheri* มีอัตราการดูดซับมากที่สุดที่แอมโมเนียความเข้มข้น 1.0 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. สามารถดูดซับได้ในอัตรา 279.87 และ 376.34 มก./ก.นน.แห้ง/วัน ตามลำดับ (ประหยัด, 2547) และจากการทดลองของมกรานนท์ (2550) พบว่าอัตราการดูดซับแอมโมเนียของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ที่ความหนาแน่น 50 ก./ล. มากที่สุด เท่ากับ 0.056 มก./ก.นน.สด/วัน

สำหรับการดูดซับไนเตรท พบว่าสาหร่าย *Acanthophora spicifera*, สาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, สาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* และสาหร่าย *Gracilaria fisheri* มีอัตราการดูดซับมากที่สุดที่ไนเตรทความเข้มข้น 2.5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สามารถดูดซับได้ในอัตรา 124.24, 69.54, 144.6 และ 123.46 มก./ก.นน.แห้ง/วัน ตามลำดับ (ประหยัด, 2547) สาหร่าย *Caulerpa lentillifera* สามารถดูดซับได้มากที่สุด เท่ากับ 0.103 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่น 50 ก./ล. (มกรานนท์, 2550) ส่วนสาหร่าย *Acanthophora spicifera* สามารถดูดซับไนเตรทได้มากที่สุดเท่ากับ 0.0637 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่น 1.0 ก./ล. (ธวัช และคณะ, 2548ข)

และจากการศึกษาการดูดซับธาตุอาหารฟอสฟอรัสของประหยัด (2547) พบว่าสาหร่าย *Acanthophora spicifera*, สาหร่าย *Caulerpa lentillifera*, สาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* และสาหร่าย *Gracilaria fisheri* มีอัตราการดูดซับมากที่สุดที่ฟอสเฟตความเข้มข้น 10.0 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. สามารถดูดซับได้ในอัตรา 196.55, 257.32, 228.76 และ 265.47 มก./ก.นน.แห้ง/วัน ตามลำดับ ส่วนสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* สามารถดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับ 0.0013 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่น 100 ก./ล. (มกรานนท์, 2550) และจากการทดลองใช้สาหร่าย *Acanthophora spicifera* ของธวัช และคณะ (2548ข) พบว่าสามารถดูดซับฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 0.0783 มก./ก.นน.สด/วัน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (ศิริวรรณ, 2538; สันติ, 2546; ประหยัด, 2547; จามรี และพุทธ, 2548; ธวัช และสุริยะ, 2548; Neori *et al.*, 2000; Matos *et al.*, 2006; Msuya *et al*., 2006; Valente *et al*., 2006; Yang *et al*., 2006) ธาตุอาหารและความเข้มข้นของธาตุอาหาร (สมศักดิ์, 2534; ยงยุทธ, 2543; อลิสา, 2543; สันติ, 2546; คมน์ และคณะ, 2548; Cohen and Fong, 2004; Pedersen *et al*., 2004) ระดับความเค็มของน้ำ (สันติ, 2546; ชลี และคณะ, 2548; สุวรรณา และคณะ, 2550) ความหนาแน่นของสาหร่าย (ศิริวรรณ, 2538; สันติ, 2546) ความเข้มแสง (ประหยัด, 2547; William and Dennison, 1990; Corzo and Niell, 1992; Ohba *et al*., 1992; Gacia *et al*., 1996; Powtongsook *et al*., 2000) อุณหภูมิ (นิสราภรณ์, 2543; Pedersen *et al.,* 2004; Friedlander *et al.,* 2006; Burfeind and Udy, 2009) และฤดูกาล (Lewmanomont and Ogawa, 1995; Matos *et al*., 2006)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

2. ศึกษาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก ได้แก่ ชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ

3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ

บทที่ 2
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์การทดลอง และสารเคมี

2.1.1 วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองเลี้ยงสาหร่าย

1) สาหร่ายขนนก เก็บรวบรวมจากศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งกระบี่ ตำบลไสไทย อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่

2) น้ำทะเลจากฟาร์ม CPF ตำบลโคกกลอย อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

3) น้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม *Penaeus vannamei* ที่ได้รับมาตรฐานการเลี้ยงกุ้งทะเลจีเอพี (Good Aquaculture Practice) จากฟาร์มรัชฎา ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

4) ถังไฟเบอร์กลาสทรงกระบอก ขนาดความจุน้ำ 500 ล. จำนวน 2 ถัง

5) ถังไฟเบอร์กลาสทรงกระบอก ขนาดความจุน้ำ 1,000 ล. จำนวน 3 ถัง

6) บ่อซีเมนต์ขนาด 4.0×4.0×2.0 ม. จำนวน 1 บ่อ

7) บ่อซีเมนต์ขนาด 1.5×2.0×0.6 ม. จำนวน 1 บ่อ

8) ตู้กระจกทดลอง ขนาด 30×40×24 ซม. จำนวน 39 ตู้

9) ขวดโหลพลาสติก ขนาดความจุ 2.5 ล. จำนวน 64 ใบ

10) สารเคมีสำหรับเลี้ยงสาหร่าย ได้แก่ NH_4Cl, Urea, KNO_3 และ KH_2PO_4

11) อุปกรณ์ให้อากาศและหัวทราย

12) หลอดไฟฟลูออร์เรสเซนท์ (fluorescent lamp) ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 16 หลอด

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ สำหรับตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ชั่งน้ำหนักและอื่น ๆ

1) เครื่อง UV-visible spectrophotometer ยี่ห้อ Genesys รุ่น Genesys 10 series

2) ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum pump) พร้อมอุปกรณ์

3) เครื่องมือวัดความเค็มแบบหักเหแสง (salino refractometer) ยี่ห้อ Atago

4) เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 991002

5) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 9143

6) ตู้อบ (hot air oven) ยี่ห้อ Binder

7) หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave)

8) โถดูดความชื้น (desiccator)

9) แผ่นให้ความร้อน (hot plate)

10) แผ่นกรองใยแก้ว GF/C (Whatman)

11) ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ

12) เครื่องแก้วชนิดต่าง ๆ ได้แก่ หลอดทดลอง (test tube) ขวดรูปชมพู่ (flask) บีกเกอร์ (beaker) ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) หลอดรีดักชัน (reduction column) กระบอกตวง (volumetric cylinder) ปิเปต (pipet)

13) ลูกยางสามทาง

14) สารเคมีสำหรับวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

15) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE 412

16) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 224S

17) น้ำกลั่นชนิด de-ionized

18) เครื่องวัดความเข้มแสง (digital lux-meter) ยี่ห้อ Digicon รุ่น LX-50

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมพันธุ์สาหร่าย

รวบรวมสาหร่ายขนนกจากบ่อดินเลี้ยงปลาทะเลของศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งกระบี่ คัดแยกสาหร่ายและพักในถังไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีระดับน้ำลึกประมาณ 40-50 ซม. ใช้น้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน ให้อากาศตลอดเวลาเป็นเวลา 7-10 วัน เพื่อให้สาหร่ายขนนกมีความแข็งแรง ก่อนเริ่มทำการทดลองนำสาหร่ายขนนกที่ปรับสภาพความคุ้นเคยแล้วตัดเป็นท่อนๆ ละ 10-15 ซม. พักไว้ในบ่อซีเมนต์ซึ่งมีระดับน้ำลึกประมาณ 40-50 ซม. ต่ออีก 1 คืน เพื่อให้สาหร่ายมีการสมานบาดแผลที่ถูกตัด (Gacia *et al*., 1996) จากนั้นชั่งน้ำหนักให้ได้ตามที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง

2.2.2 การเตรียมน้ำทะเล และน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม

1) การเตรียมน้ำทะเล นำน้ำทะเลจากฟาร์ม CPF ตำบลโคกกลอย อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา ใส่บ่อซีเมนต์ฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนผง ($Ca(OCl)_2$) ในอัตรา 30 มก./ล. (สถาพร และสุนิตย์, 2540) พักไว้ 7-10 วัน และทดสอบการตกค้างของคลอรีนโดยใช้ชุดทดสอบคลอรีนก่อนนำมาใช้ในการทดลอง จากนั้นสูบน้ำผ่านถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดตากรอง 20 มค.ม. ลงถังไฟเบอร์กลาสขนาด 1,000 ล. พักน้ำไว้เพื่อใช้สำหรับการทดลอง

2) การเตรียมน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม นำน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม ซึ่งมีอายุการเลี้ยง 50 วัน จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลมาตรฐานจีเอพี (Good Aquaculture Practice) จากฟาร์มรัชฎา ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา ซึ่งเป็นการเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น (72 ตัว/ตร.ม.) ความเค็มเท่ากับ 20 ส่วนในพัน พักไว้ในถังไฟเบอร์กลาส ขนาด 500 ล. จำนวน 1 ถัง ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน จากนั้นกรองน้ำส่วนบนผ่านถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดตากรอง 20 มค.ม. ลงถังไฟเบอร์กลาสขนาด 500 ล. พักน้ำไว้เพื่อใช้สำหรับการทดลอง

2.2.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

ประกอบด้วย 4 ชุดทดลอง จากการใช้ปุ๋ย 4 ชนิดคือ ยูเรีย แอมโมเนียมคลอไรด์ โปแตสเซียมไนเตรท และโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ชนิดละ 4 ระดับความเข้มข้นคือ 1.0, 2.0, 4.0 และ 5.0 มก.ปุ๋ย/ล. ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ และชุดควบคุมไม่มีสาหร่าย ทำการทดลองในขวดโหล บรรจุน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนผง พักไว้ 7-10 วัน และทดสอบการตกค้างของคลอรีนโดยใช้ชุดทดสอบคลอรีน ก่อนนำมาใช้ในการทดลองกรองผ่านถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตา 20 มค.ม. ตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเลที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำรวม แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ปรับความเข้มข้นของธาตุอาหารให้มีความเข้มข้นของไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.0, 2.0, 4.0 และ 5.0 มก./ล. โดยใช้สารละลาย $CO(NH_2)_2$ เป็นแหล่งอินทรีย์ไนโตรเจน สารละลาย NH_4Cl เป็นแหล่งแอมโมเนีย สารละลาย KNO_3 เป็นแหล่งไนเตรท และสารละลาย KH_2PO_4 เป็นแหล่งออร์โธฟอสเฟต ใช้น้ำทะเลขวดโหลละ 1.5 ล. ใส่สาหร่ายน้ำหนัก 1.5 ก. (สันติ, 2546) ใช้ความเข้มแสงจากหลอดไฟฟลูออร์เรสเซนท์ ชนิด daylight ที่ระดับ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม. คำนวณหาอัตราการดูดซับธาตุอาหาร โดยใช้สูตร

อัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย (มก./ก.นน.สด/วัน)

$$= \frac{[(C_{t1}-C_{t2}) \text{ ชุดทดลอง} - (C_{t1}-C_{t2}) \text{ ชุดควบคุม}] \times vol}{w \times t}$$

เมื่อ C_{t1} = ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เวลา t1 (มก./ล.)

C_{t2} = ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เวลา t2 (มก./ล.)

vol = ปริมาตรน้ำ (ล.)

w = น้ำหนักสดของสาหร่าย (ก.)

t = ระยะเวลาในการทดลอง (วัน)

จากนั้นนำข้อมูลมาแปลงให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงของฮานส์ โดยการพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) เพื่อคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m แล้วจึงนำค่าทั้งสองกลับมาแทนค่าในสมการ Michaelis-Menten หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย (V) โดยใช้สมการ Michaelis-Menten (Lobban and Harrison, 1994) ซึ่งมีความเข้มข้นของเอนไซม์คงที่และใช้ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ระดับต่าง ๆ

$$V = (V_{max} \times [S]) / (K_m + [S])$$

เมื่อ V = อัตราการดูดซับ (มก./ก.นน.สด/วัน)

V_{max} = อัตราการดูดซับสูงสุด (maximum nutrient uptake rate at saturating substrate concentration) (มก./ก.นน.สด/วัน)

K_m = ค่าคงที่ของความเข้มข้นธาตุอาหารที่ทำให้อัตราการดูดซับเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการดูดซับสูงสุด (half-saturation constant for substrate) (มก./ล.)

[S] = ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (มก./ล.)

โดย V_{max} เท่ากับ 1/slope และ K_m เท่ากับ จุดตัดแกน X

2.2.4 ศึกษาชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน : ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

กำหนดชุดการทดลองเป็นแบบ 3x4 Factorial คือแหล่งของไนโตรเจนและความเข้มข้นของอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส โดยแหล่งของไนโตรเจนที่ใช้ 3 แหล่งคือ จากปุ๋ย $CO(NH_2)_2$ ปุ๋ย NH_4Cl และปุ๋ย KNO_3 แบ่งการทดลองออกเป็น 12 ชุดทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ และชุดควบคุมซึ่งใช้น้ำทะเลไม่ใส่ปุ๋ย ทำการทดลองในตู้กระจกขนาด 30x40x24 ซม. ใช้น้ำทะเลความเค็ม 30 ส่วนในพัน ซึ่งผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนแล้วเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 2.2.3 กรองผ่านถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตา 20 มค.ม. วัดปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำรวม แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส วิเคราะห์อัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ในรูปของไนโตรเจนละลายน้ำรวม:ออร์โธฟอสเฟตก่อนเริ่มทำการทดลอง โดยมีวิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานของปุ๋ยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากวิธีของ APHA และคณะ (1980) ปรับความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวม โดยใช้ความเข้มข้นปุ๋ย 2 มก./ล.ในชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ย $CO(NH_2)_2$ และปุ๋ย NH_4Cl สำหรับชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ย KNO_3 เป็นแหล่งไนโตรเจน ใช้ความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. แล้วปรับออร์โธฟอสเฟตซึ่งใช้ KH_2PO_4 ให้ได้สัดส่วนตามที่วางแผนไว้ บรรจุน้ำทะเลที่ได้ปรับความเข้มข้นของไนโตรเจนแล้วใส่ในตู้ทดลอง ตู้ละ 20 ล. แล้วจึงปรับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ให้ได้อัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 (ตารางที่ 5) ในทุกชุดทดลอง (ยกเว้นชุดควบคุม) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารไนโตรเจน (ยงยุทธ, 2543; สรวิศ, 2543; คมน์ และคณะ, 2548; Lobban and Harrison, 1994; Cohen and Fong, 2004)

ตารางที่ 5 แหล่งของไนโตรเจนและอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ที่ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

แหล่งของไนโตรเจน	อัตราส่วน N:P
ปุ๋ยยูเรีย ($CO(NH_2)_2$)	2:1
	4:1
	8:1
	10:1

ตารางที่ 5 (ต่อ)

แหล่งของไนโตรเจน	อัตราส่วน N:P
ปุ๋ยแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	2:1
	4:1
	8:1
	10:1
ปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรท (KNO_3)	2:1
	4:1
	8:1
	10:1

ใช้สาหร่ายที่ระดับความหนาแน่น 1 ก./ล. มีการเปลี่ยนน้ำทะเลโดยใช้น้ำทะเลที่ปรับค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ให้มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของทุกชุดทดลองที่ต้องการศึกษา เพื่อให้อัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสคงที่ตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนน้ำและวัดปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำรวม แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เพื่อหาอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ทุก 5 วัน ระหว่างการเลี้ยงตัดสาหร่ายส่วนที่ตายออกจากตู้ทดลอง เพื่อป้องกันการย่อยสลายและปล่อยสารอาหารคืนสู่ระบบ ชั่งน้ำหนักสดของสาหร่ายทุก 7 วัน เพื่อหาอัตราการเจริญเติบโต ทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน 28 วัน

2.2.5 ศึกษาความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยไนเตรทที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่าย

กำหนดชุดการทดลองเป็นแบบ 3x3 Factorial คือทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่มีความหนาแน่น 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นปุ๋ย 3 ระดับ ซึ่งกำหนดชนิดปุ๋ยและความเข้มข้นของปุ๋ยที่ใช้จากผลการทดลองในข้อ 2.2.4 แบ่งการทดลองออกเป็น 9 ชุดทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ ทำการทดลองในตู้กระจกขนาด 30x40x24 ซม. โดยเตรียมน้ำทะเลที่ความเค็ม 30 ส่วนในพัน มีการเปลี่ยนน้ำทะเลโดยใช้น้ำทะเลที่ปรับค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ให้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.2.4 และปรับค่าความ

เข้มข้นของปุ๋ยให้เท่ากับความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา เพื่อให้อัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสและความเข้มข้นของปุ๋ยที่ต้องการศึกษาคงที่ตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนน้ำและวัดปริมาณไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวม แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เพื่อหาอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสและความเข้มข้นของปุ๋ยทุก 5 วัน ระหว่างการเลี้ยงตัดสาหร่ายส่วนที่ตายออกจากตู้ทดลอง เพื่อป้องกันการย่อยสลายและปล่อยสารอาหารคืนสู่ระบบ ชั่งน้ำหนักสดของสาหร่ายทุก 7 วันเพื่อหาอัตราการเจริญเติบโต ทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน 28 วัน

การคำนวณอัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโต (Average Daily Growth; ADG)

$$= (w_{t2} - w_{t1})/ t \text{ (ก./วัน)}$$

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR) (Lobban and Harrison, 1994)

$$= [\ln (w_{t2} / w_{t1})/ t] \times 100 \text{ (\%/วัน)}$$

เมื่อ w_{t1} = น้ำหนักสดที่เวลา t_1 (ก.)

w_{t2} = น้ำหนักสดที่เวลา t_2 (ก.)

t = ระยะเวลาในการเลี้ยง (วัน)

2.2.6 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของสาหร่ายขนนก

ปรับระดับความเค็มของน้ำที่ใช้พักสาหร่ายให้เท่ากับระดับความเค็มของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม ซึ่งมีความเค็มเท่ากับ 20 ส่วนในพัน โดยค่อย ๆ ปรับลดระดับความเค็ม วันละ 2 ส่วนในพัน จนกระทั่งได้ระดับความเค็มที่ต้องการ วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) ทำการทดลองในตู้กระจกขนาด 30x40x24 ซม. (กว้างxยาวxสูง) จัดการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ ใช้สาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ส่วนชุดควบคุมไม่ใส่สาหร่าย มีการให้อากาศในตู้ทดลองที่บรรจุน้ำจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาซึ่งทิ้งให้ตกตะกอนและกรองด้วยถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตา

20 มค.ม. ปริมาตร 20 ล. วิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนเริ่มทดลอง (วันที่ 0) และเมื่อผ่านไป 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 วันโดยเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ครั้งละ 100 มล.

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับ

ประสิทธิภาพการบำบัดของสาหร่าย (%)

$= [[(C_{t1} - C_{t2})$ ชุดทดลอง $- (C_{t1} - C_{t2})$ ชุดควบคุม$]/C_{t1}$ ชุดทดลอง$] \times 100$

เมื่อ C_{t1} = ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เวลา t_1 (มก./ล.)

C_{t2} = ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เวลา t_2 (มก./ล.)

t = ระยะเวลาในการทดลอง (วัน)

อัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย (มก./ก.นน.สด/วัน)

คำนวณเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.2.3

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

วิเคราะห์คุณภาพน้ำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำพารามิเตอร์ต่าง ๆ

Parameter	Methods
Total Ammonia-Nitrogen: TAN	Indophenol blue method (Strickland and Parsons, 1972)
Nitrite-Nitrogen: NO_2-N	Diazotization (Strickland and Parsons, 1972)
Nitrate-Nitrogen: NO_3-N	Cadmium reduction method (Strickland and Parsons, 1972)
Total Dissolved Nitrogen: TDN	Persulfate oxidation (Grasshoff et al., 1983)
Dissolved Organic Nitrogen: DON	TDN- (TAN+NO_2^-+NO_3^-)

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Parameter	Methods
Orthophosphate: PO_4^{3-}-P	Molybdenum blue method (Strickland and Parsons, 1972)
Salinity	Salino refractometer
Dissolved Oxygen	DO meter
pH	pH meter
Temperature	Thermometer

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

หารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหารกับอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย โดยใช้สมการ Michaelis-Menten (Lobban and Harrison, 1994) สำหรับการทดลองในข้อ 2.2.3 วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของตัวแปรโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงสองทาง (Two-way ANOVA: Univariate) สำหรับการทดลองในข้อ 2.2.4 และ 2.2.5 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงทางเดียว (One-way ANOVA) สำหรับการทดลองในข้อ 2.2.6 และทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของตัวแปรโดยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Versions 11.5 และ Microsoft office Excel 2003 (ฉัตรศิริ, 2548; กัลยา, 2551)

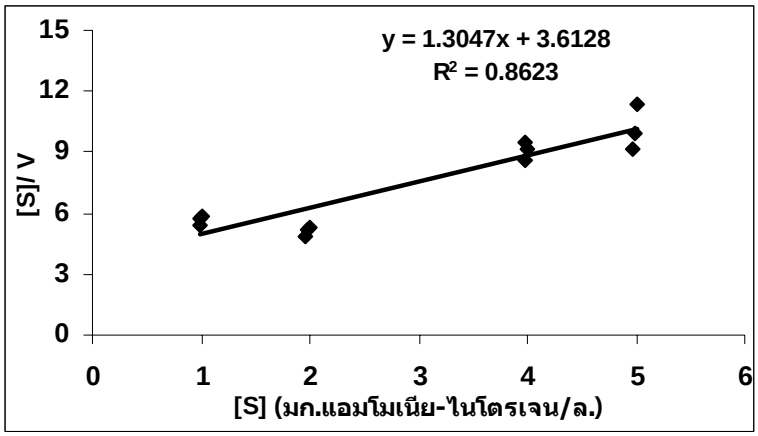
บทที่ 3
ผลการทดลอง

3.1 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

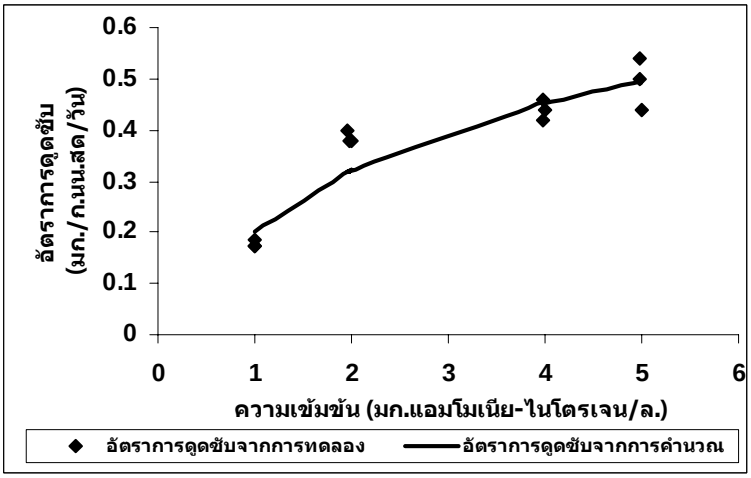
จากการศึกษาอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสหลังจากนำสาหร่าย 1.5 ก. ลงแช่ในน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพัน ปริมาตร 1.5 ล. ที่ระดับความเข้มข้นของธาตุอาหาร 1, 2, 4 และ 5 มก./ล. ใช้ความเข้มแสงจากหลอดไฟฟลูออร์เรสเซนท์ชนิด daylight ที่ระดับ 4,500 ลก. อุณหภูมิอยู่ในช่วง 27.8-28.6 °ซ. เป็นระยะเวลา 12 ชม. นำมาคำนวณอัตราการดูดซับธาตุอาหารสูงสุด (V_{max}) และค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ทำให้อัตราการดูดซับเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการดูดซับสูงสุด (K_m) โดย V_{max} เท่ากับ 1/slope และ K_m เท่ากับ จุดตัดแกน X ปรากฏผล ดังนี้

3.1.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

เมื่อนำค่าความเข้มข้นและอัตราการดูดซับแอมโมเนียในแต่ละช่วงมาพลอตกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) โดยการพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) เพื่อคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m พบว่าค่า V_{max} เท่ากับ 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. (ภาพที่ 7) จากนั้นนำค่า V_{max} และ K_m มาแทนในสมการ Michaelis-Menten โดย V เท่ากับ $(V_{max} \times [S])/(K_m + [S])$ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎี (ภาพที่ 8)



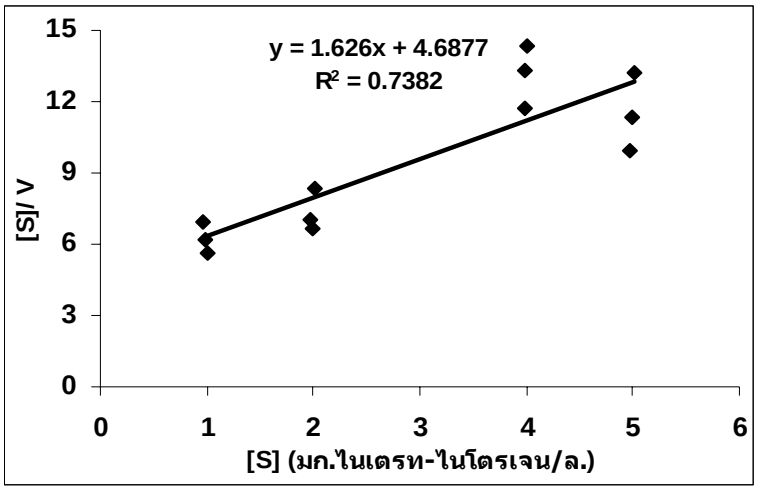
ภาพที่ 7 กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนีย ([S]) กับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ออัตราการดูดซับแอมโมเนีย ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.



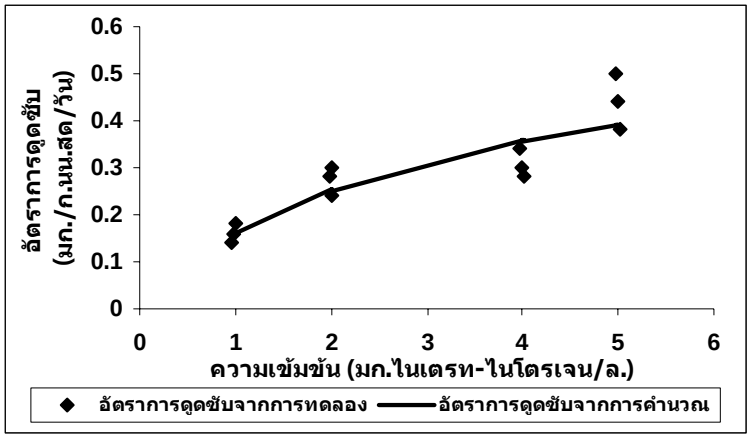
ภาพที่ 8 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.

3.1.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

เมื่อนำค่าความเข้มข้นและอัตราการดูดซับไนเตรทในแต่ละช่วงมาพลอตกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) โดยการพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) เพื่อคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m พบว่าค่า V_{max} เท่ากับ 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.8830 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. (ภาพที่ 9) จากนั้นนำค่า V_{max} และ K_m มาแทนในสมการ Michaelis-Menten โดย V เท่ากับ $(V_{max} \times [S])/(K_m + [S])$ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎี (ภาพที่ 10)



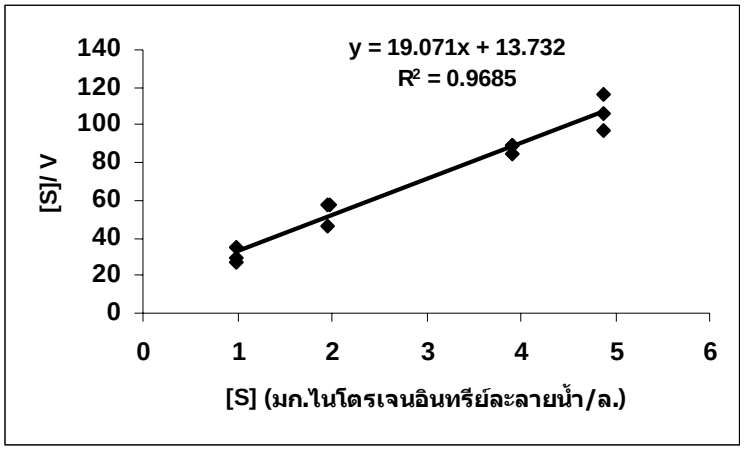
ภาพที่ 9 กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนเตรท ([S]) กับความเข้มข้นของไนเตรทต่ออัตราการดูดซับไนเตรท ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.



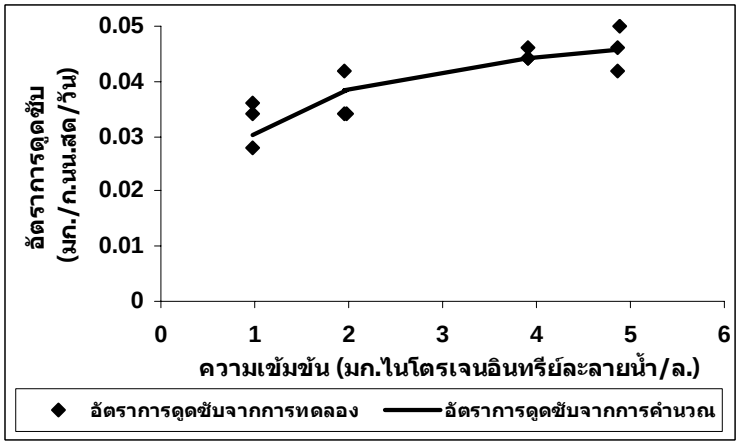
ภาพที่ 10 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.8830 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.

3.1.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

เมื่อนำค่าความเข้มข้นและอัตราการดูดซับอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำในแต่ละช่วงมาพลอตกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) โดยการพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) เพื่อคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m พบว่า ค่า V_{max} เท่ากับ 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 0.7200 มก. ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล. (ภาพที่ 11) จากนั้นนำค่า V_{max} และ K_m มาแทนในสมการ Michaelis-Menten โดย V เท่ากับ $(V_{max} \times [S])/(K_m + [S])$ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎี (ภาพที่ 12)



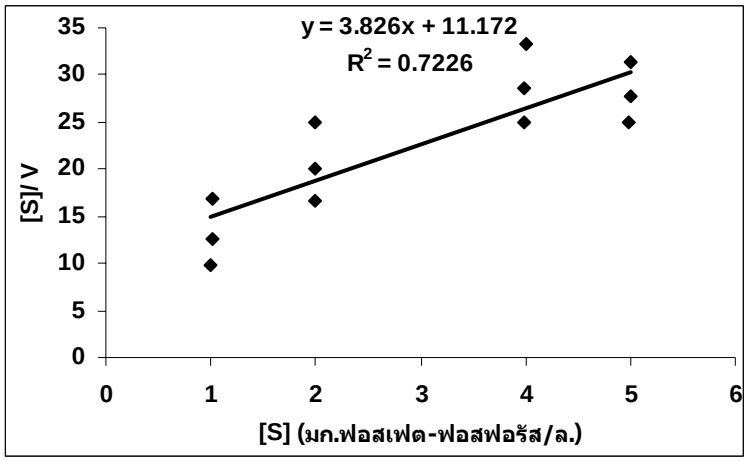
ภาพที่ 11 กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ ([S]) กับความเข้มข้นของไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำต่ออัตราการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.



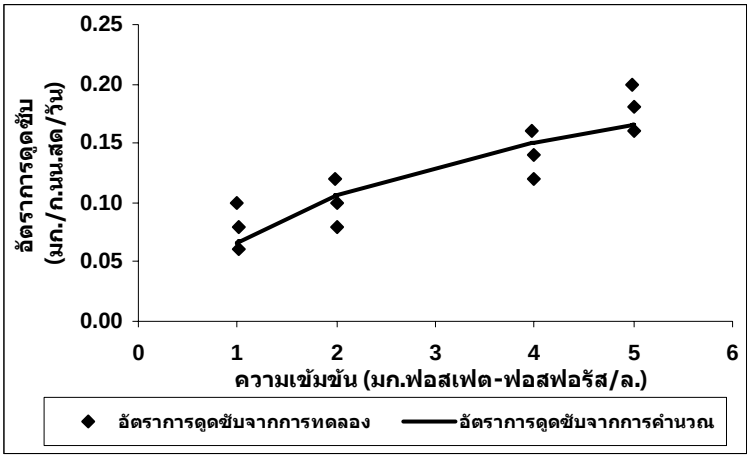
ภาพที่ 12 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 0.7200 มก.ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล.

3.1.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

เมื่อนำค่าความเข้มข้นและอัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในแต่ละช่วงมาพลอตกราฟเส้นตรงฮานส์ (Hanes-Plot) โดยการพลอตค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ([S]/V) เพื่อคำนวณหาค่า V_{max} และ K_m พบว่า ค่า V_{max} เท่ากับ 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.9200 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. (ภาพที่ 13) จากนั้นนำค่า V_{max} และ K_m มาแทนในสมการ Michaelis-Menten โดย V เท่ากับ $(V_{max} \times [S])/(K_m + [S])$ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎี (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 13 กราฟเส้นตรงฮานส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต ([S]) กับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่ออัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ([S]/V) เมื่อให้ความเข้มแสงประมาณ 4,500 ลก. เป็นเวลา 12 ชม.



ภาพที่ 14 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก มีค่า V_{max} เท่ากับ 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน และค่า K_m เท่ากับ 2.9200 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.

3.2 ชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายขนนกโดยใช้แหล่งปุ๋ยไนโตรเจน 3 ชนิด คือปุ๋ย $CO(NH_2)_2$ ปุ๋ย NH_4Cl และปุ๋ย KNO_3 โดยใช้ความเข้มข้นของ TDN เท่ากับ 4 มก./ล. และปรับอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 และชุดควบคุมใช้น้ำทะเลไม่ใส่ปุ๋ยซึ่งมีค่า TDN เท่ากับ 2.387 มก./ล. มีค่า PO_4^{3-} เท่ากับ 0.19 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. คิดเป็นอัตราส่วนของ N:P เท่ากับ 12.56:1 ใช้น้ำทะเลความเค็ม 30 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ล. ใส่สาหร่ายที่ระดับความหนาแน่น 1 ก./ล. มีการเปลี่ยนน้ำทะเลทุก 5 วัน ชั่งน้ำหนักสดของสาหร่ายทุก 7 วัน เพื่อหาอัตราการเจริญเติบโต ซึ่งมีความเข้มแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 240-16,500 ลก. อุณหภูมิ 25.2-27.3 °ซ. ความเป็นกรด-ด่าง 7.31-7.56 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 6.41-6.67 มก./ล. ทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน 28 วัน ปรากฏผลดังนี้

3.2.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) ของสาหร่ายขนนกในแต่ละสัปดาห์

พบว่าในสัปดาห์แรก สาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 2.11 %/วัน รองลงมาคือปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 และชุดควบคุมมีค่า SGR เท่ากับ 2.00 และ 1.85 %/วัน ตามลำดับโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) สัปดาห์ที่ 2 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 1.90 %/วัน รองลงมาคือปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 และปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 มีค่า SGR เท่ากับ 1.80 และ 1.60 %/วัน ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) สัปดาห์ที่ 3 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 1.95 %/วัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดทดลองที่รองลงมาคือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีค่า SGR เท่ากับ 1.76 %/วัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยยูเรียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 1.52 %/วัน และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทกับปุ๋ยยูเรียในอัตราส่วนดังกล่าว และสัปดาห์ที่ 4 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 1.59 %/วัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดทดลองที่รองลงมาคือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 1.41 %/วัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 4:1 ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 1.28 %/วัน และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทกับปุ๋ยแอมโมเนียในอัตราส่วนดังกล่าว (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 ในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

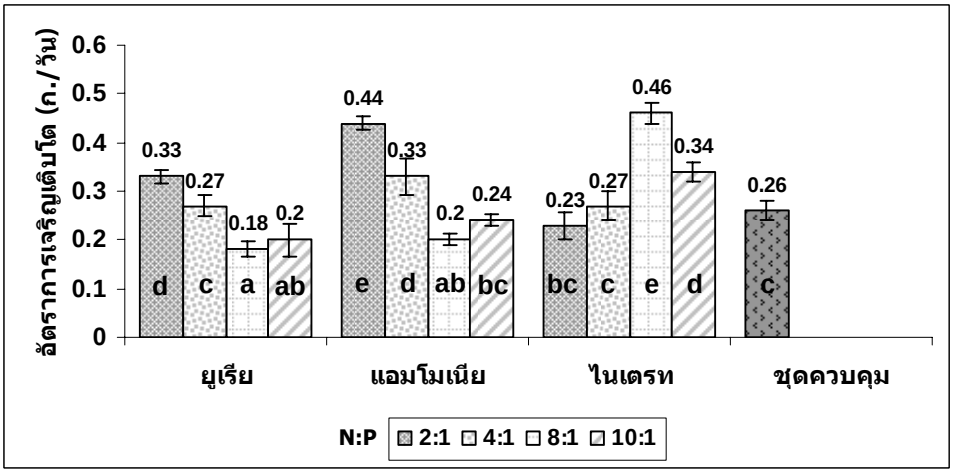
แหล่งไนโตรเจน	อัตราส่วน N:P	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (%/วัน)			
		วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21	วันที่ 28
ยูเรีย	2:1	1.16±0.14^{ab}	1.57±0.29^{def}	**1.52±0.20**^{de}	1.19±0.21^{de}
	4:1	0.99±0.31^{a}	1.17±0.11^{abc}	1.29±0.10^{cd}	1.05±0.22^{cd}
	8:1	0.83±0.14^{a}	0.88±0.19^{a}	0.82±0.16^{a}	0.62±0.05^{a}
	10:1	0.95±0.21^{a}	0.88±0.16^{a}	0.84±0.21^{a}	0.83±0.20^{abc}
แอมโมเนีย	2:1	1.77±0.06^{cd}	**1.60±0.14**^{def}	**1.95±0.27**^{f}	**1.59±0.07**^{f}
	4:1	1.17±0.29^{ab}	1.50±0.21^{cde}	1.42±0.16^{cde}	**1.28±0.14**^{de}
	8:1	0.97±0.19^{a}	0.92±0.17^{a}	0.91±0.26^{ab}	0.68±0.15^{a}
	10:1	0.95±0.32^{a}	0.93±0.15^{a}	1.27±0.21^{bcd}	0.92±0.25^{bc}
ไนเตรท	2:1	1.49±0.21^{bc}	1.19±0.10^{abc}	0.76±0.12^{a}	0.60±0.05^{a}
	4:1	1.61±0.22^{c}	1.42±0.16^{bcd}	0.92±0.26^{ab}	0.58±0.06^{a}
	8:1	**2.00±0.12**^{d}	**1.90±0.30**^{f}	**1.76±0.07**^{ef}	**1.41±0.06**^{ef}
	10:1	**2.11±0.13**^{d}	**1.80±0.19**^{ef}	1.08±0.13^{abc}	0.59±0.08^{a}
ชุดควบคุม		**1.85±0.24**^{cd}	1.12±0.12^{ab}	0.83±0.30^{a}	0.62±0.04^{a}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.2.2 อัตราการเจริญเติบโต (ADG) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) ของสาหร่ายขนนกเมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (ภาพที่ 15, ตารางภาคผนวกที่ 4) ซึ่งสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีค่า ADG สูงสุด

เท่ากับ 0.46 ก./วัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 มีค่า ADG เท่ากับ 0.44 ก./วัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 มีค่าเท่ากับ 0.34 ก./วัน และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียกับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 (ภาพที่ 15, ตารางภาคผนวกที่ 3) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างแหล่งของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ($p<0.05$) ต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 4)

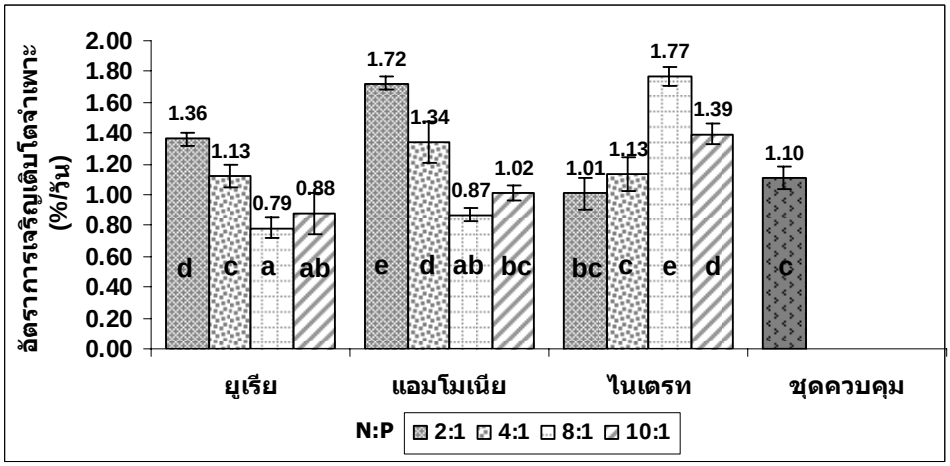


ภาพที่ 15 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (ภาพที่ 16, ตารางภาคผนวกที่ 5) ซึ่งสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 1.77 %/วัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 มีค่า SGR เท่ากับ 1.72 %/วัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1

ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 1.39 %/วัน และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียกับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 (ภาพที่ 16, ตารางภาคผนวกที่ 3) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างแหล่งของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ($p<0.05$) ต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 5)



ภาพที่ 16 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.3 ความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยไนเตรทที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่มีความหนาแน่น 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในน้ำทะเลที่ความเค็ม 30 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ล. ซึ่งมีความเข้มข้นไนโตรเจนละลายน้ำรวม เท่ากับ 3, 4 และ 5 มก./ล. และปรับค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 8:1 เปลี่ยนถ่ายน้ำและปุ๋ยทุก 5 วัน ชั่งน้ำหนักสดของสาหร่าย ทุก 7 วัน เพื่อหาอัตราการเจริญเติบโต ซึ่งมีความเข้มแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 840-19,400 ลก. อุณหภูมิ 26.1-28.5 °ซ. ความเป็น

กรด-ด่าง 7.39-7.84 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 6.47-6.73 มก./ล. ทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน 28 วัน ปรากฏผลดังนี้

3.3.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกในแต่ละสัปดาห์

พบว่าในสัปดาห์แรก สาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 6.15 %/วัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า SGR เท่ากับ 5.38 %/วัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 5.20 %/วัน สัปดาห์ที่ 2 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 4.28 %/วัน โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. และสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 2.97 และ 2.90 %/วัน ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 3 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 3 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุดเท่ากับ 4.19 %/วัน โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองอื่น ๆ และสัปดาห์ ที่ 4 พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 4.83 %/วัน โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 3 มก./ล. และสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 4.02 และ 3.92 %/วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นของปุ๋ย 3, 4 และ 5 มก./ล. ในแต่ละสัปดาห์ ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

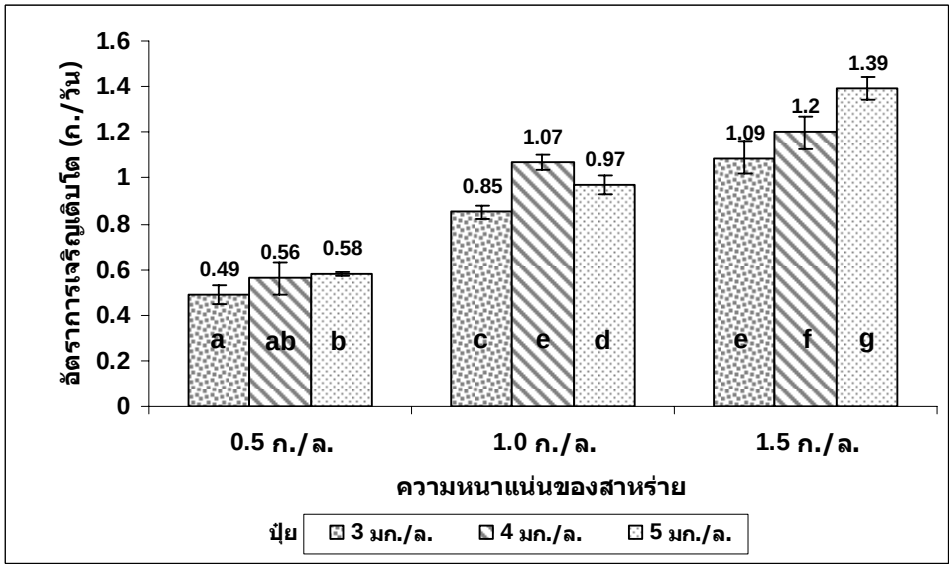
ความหนาแน่นสาหร่าย (ก./ล.)	ความเข้มข้นปุ๋ย (มก./ล.)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (%/วัน)			
		สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0.5	3	1.77±0.26^{a}	2.37±0.28^{abc}	**4.19±0.38**^{b}	**4.02±0.61**^{b}
	4	4.62±0.97^{bcd}	**4.28±0.86**^{d}	1.00±0.34^{a}	3.50±0.19^{ab}
	5	5.01±0.57^{bcd}	**2.90±0.33**^{c}	1.08±0.20^{a}	**4.83±0.39**^{c}
1.0	3	4.36±0.13^{bc}	2.16±0.07^{ab}	0.91±0.17^{a}	3.74±0.36^{b}
	4	**5.20±0.43**^{cd}	**2.97±0.19**^{c}	1.00±0.18^{a}	**3.92±0.25**^{b}
	5	**6.15±0.39**^{e}	2.30±0.19^{abc}	0.94±0.04^{a}	2.88±0.17^{a}
1.5	3	4.28±0.30^{b}	2.07±0.31^{ab}	0.73±0.16^{a}	2.94±0.25^{a}
	4	4.35±0.13^{bc}	2.44±0.09^{bc}	0.83±0.08^{a}	3.09±0.24^{a}
	5	**5.38±0.31**^{de}	1.71±0.31^{a}	1.06±0.04^{a}	3.71±0.29^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.3.2 อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกเมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นปุ๋ย (ภาพที่ 17, ตารางภาคผนวกที่ 8) โดยสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า ADG สูงสุดเท่ากับ 1.39 ก./วัน โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่นเดียวกันที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 และ 3 มก./ล. ซึ่งมีค่า ADG เท่ากับ 1.20 และ 1.09 ก./วัน ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความเข้มข้นปุ๋ย 4 และ 3 มก./ล. (ภาพที่ 17, ตารางภาคผนวก ที่ 7) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่าง

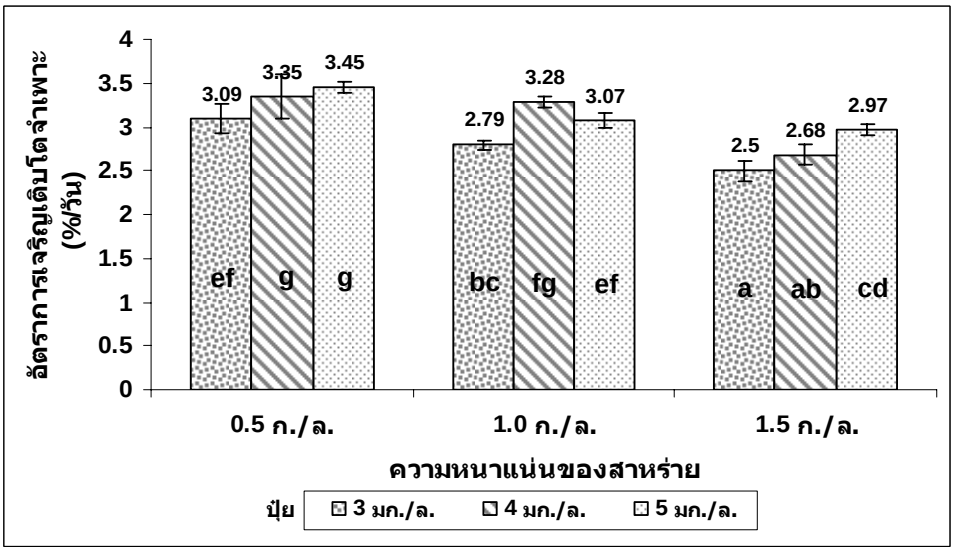
ความหนาแน่นของสาหร่ายกับความเข้มข้นของปุ๋ย ($p<0.05$) ต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 8)



ภาพที่ 17 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นปุ๋ย เท่ากับ 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นปุ๋ย (ภาพที่ 18, ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุด เท่ากับ 3.45 %/วัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่นเดียวกันที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. และสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. ซึ่งมีค่า SGR เท่ากับ 3.35 และ 3.28 %/วัน ตามลำดับ (ภาพที่ 18, ตารางภาคผนวกที่ 7) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างความหนาแน่นของสาหร่ายกับความเข้มข้นของปุ๋ย ($p<0.05$) ต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 9)



ภาพที่ 18 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นของปุ๋ย 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

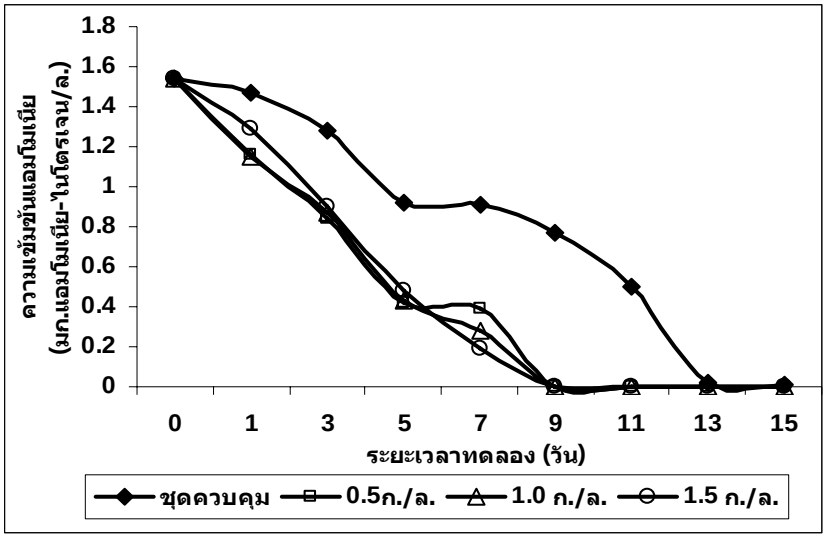
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก

จากการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ด้วยน้ำจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาซึ่งมีความเค็ม 20 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ล. ภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ ซึ่งมีความเข้มแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 690-17,400 ลก. อุณหภูมิ 26.3-28.1 °ซ. ความเป็นกรด-ด่าง 7.35-7.62 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 6.95-7.42 มก./ล. วิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนเริ่มทดลอง (วันที่ 0) และเมื่อผ่านไป 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 วัน ปรากฏผลดังนี้

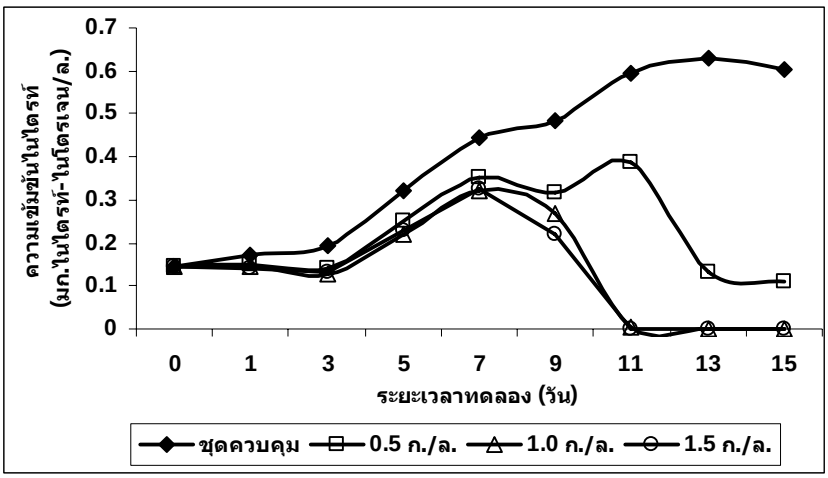
3.4.1 การเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารในน้ำ

1) ปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 1.537 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. หลังจากนั้นลดลงเรื่อย ๆ และลดลงต่ำสุดในวันที่ 9 เป็น 0.000 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 และ 1. 5 ก./ล. รองลงมาคือที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ซึ่งลดลงเป็น 0.001 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. สำหรับชุดควบคุมปริมาณแอมโมเนียรวมลดลงต่ำสุดเป็น 0.012 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 15 (ภาพที่ 19, ตารางภาคผนวกที่ 10)



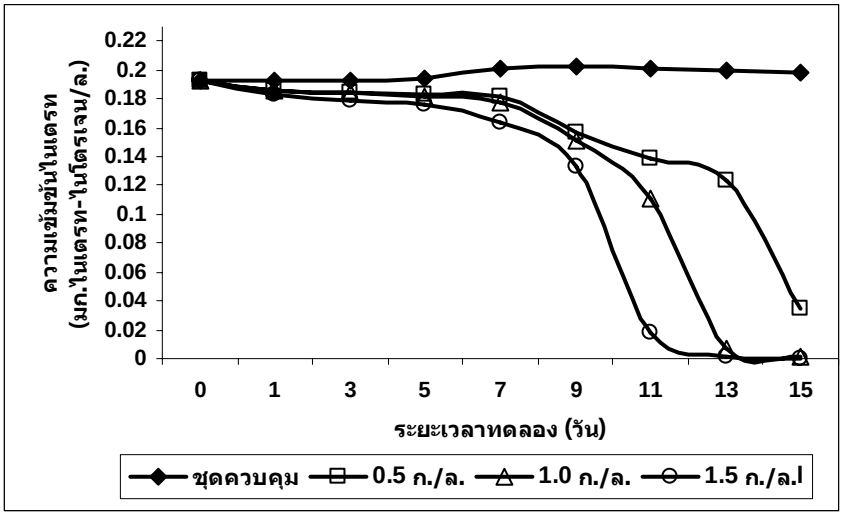
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

2) ปริมาณไนไตรท์เฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 0.147 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มลดลงอีกครั้งในวันที่ 11 และลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 เป็น 0.000 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 และ 1.0 ก./ล. รองลงมาคือที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. เริ่มลดลงในวันที่ 13 และลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 เป็น 0.108 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. สำหรับชุดควบคุมปริมาณไนไตรท์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และลดลงในวันที่ 15 แต่ยังคงมีปริมาณไนไตรท์มากกว่าวันเริ่มต้น (ภาพที่ 20, ตารางภาคผนวกที่ 11)



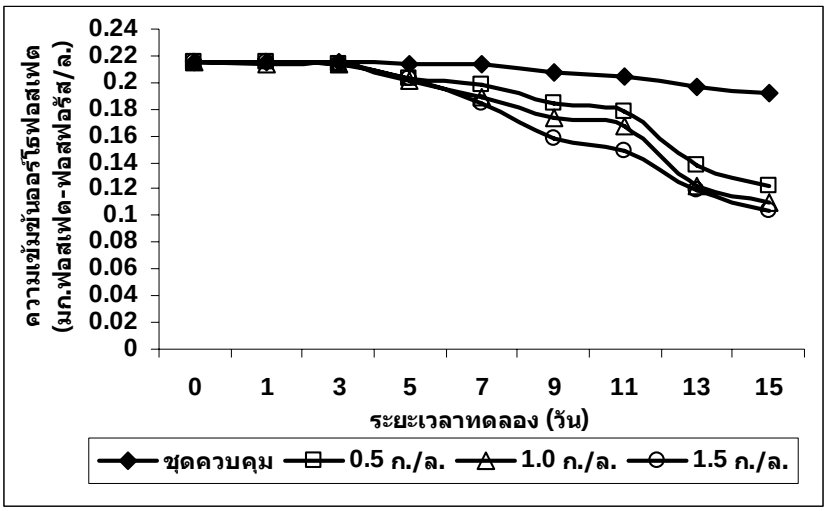
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

3) ปริมาณไนเตรทเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 0.193 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. หลังจากนั้นลดลงเรื่อย ๆ และลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 เป็น 0.000 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. รองลงมาคือที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ลดลงเป็น 0.001 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ลดลงเป็น 0.034 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับชุดควบคุมปริมาณไนเตรทลดลงต่ำสุดเป็น 0.192 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 1 และวันที่ 3 และเพิ่มขึ้นในวันที่ 5-9 จากนั้นลดลงอีกครั้งในวันที่ 11 (ภาพที่ 21, ตารางภาคผนวกที่ 12)



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

4) ปริมาณออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 0.216 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. หลังจากนั้นลดลงเรื่อย ๆ และลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 เป็น 0.104 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1. 5 ก./ล. รองลงมาคือที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ซึ่งลดลงเป็น 0.110 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ลดลงเป็น 0.120 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. ในวันที่ 13 สำหรับชุดควบคุมปริมาณออร์โธฟอสเฟตลดลงต่ำสุดเป็น 0.192 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. ในวันที่ 15 (ภาพที่ 22, ตารางภาคผนวกที่ 13)

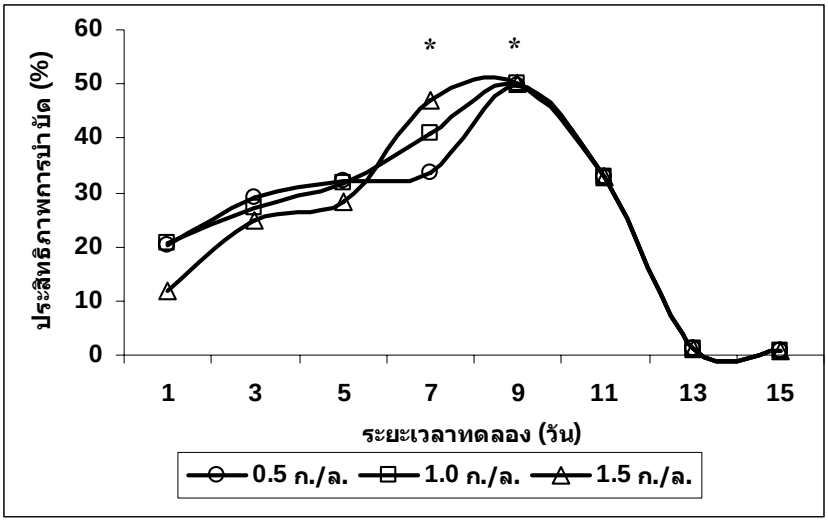


ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

3.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก

จากการทดลองพบว่าสาหร่ายสามารถบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นและช่วงเวลาที่สามารถบำบัดได้สูงสุด ดังนี้

1) แอมโมเนียรวม สามารถบำบัดได้สูงสุด 49.90 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 และ 1.5 ก./ล. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ที่สามารถบำบัดได้ 49.82 % ในวันที่ 9 และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. สามารถบำบัดได้ 46.82 % ในวันที่ 7 โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดการทดลองในวันที่ 7 และ 9 ($p>0.05$) (ภาพที่ 23, ตารางภาคผนวกที่ 14)

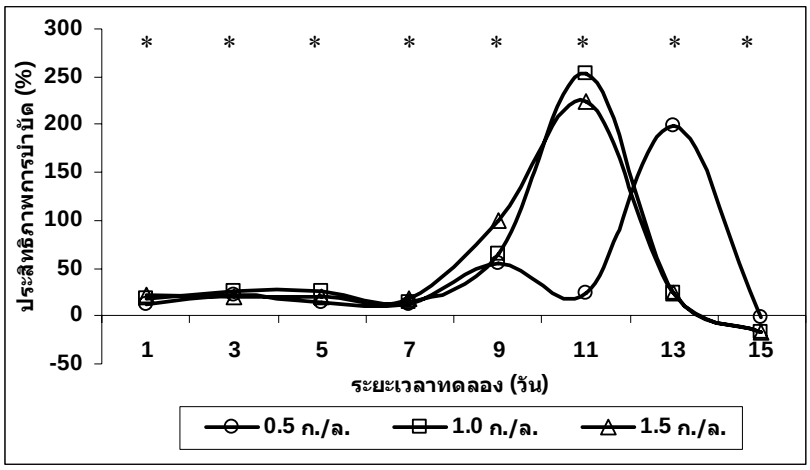


ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

2) ไนไตรท์ สามารถบำบัดได้สูงสุด 254.19 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ซึ่งสามารถบำบัดได้ 224.04 % ในวันที่ 11 และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ที่สามารถบำบัดได้ 198.64 % ในวันที่ 13 (ภาพที่ 24, ตารางภาคผนวกที่ 14)

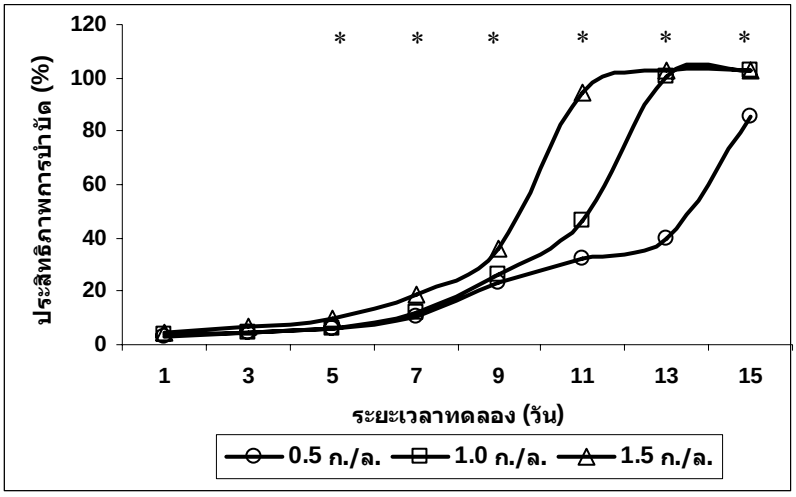


ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการบำบัดไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม แบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3) ไนเตรท สามารถบำบัดได้สูงสุด 103.11 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15 รองลงมาคือ 102.94 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 13 และ 102.59 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 15 ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดของสาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15 และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 13 และ 15 (ภาพที่ 25, ตารางภาคผนวกที่ 14)

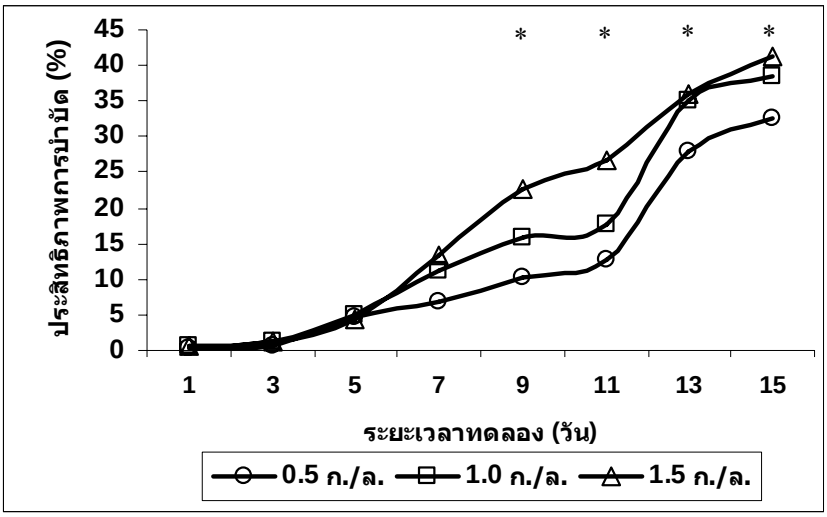


ภาพที่ 25 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม แบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4) ออร์โธฟอสเฟต สามารถบำบัดได้สูงสุด 41.36 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. รองลงมาคือ 38.58 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 15 และ 35.96 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 13 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างสาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ในวันที่ 13 และ 15 และระหว่างสาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15 (ภาพที่ 26, ตารางภาคผนวกที่ 14)



ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

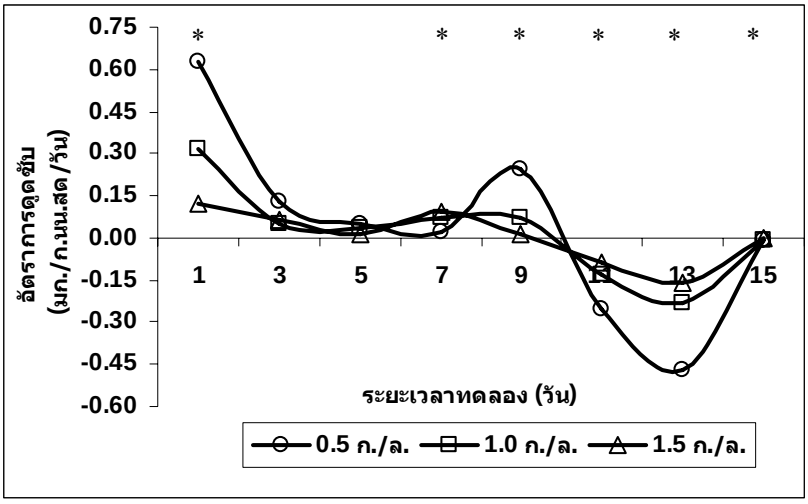
* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างตัวแปรคุณภาพน้ำกับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของสาหร่าย พบว่าตัวแปรคุณภาพน้ำที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการบำบัด คือไนไตรท์-ไนโตรเจน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 และ 1.5 ก./ล. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.666 และ 0.715 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรคุณภาพน้ำที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับประสิทธิภาพการบำบัด คือไนเตรท-ไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.997, -0.891, -0.824, -0.999, -0.988 และ -0.948 ตามลำดับ (ตารางที่ 9)

3.4.3 อัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย

จากการทดลองพบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อพิจารณาจากช่วงเวลาที่สามารถดูดซับได้สูงสุด ดังนี้

1) แอมโมเนียรวม สาหร่ายมีอัตราการดูดซับสูงสุด 0.627 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. รองลงมาคือ 0.317 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 1 และ 0.245 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 9 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ระหว่างอัตราการดูดซับของสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5 และ 1.0 ก./ล. ในวันที่ 1 แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างอัตราการดูดซับของสาหร่ายในวันที่ 1 กับวันที่ 9 ที่ความหนาแน่น 0.5 ก./ล. (ภาพที่ 27, ตารางภาคผนวกที่ 15)

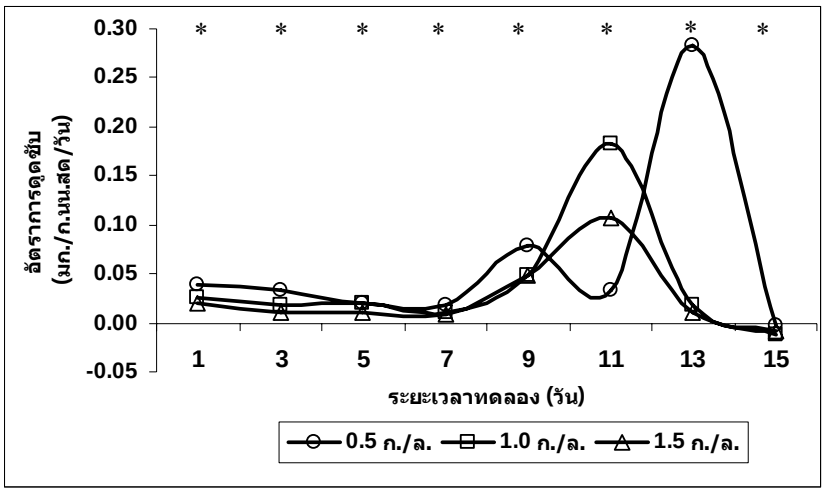


ภาพที่ 27 อัตราการดูดซับแอมโมเนียรวมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

2) ไนไตรท์ สาหร่ายมีอัตราการดูดซับสูงสุด 0.283 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 13 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. รองลงมาคือ 0.182 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. และ 0.107 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 11 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างอัตราการดูดซับที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 กับ 1.5 ก./ล. (ภาพที่ 28, ตารางภาคผนวกที่ 15)

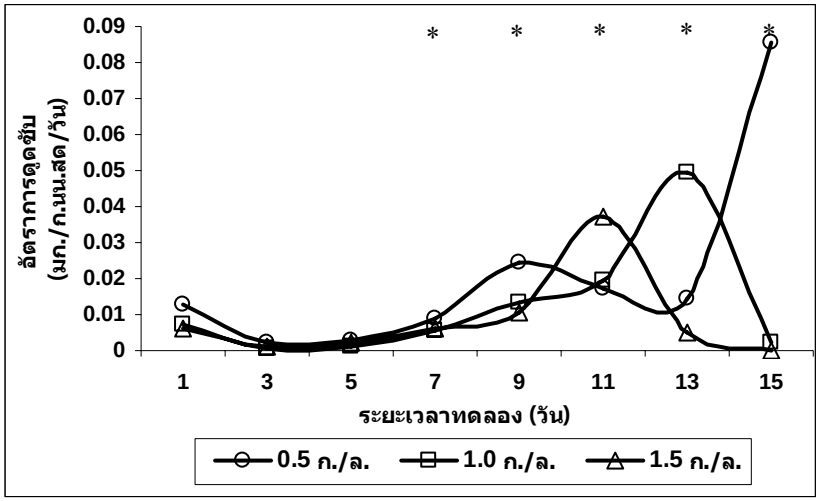


ภาพที่ 28 อัตราการดูดซับไนไตรท์เฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p <0.05$)

3) ไนเตรท สาหร่ายมีอัตราการดูดซับสูงสุด 0.086 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ในวันที่ 15 รองลงมาคือ 0.050 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 13 และ 0.037 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 11 ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ของอัตราการดูดซับระหว่างชุดทดลองในวันที่ 11, 13 และ 15 (ภาพที่ 29, ตารางภาคผนวกที่ 15)

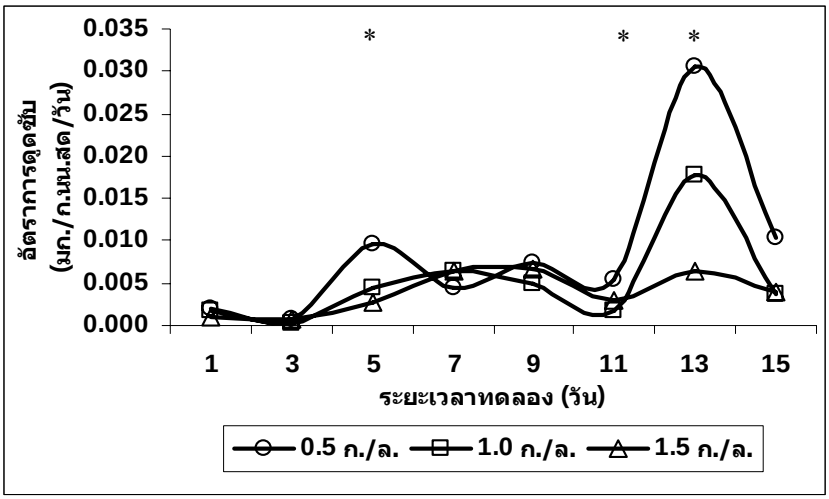


ภาพที่ 29 อัตราการดูดซับไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4) ออร์โธฟอสเฟต สาหร่ายมีอัตราการดูดซับสูงสุด 0.031 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. รองลงมาคือ 0.018 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 13 และ 0.010 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ในวันที่ 15 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างอัตราการดูดซับที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 กับ 1.0 ก./ล. ในวันที่ 13 และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระหว่างอัตราการดูดซับ ในวันที่ 13 และ 15 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. (ภาพที่ 30, ตารางภาคผนวกที่ 15)



ภาพที่ 30 อัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่เลี้ยงสาหร่ายขนนก 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน

หมายเหตุ

* ในระยะเวลาเดียวกันค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างตัวแปรคุณภาพน้ำกับอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย พบว่าตัวแปรคุณภาพน้ำที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการดูดซับธาตุอาหาร คือแอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. และไนไตรท์-ไนโตรเจน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 และ 1.5 ก./ล. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.703, 0.761, 0.736, 0.652 และ 0.695 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรคุณภาพน้ำที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการดูดซับธาตุอาหาร คือไนเตรท-ไนโตรเจน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. และออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ -0.930, -0.666, -0.492 และ -0.436 ตามลำดับ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตัวแปรคุณภาพน้ำกับประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 15 วัน

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพการบำบัด			อัตราการดูดซับ		
	0.5 ก./ล.	1.0 ก./ล.	1.5 ก./ล.	0.5 ก./ล.	1.0 ก./ล.	1.5 ก./ล.
แอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน	0.068	0.072	-0.067	0.703**	0.761**	0.736**
ไนไตรท์-ไนโตรเจน	-0.237	0.666**	0.715**	-0.261	0.652**	0.695**
ไนเตรท-ไนโตรเจน	-0.997**	-0.891**	-0.824**	-0.930**	-0.168	0.041
ออร์โธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	-0.999**	-0.988**	-0.948**	-0.666**	-0.492**	-0.436*

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

** มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$)

บทที่ 4
วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

4.1.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

เนื่องจากสาหร่ายและพืชทั่วไปสามารถนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงเพื่อนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนและโปรตีนในการสร้างเซลล์ต่อไป ดังนั้นแอมโมเนียมจึงเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่ สาหร่ายสามารถดูดซับแอมโมเนียได้มากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (ยงยุทธ, 2543; อลิสา, 2543; Lobban and Harrison, 1994; Taylor and Rees, 1999) นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายโดยทั่วไปมีอัตราการดูดซับแอมโมเนียสูงกว่าอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปแบบอื่น ๆ จากผลการทดลอง เมื่อใช้แอมโมเนียที่ระดับความเข้มข้น 1, 2, 4 และ 5 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0639 มก./ก.นน.สด/ชม. โดยคิดจากการให้แสงวันละ12 ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. (ภาพที่ 7) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารแอมโมเนียของสาหร่ายพวงองุ่น *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* ซึ่งพบว่า V_{max} เท่ากับ 0.0897 และ 0.3406 มก./ก.นน.สด/ชม. และค่า K_m เท่ากับ 18.5822 และ 50.9554 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (อลิสา, 2543) จะเห็นได้ว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับธาตุอาหารแอมโมเนียได้น้อยกว่าสาหร่ายพวงองุ่นและสาหร่ายหนาม ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองใช้ความเข้มแสงเพียง 4,500 ลก. ซึ่งน้อยกว่าการทดลองของอลิสา (2543) ที่ใช้ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลก. เนื่องจากความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย (William and Dennison, 1990; Gacia *et al*., 1996) สอดคล้องกับการทดลองของประหยัด (2547) ซึ่งรายงานว่าที่ความเข้มแสง 7,000 ลก. สาหร่ายสามารถดูดซับแอมโมเนียได้มากกว่าที่ความเข้มแสง 5,000 และ 2,500 ลก. อาจเกิดจากระดับความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่อยู่ในระดับความเข้มแสงที่อิ่มตัว (light saturation intensity) จากรายงานของ Powtongsook และคณะ (2000) กล่าวว่าสาหร่าย

Caulerpa lentillifera มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุดที่ความเข้มแสงประมาณ 20,000 ลก. นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหาร (Pedersen *et al*., 2004) และในการทดลองครั้งนี้ใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงสุดเพียง 5 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. แต่การทดลองของอลิสา (2543) ใช้ความเข้มข้นสูงสุดถึง 100 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งอัตราการดูดซับธาตุอาหารจะลดลงตามความเข้มข้นของธาตุอาหาร (Cohen and Fong, 2004; Pedersen *et al*., 2004) นอกจากนี้อัตราการดูดซับแอมโมเนียของสาหร่ายขนนกที่ได้จากการทดลองนี้มีการหักลบค่าในชุดควบคุม (ไม่ได้ใส่สาหร่าย) ด้วย โดยต่างจากการทดลองของอลิสา (2543) ที่ไม่ได้หักลบค่าชุดควบคุม และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีของ Michaelis-Menten (ภาพที่ 8) นั่นคืออัตราการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารจนถึงจุดอิ่มตัวที่อัตราการดูดซับธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายมีค่าคงที่ ซึ่งอัตราการดูดซับจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารมากกว่าจุดอิ่มตัว จากผลการทดลองนี้สามารถนำมาใช้ทำนายการลดลงของธาตุอาหารแอมโมเนียในน้ำได้ โดยสาหร่ายจะไม่สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ด้วยอัตราเร็วกว่าค่า V_{max} นั่นคือหากมีแอมโมเนียในน้ำไม่เกิน 5 มก. แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. สาหร่ายขนนกสามารถดูดซับได้สูงสุดเพียง 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน เท่านั้น และหากต้องการทราบว่าอัตราการดูดซับจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำมีค่าเท่าไร ให้แทนค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) ในสมการ Michaelis-Menten

4.1.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทแตกต่างกัน จากการศึกษาการดูดซับธาตุอาหารไนเตรทของประหยัด (2547) พบว่าสาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* มีอัตราดูดซับดีที่สุด รองลงมาคือสาหร่าย *Acanthophora spicifera* สาหร่าย *Gracilaria fisheri* และสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ตามลำดับ โดยสาหร่ายทะเลจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมก่อนที่จะเลือกใช้ไนเตรท (สรวิศ, 2543; Cohen and Fong, 2004) จากผลการทดลอง เมื่อใช้ไนเตรทที่ระดับความเข้มข้น 1, 2, 4 และ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับไนเตรทสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0513 มก./ก.นน.สด/ชม. โดยคิดจากการให้แสงวันละ12 ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.883 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. (ภาพที่ 9) มีค่ามากกว่า V_{max} ของการดูดซับธาตุอาหารไนเตรทของสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* เท่ากับ 0.0175 มก./ก.นน.สด/ชม. และค่า K_m เท่ากับ 40.1094 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และ

สาหร่าย *Acanthophora spicifera* ซึ่งมีค่า V_{max} เท่ากับ 0.0425 มก./ก.นน.สด/ชม. และค่า K_m เท่ากับ 90.0506 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. (อลิสา, 2543) แต่มีค่าน้อยกว่าสาหร่าย *Gelidium latifolium* ซึ่งมีค่า V_{max} เท่ากับ 0.0714 มก./ก.นน.สด/ชม. และ K_m เท่ากับ 0.266 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. (Silkin and Chubchikova, 2007) ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองใช้ความเข้มแสงเพียง 4,500 ลก. ซึ่งน้อยกว่าการทดลองของอลิสา (2543) ที่ใช้ความเข้มแสงประมาณ 15,000 ลก. โดยความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย (ประหยัด, 2547; William and Dennison, 1990; Corzo and Niell, 1992; Gacia *et al*., 1996; Powtongsook *et al*.,2000) รวมทั้งความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ใช้ในการทดลองน้อยกว่าความเข้มข้นของธาตุอาหารจากการทดลองของอลิสา (2543) แต่มากกว่าความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองของ Silkin และ Chubchikova (2007) ซึ่งใช้ความเข้มข้นไนเตรทสูงสุด 0.42 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายขนนกมีประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารไนเตรทมากกว่าสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* และสาหร่าย *Acanthophora spicifera* แต่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าสาหร่าย *Gelidium latifolium* สำหรับอัตราการดูดซับไนเตรทของสาหร่ายขนนกที่ได้จากการทดลองนี้มีการหักลบค่าในชุดควบคุม (ไม่ได้ใส่สาหร่าย) ด้วย ซึ่งต่างจากการทดลองของ Silkin และ Chubchikova (2007) ที่ไม่ได้หักลบค่าชุดควบคุม และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีของ Michaelis-Menten (ภาพที่ 10) จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ทำนายการลดลงของธาตุอาหารไนเตรทในน้ำได้ โดยสาหร่ายจะไม่สามารถดูดซับไนเตรทได้ด้วยอัตราเร็วกว่าค่า V_{max} นั่นคือหากมีไนเตรทในน้ำไม่เกิน 5 มก. ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สาหร่ายขนนกสามารถดูดซับได้สูงสุดเพียง 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน เท่านั้น และหากต้องการทราบว่าอัตราการดูดซับจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำมีค่าเท่าไร ให้แทนค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) ในสมการ Michaelis-Menten

4.1.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

นอกจากสาหร่ายจะใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปของสารอนินทรีย์แล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนอินทรีย์ได้ด้วย เช่น กรดอะมิโน และยูเรีย (Lobban and Harrison, 1994) สาหร่ายสามารถใช้ประโยชน์จากยูเรียด้วยกระบวนการไฮโดรไลซีสโดยมีเอนไซม์ยูเรียเอส (urease) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ยงยุทธ, 2543) แต่การศึกษาเกี่ยวกับการนำยูเรียไปใช้ประโยชน์ของสาหร่ายยังมีข้อมูลน้อยมาก (Lobban and Harrison, 1994) จากผลการทดลองเมื่อใช้ยูเรียที่ระดับความเข้มข้น 1, 2, 4 และ 5 มก.ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล. พบว่าสาหร่าย

ขนนกมีอัตราการดูดซับไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ (DON) สูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0044 มก./ก.นน.สด/ชม. โดยคิดจากการให้แสงวันละ12 ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 0.7200 มก.ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล. (ภาพที่ 11) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสาหร่ายสามารถดูดซับไนโตรเจนในรูปแบบสารอินทรีย์ได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนีย และไนเตรท สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของยูเรียอาจเกิดจากกิจกรรมอื่น ๆ ด้วย เช่น กระบวนการไฮโดรไลซีส มีการเปลี่ยนรูปยูเรียไปเป็นแอมโมเนีย และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีของ Michaelis-Menten (ภาพที่ 12) จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ทำนายการลดลงของธาตุอาหารไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำได้ โดยสาหร่ายจะไม่สามารถดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำได้ด้วยอัตราเร็วกว่าค่า V_{max} นั่นคือหากมีไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำไม่เกิน 5 มก. ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล. สาหร่ายขนนกสามารถดูดซับได้สูงสุดเพียง 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน เท่านั้น และหากต้องการทราบว่าอัตราการดูดซับจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำมีค่าเท่าไร ให้แทนค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) ในสมการ Michaelis-Menten

4.1.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

ปกติสาหร่ายต้องการธาตุอาหารฟอสฟอรัสเพื่อการเจริญเติบโตในปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารไนโตรเจน (ยงยุทธ, 2543; สรวิศ, 2543; คมน์ และคณะ, 2548; Lobban and Harrison, 1994; Cohen and Fong, 2004) ซึ่งในธรรมชาติพบฟอสฟอรัสน้อยมาก สาหร่ายแต่ละชนิดมีความต้องการไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าธาตุอาหารฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Ulva rotundata*, *Enteromorpha intestinalis*, *Gracilaria gracilis* (Martínez-Aragón *et al.,* 2002) และสาหร่าย *Codium idule* (Larned, 1998) จากผลการทดลอง เมื่อใช้ออร์โธฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1, 2, 4 และ 5 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. พบว่าสาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0218 มก./ก.นน.สด/ชม. โดยคิดจากการให้แสงวันละ12 ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.92 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. (ภาพที่ 13) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสาหร่าย *Gelidium latifolium* ที่ V_{max} เท่ากับ 0.0248 มก./ก.นน.สด/ชม. และ K_m เท่ากับ 0.054 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. (Silkin and Chubchikova, 2007) แต่อัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของสาหร่ายขนนกที่ได้จากการทดลองนี้มีการหักลบค่าในชุดควบคุม (ไม่ได้ใส่สาหร่าย) ด้วย ซึ่งต่างจากการทดลองของ Silkin และ Chubchikova (2007) ที่ไม่ได้หักลบค่าชุดควบคุม และเมื่อหาความสัมพันธ์

ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการดูดซับของธาตุอาหาร ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามทฤษฎีของ Michaelis-Menten (ภาพที่ 14) จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ทำนายการลดลงของธาตุอาหารฟอสเฟตได้ โดยสาหร่ายจะไม่สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ด้วยอัตราเร็วกว่าค่า V_{max} นั่นคือหากมีออร์โธฟอสเฟต ไม่เกิน 5 มก. ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. สาหร่ายขนนกสามารถดูดซับได้สูงสุดเพียง 0.2614 มก./ก.นน.สด/วัน เท่านั้น และหากต้องการทราบว่าอัตราการดูดซับจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำมีค่าเท่าไร ให้แทนค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร ([S]) ในสมการ Michaelis-Menten

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนกแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายขนนกสามารถดูดซับแอมโมเนียได้ดีกว่าไนเตรท ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ และออร์โธฟอสเฟต สอดคล้องกับข้อมูลซึ่งรายงานว่าแอมโมเนียมเป็นแหล่งปฐมภูมิของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของสาหร่ายเป็นส่วนใหญ่ และสามารถนำแอมโมเนียมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง (ยงยุทธ, 2543; อลิสา, 2543; Lobban and Harrison, 1994; Taylor and Rees, 1999) โดยสาหร่ายจะเลือกใช้สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมก่อนที่จะเลือกใช้ไนเตรท (สรวิศ, 2543; Cohen and Fong, 2004) ส่วนการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ต้องอาศัยปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปไนเตรทเป็นไนไตรท์ และเปลี่ยนไนไตรท์เป็นแอมโมเนียเพื่อนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนและโปรตีนในการสร้างเซลล์ต่อไป (ยงยุทธ, 2543; Lobban and Harrison, 1994) สำหรับธาตุอาหารฟอสฟอรัสจัดเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายมีความต้องการในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารไนโตรเจน (ยงยุทธ, 2543; สรวิศ, 2543; คมน์ และคณะ, 2548; Lobban and Harrison, 1994; Cohen and Fong, 2004) และจากผลการทดลองพบว่าอัตราการดูดซับมีความผันแปรมากพอสมควร ซึ่งอาจเกิดจากขนาดและอายุของสาหร่ายที่นำมาใช้ทดลองที่ไม่สม่ำเสมอกัน

4.2 ชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน : ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายขนนกในแต่ละสัปดาห์ พบว่าในสัปดาห์แรกคือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 10:1 สัปดาห์ที่ 2 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 สัปดาห์ที่ 3 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 และสัปดาห์ที่ 4 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 (ตารางที่ 7) จะเห็นได้ว่าชนิดปุ๋ยที่เหมาะสม

ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกคือปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 และปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1

และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (28 วัน) พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 มีค่า ADG และ SGR สูงสุด โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงสาหร่ายด้วยปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 (ภาพที่ 15 และ 16, ตารางภาคผนวกที่ 3) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกัน ($p<0.05$) ระหว่างชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 4, ตารางภาคผนวกที่ 5)

ชุดทดลองที่ใช้แหล่งไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียซึ่งใช้ความเข้มข้นปุ๋ย 2 มก./ล. ในรูปของไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวม พบว่ามีผลทำให้สาหร่ายขนนกเจริญเติบโตน้อยกว่าปุ๋ยชนิดอื่น อาจเกิดจากสาหร่ายจะนำยูเรียไปใช้ประโยชน์ได้โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซีส เพื่อเปลี่ยนรูปยูเรียไปเป็นแอมโมเนียก่อน แต่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและปุ๋ยทุก 5 วัน ปุ๋ยยูเรียอาจถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียเพียงบางส่วน ทำให้สาหร่ายสามารถนำปุ๋ยยูเรียไปใช้ได้น้อยมาก และสอดคล้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งพบว่าสาหร่ายมีอัตราการดูดซับสูงสุดเพียง 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน เท่านั้น ชุดทดลองที่ใช้แหล่งไนโตรเจนจากปุ๋ยแอมโมเนียซึ่งใช้ความเข้มข้นปุ๋ย 2 มก./ล. ในรูปของไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวม พบว่าสาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงขึ้นคือ 1 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. คิดเป็นอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 จะเห็นได้ว่าฟอสฟอรัสที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และชุดทดลองที่ใช้แหล่งไนโตรเจนจากปุ๋ยไนเตรทซึ่งใช้ความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. ในรูปของไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวม พบว่าสาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 0.5 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. คิดเป็นอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 สำหรับชุดควบคุมซึ่งใช้น้ำทะเลไม่ใส่ปุ๋ย พบว่าสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีเช่นกัน เนื่องจากในน้ำทะเลมีธาตุอาหารไนโตรเจนที่ละลายน้ำรวมซึ่งมีความเข้มข้น เท่ากับ 2.387 มก./ล. และออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 0.19 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. คิดเป็นอัตราส่วน N:P เท่ากับ 12.56:1 จากผลการทดลองจะเห็นว่าฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญในระบบชีวเคมีของเซลล์ ส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตดีขึ้นเมื่อเพิ่มฟอสฟอรัสในชุดทดลองที่ใช้ปุ๋ยแอมโมเนีย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนและเปลี่ยนแหล่งไนโตรเจนเป็นปุ๋ยไนเตรท สาหร่ายต้องการใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณที่น้อยลง โดยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนที่ต่างกันมีผลต่อความต้องการอัตราส่วน N:P ที่แตกต่างกัน (สันติ, 2546; คมน์และคณะ, 2548; Redfield *et al.* , 1963 อ้างโดย Lewis and Hanisak, 1996)

จากผลการทดลองในภาพรวมทั้งหมดจะเห็นได้ว่าชนิดปุ๋ยและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกคือ ปุ๋ยแอมโมเนียที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 สอดคล้องกับสาหร่าย *Gracilaria fisheri* เมื่อเลี้ยงด้วยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 2:1 (คมน์ และคณะ, 2548) และปุ๋ยไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 เช่นเดียวกับสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* เมื่อเลี้ยงด้วยปุ๋ยไนเตรทที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และมีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 (สันติ, 2546)

4.3 ความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยไนเตรทที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

ปกติสาหร่ายในสกุล *Caulerpa* สามารถแพร่กระจายได้ดีอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20-30°ซ. (Lobban and Harrison, 1994; Marine Biosecurity, 2001) นอกจากนั้นแสงและความเข้มแสงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์แสงเพื่อเกิดเป็นพลังงานและใช้ในการเจริญเติบโตของสาหร่าย ตามปกติอัตราการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีระดับความเข้มแสงสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเข้มแสงที่ระดับหนึ่งทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงมีค่าคงที่ไม่เพิ่มสูงขึ้นอีก เรียกว่าอยู่ในระดับความเข้มแสงที่อิ่มตัว (light saturation intensity) สาหร่ายที่ได้รับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตช้า ส่งผลต่อผลผลิตสาหร่ายที่ลดลง (สรวิศ, 2543) สาหร่ายแต่ละชนิดจะมีระดับความเข้มแสงซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงแตกต่างกัน (William and Dennison, 1990; Ohba *et al*., 1992; Gacia *et al*., 1996) สำหรับการทดลองในครั้งนี้มีอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 26.1-28.5°ซ. และมีความเข้มแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 840-19,400 ลก. ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่เหมาะสมของสาหร่ายในสกุลนี้ (นิสราภรณ์, 2543; ชลี และคณะ, 2548; Powtongsook *et al*., 2000)

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายขนนกในแต่ละสัปดาห์ พบว่าในสัปดาห์แรกคือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรท 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สัปดาห์ที่ 2 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สัปดาห์ที่ 3 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 3 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และสัปดาห์ที่ 4 คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. (ตารางที่ 8) จะเห็นได้ว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ยไนเตรท 5 มก.ไนเตรท-

ไนโตรเจน/ล. ให้ค่า SGR สูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 1 แต่เมื่อครบ 4 สัปดาห์ สาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. ให้ค่า SGR สูงที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับทุกชุดการทดลอง ซึ่งตลอดระยะเวลาการทดลองมีการเปลี่ยนน้ำและปุ๋ยทุก 5 วัน เนื่องจากสาหร่ายมีการเจริญเติบโตขึ้นแต่ความเข้มข้นปุ๋ยเท่าเดิมสาหร่ายที่ความหนาแน่นน้อยจึงโตดีกว่าสาหร่ายที่ความหนาแน่นมากกว่า

และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดของสาหร่ายขนนกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (28 วัน) พบว่าสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. มีค่า ADG สูงสุด โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่นเดียวกันที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 และ 3 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (ภาพที่ 17, ตารางภาคผนวกที่ 7) เนื่องจากผลผลิตสาหร่ายขึ้นกับปริมาณสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ย ดังนั้นสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูงจึงให้ผลผลิตสูงกว่าที่ความหนาแน่นน้อย

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายขนนกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (28 วัน) พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. มีค่า SGR สูงสุด โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่ความหนาแน่น 0.5 และ 1.0 ก./ล. ที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ย 4 มก./ล. (ภาพที่ 18, ตารางภาคผนวกที่ 7) และพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างความหนาแน่นของสาหร่ายกับความเข้มข้นของปุ๋ย ($p<0.05$) ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก (ตารางภาคผนวกที่ 8, ตารางภาคผนวกที่ 9)

จากผลการทดลองในภาพรวมทั้งหมดจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกเมื่อพิจารณาในแง่ผลผลิตของสาหร่ายที่ต้องการ คือสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ที่ความเข้มข้นปุ๋ย 5 มก./ล. แต่หากพิจารณาในแง่ของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ พบว่าสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5 ก./ล. ที่ความเข้มข้นปุ๋ย 4 และ 5 มก./ล. มีการเจริญเติบโตได้ดี อีกทั้งจะเห็นว่าสาหร่ายในการทดลองครั้งนี้ซึ่งใช้ปุ๋ยไนเตรทที่ความเข้มข้น 4 มก./ล. ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. มีการเจริญเติบโตดีกว่าการทดลองในข้อ 2.2.4 เนื่องจากในระหว่างการทดลองดังกล่าว มีฝนตกชุกตลอดการทดลอง และมีความเข้มแสงน้อยกว่าการทดลองในครั้งนี้ จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่ต่างกัน (William and Dennison, 1990; Ohba *et al*., 1992; Gacia *et al*., 1996)

4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนก พบว่าสาหร่ายสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด เท่ากับ 49.90 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 9 โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.5 ก./ล. ในวันที่ 7 ที่สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ 46.82 % (ภาพที่ 23, ตารางภาคผนวกที่ 14) และจะเห็นว่าแอมโมเนียในชุดควบคุมซึ่งไม่ได้ใส่สาหร่ายมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและลดลงต่ำสุดเหลือเพียง 0.012 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 15 (ภาพที่ 19, ตารางภาคผนวกที่ 10) ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลองมีแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตอยู่ตามธรรมชาติซึ่งสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียในน้ำเป็นไนไตรท์ และไนเตรทด้วยกระบวนการ nitrification สามารถบำบัดไนไตรท์ได้มากที่สุด เท่ากับ 254.19 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 11 (ภาพที่ 24, ตารางภาคผนวกที่ 14) ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดมีค่ามากกว่า 100 % เนื่องจากค่าไนไตรท์ในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้น แล้วเริ่มลดลงในวันที่ 15 แต่ยังคงมีค่ามากกว่าวันเริ่มต้น (ภาพที่ 20) เมื่อนำมาลบออกจากชุดทดลอง ประสิทธิภาพการบำบัดจึงมากกว่า 100 % สามารถบำบัดไนเตรทได้มากที่สุด เท่ากับ 103.11 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15 แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพการบำบัดในวันที่ 13 ที่สามารถบำบัดได้ 102.94 % และที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 15 สามารถบำบัดได้ 102.59 % (ภาพที่ 25, ตารางภาคผนวกที่ 14) ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดมีค่ามากกว่า 100 % เนื่องจากค่าไนเตรทในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้น เมื่อนำมาลบออกจากชุดทดลอง ประสิทธิภาพการบำบัดจึงมากกว่า 100 % นอกจากนี้สาหร่ายยังสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 41.36 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล.ในวันที่ 15 (ภาพที่ 26, ตารางภาคผนวกที่ 14) และพบว่าสาหร่ายขนนกสามารถบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่น ๆ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายชนิดอื่น ๆ

ชนิดสาหร่าย	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				แหล่งอ้างอิง
	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ไนไตรท์-ไนโตรเจน	ไนเตรท-ไนโตรเจน	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	
สาหร่ายขนนก C. *sertularioides*	49.90	254.19	103.11	41.36	ผลจากการทดลอง
C. macrophysa	-	-	97.50	-	ศิริวรรณ (2538)
C. lentillifera	25–33.86	80.77-82.61	7.17-52.23	5.81-27.42	อัจฉรียา (2544); สันติ (2546); วลีรัตน์ และพุทธ(2547); อรัญญา และคณะ (2549); มกรานนท์ (2550)
U. reticulata	-	-	-	33.0	Matos และคณะ (2006)
U. pertusa	-	-	-	26.0	Wang และคณะ (2007)
G. fisheri	33.23	92.97	-	32.18	อัจฉรียา (2544); ธวัช และสุริยะ (2548)
G. salicornia	-	-	95.25	-	ศิริวรรณ (2538)
S. polycystum	67.25	-	-	-	
A. spicifera	-	-	86.07	-	ธวัช และคณะ (2548ข)
P. palmata	41.0	-	-	-	Matos และคณะ (2006)
ประสิทธิภาพร่วมกันของ *G. fisheri*, *C. lentilliferac* และ *A. spicifera*	-	61.49	-	-	วราภรณ์ และคณะ (2547)

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการตรวจวัด

เมื่อพิจารณาอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก พบว่าสามารถดูดซับแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด เท่ากับ 0.627 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่ายขนนก 0.5 ก./ล. โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.0 ก./ล. ซึ่งสามารถดูดซับได้ 0.317 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 1 (ภาพที่ 27, ตารางภาคผนวกที่ 15) สามารถดูดซับไนไตรท์ได้มากที่สุด เท่ากับ 0.283 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ในวันที่ 13 (ภาพที่ 28, ตารางภาคผนวกที่ 15) สามารถดูดซับไนเตรทได้มากที่สุด เท่ากับ 0.086 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล. ในวันที่ 15 (ภาพที่ 29, ตารางภาคผนวกที่ 15) และสามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 0.031 มก./ก.นน.สด/วัน ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล ในวันที่ 13 (ภาพที่ 30, ตารางภาคผนวกที่ 15) และพบว่าสาหร่ายขนนกสามารถดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากกว่าสาหร่ายชนิดอื่น ๆ (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 อัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของสาหร่ายขนนกเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายชนิดอื่น ๆ

ชนิดสาหร่าย	อัตราการดูดซับ (มก./ก.นน.สด/วัน)			แหล่งอ้างอิง
	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ไนเตรท-ไนโตรเจน	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	
สาหร่ายขนนก *C. sertularioides*	0.627	0.086	0.031	ผลจากการทดลอง
C. lentillifera	0.056	-	0.001	(มกรานนท์, 2550)
C. macrophysa	0.547	-	-	(ศิริวรรณ, 2538)
S. polycystum	0.168	-	-	
G. salicornia	0.228	-	-	
A. spicifera	-	0.064	-	(ธวัช และคณะ, 2548ข)

หมายเหตุ - หมายถึงไม่ได้ทำการตรวจวัด

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายขนนกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์ได้ดีกว่าสารประกอบไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ และพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ ไนเตรท และออร์โธฟอสเฟตได้ดีไม่ด้อยไปกว่าสาหร่ายชนิดอื่น อีกทั้งสาหร่ายขนนกสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่าไนเตรท และออร์โธ

ฟอสเฟต สอดคล้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทดลองข้อ 2.2.3 ซึ่งพบว่าสาหร่ายมีค่า V_{max} ในแอมโมเนีย รองลงมาคือไนเตรท ออร์โธฟอสเฟต และไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะการดูดซับธาตุอาหารเช่นเดียวกับสาหร่าย *Enteromorpha intestinalis* (Cohen and Fong, 2004) และสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* (อลิสา, 2543) ที่พบว่าสาหร่ายจะเลือกใช้แอมโมเนียได้ดีกว่าไนเตรท ทั้งนี้เนื่องจากพืชและสาหร่ายสามารถดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง เพื่อนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนและอะไมด์ได้ทันที ส่วนการดูดซับไนเตรทต้องอาศัยปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรท์ แล้วเปลี่ยนไนไตรท์เป็นแอมโมเนีย สำหรับออร์โธฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารไนโตรเจน (ยงยุทธ, 2543; สรวิศ, 2543; คมน์ และคณะ, 2548; Lobban and Harrison, 1994; Cohen and Fong, 2004) แต่จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนกของการทดลองในหัวข้อ 2.2.3 ไม่สามารถนำมาใช้คำนวณอัตราการดูดซับธาตุอาหารในการทดลองนี้ได้ เนื่องจากอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขึ้นอยู่กับระดับความเข้มแสงและระดับความเค็มของน้ำด้วย

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (ศิริวรรณ, 2538; สันติ, 2546; ประหยัด, 2547; จามรี และพุทธ, 2548; ธวัช และสุริยะ, 2548; Neori *et al.*, 2000; Matos *et al.*, 2006; Msuya *et al*., 2006; Valente *et al*., 2006; Yang *et al*., 2006) ธาตุอาหารและความเข้มข้นของธาตุอาหาร (สมศักดิ์, 2534; ยงยุทธ, 2543; อลิสา, 2543; สันติ, 2546; คมน์ และคณะ, 2548; Cohen and Fong, 2004; Pedersen *et al*., 2004) ระดับความเค็มของน้ำ (สันติ, 2546; ชลี และคณะ, 2548; สุวรรณา และคณะ, 2550) ความหนาแน่นของสาหร่าย (ศิริวรรณ, 2538; สันติ, 2546) ความเข้มแสง (ประหยัด, 2547; William and Dennison, 1990; Corzo and Niell, 1992; Ohba *et al*., 1992; Gacia *et al*., 1996; Powtongsook *et al*., 2000) อุณหภูมิ (นิสราภรณ์, 2543; Pedersen *et al.,* 2004; Friedlander *et al.,* 2006; Burfeind and Udy, 2009) และฤดูกาล (Lewmanomont and Ogawa, 1995; Matos *et al*., 2006) อีกทั้งจากผลการทดลองยังพบว่าระยะเวลาในการบำบัดที่ต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารเช่นกัน

และจากการศึกษาพบว่าสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 1.5 ก./ล. สามารถบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากที่สุด เนื่องจากสาหร่ายสามารถบำบัดธาตุอาหารได้มากตามปริมาณของสาหร่ายที่ใช้ หากในน้ำมีธาตุอาหารมากควรเพิ่มปริมาณสาหร่ายให้มาก หากพิจารณาในแง่ของอัตราการดูดซับธาตุอาหาร พบว่าสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5 ก./ล. สามารถดูดซับได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหาร

และความหนาแน่นของสาหร่าย หากสาหร่ายมีความหนาแน่นน้อยสามารถดูดซับธาตุอาหารได้มากกว่าสาหร่ายที่ความหนาแน่นสูง ดังนั้นสาหร่ายขนนกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งได้ แต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของสาหร่ายดังที่กล่าวมาแล้วประกอบด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

5.1.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 0.7665 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0639 มก./ก.นน.สด//ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.7691 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.

5.1.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรทเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับไนเตรทสูงสุด เท่ากับ 0.6150 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0513 มก./ก.นน.สด/ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.883 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.

5.1.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ (DON) สูงสุด เท่ากับ 0.0524 มก./ก.นน.สด/วัน (0.0044 มก./ก.นน.สด/ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 0.7200 มก. ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ/ล.

5.1.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออร์โธฟอสฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกมีอัตราการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด เท่ากับ 0.2614 มก./ก.นน. สด/วัน (0.0218 มก./ก.นน.สด/ชม.) และค่า K_m เท่ากับ 2.92 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.

5.2 ชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนและอัตราส่วนของไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกที่เลี้ยงในน้ำทะเลความเค็ม 30 ส่วนในพัน โดยใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทที่มีอัตราส่วน N:P เท่ากับ 8:1 เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกมากที่สุด เพราะมีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด เท่ากับ 0.46 ก./วัน และ 1.77 %/วัน ตามลำดับ

5.3 ความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยไนเตรทที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกที่เลี้ยงในน้ำทะเลความเค็ม 30 ส่วนในพัน โดยใช้ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล.และมีความเข้มข้นปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทเท่ากับ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด เท่ากับ 1.39 ก./วัน แต่หากพิจารณาในแง่ของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ พบว่าสาหร่ายที่ความหนาแน่น 0.5 ก./ล.และมีความเข้มข้นปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรทเท่ากับ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด เท่ากับ 3.45 %/วัน

5.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาและอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก

สาหร่ายขนนกสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด เท่ากับ 49.90 % ที่ความหนาแน่น 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 9 สามารถบำบัดไนไตรท์ได้มากที่สุด เท่ากับ 254.19 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.0 ก./ล. ในวันที่ 11 สามารถบำบัดไนเตรทได้มากที่สุด เท่ากับ 103.11 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15 และสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 41.36 % ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 1.5 ก./ล. ในวันที่ 15

เมื่อพิจารณาอัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก พบว่าสามารถดูดซับแอมโมเนียรวมได้มากที่สุด เท่ากับ 0.627 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 1 สามารถดูดซับไนไตรท์ได้มากที่สุด เท่ากับ 0.283 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 13 สามารถดูดซับไนเตรทได้มากที่สุด เท่ากับ

0.086 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 15 และสามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้มากที่สุด เท่ากับ 0.031 มก./ก.นน.สด/วัน ในวันที่ 13 ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 0.5 ก./ล.

ข้อเสนอแนะ

1. สามารถนำสาหร่ายขนนกไปใช้บำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลได้ จากผลการทดลองเมื่อน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมซึ่งมีปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยเริ่มต้น เท่ากับ 1.537 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ปริมาณไนไตรท์เฉลี่ยเริ่มต้น เท่ากับ 0.147 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. ปริมาณไนเตรทเฉลี่ยเริ่มต้น เท่ากับ 0.193 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และปริมาณออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยเริ่มต้น เท่ากับ 0.216 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. พบว่าหากต้องการบำบัดธาตุอาหารให้ได้มากที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุดควรใช้สาหร่ายที่ความหนาแน่น 1.5 ก./ล. สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้สูงสุดในวันที่ 9 สามารถบำบัดไนไตรท์ได้สูงสุดในวันที่ 11 สามารถบำบัดไนเตรทและออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดในวันที่ 15 เมื่อนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดน้ำทิ้ง ในระหว่างการใช้สาหร่าย หากพบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตหนาแน่นเกินไป ควรมีการเก็บเกี่ยวสาหร่ายออกเป็นระยะ ๆ เพื่อป้องกันการตายของสาหร่ายและการปล่อยสารอาหารคืนสู่ระบบ แต่การนำไปใช้จริงต้องศึกษาปริมาณธาตุอาหารในน้ำด้วย เนื่องจากสาหร่ายมีขีดความสามารถจำกัดระดับหนึ่งในการดูดซับธาตุอาหารสูงสุด

2. เนื่องจากความเข้มแสงและความเค็มมีผลต่ออัตราการดูดซับธาตุอาหารของสาหร่าย ดังนั้นในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารของสาหร่ายขนนก ควรศึกษาที่ความเข้มแสงแตกต่างกันรวมทั้งในสภาวะแสงธรรมชาติ และที่ระดับความเค็มเท่ากับความเค็มของน้ำทิ้ง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราการดูดซับธาตุอาหารสูงสุด (V_{max}) และนำค่าที่ได้ไปประเมินการลดลงของธาตุอาหารได้สอดคล้องกับสภาพการนำสาหร่ายไปประยุกต์ใช้งาน

3. ปัจจุบันการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมมักเลี้ยงในพื้นที่ที่มีความเค็มต่ำ เพื่อให้สามารถนำสาหร่ายขนนกไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ควรศึกษาระดับความเค็มต่ำสุดที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2545. คู่มือการออกปฏิบัติงานเมื่อเกิดปรากฏการณ์ขี้ปลาวาฬ. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. 2550. มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. เข้าถึงจาก http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s12 เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2550.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2551. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. กรุงเทพฯ: ธรรมสาร.

กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์. 2522. สาหร่ายทะเลของไทยที่มีประโยชน์. รายงานสัมมนาวิชาการวิทยาศาสตร์ทางทะเล. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์. 2527. สาหร่าย. กรุงเทพฯ: คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, ธิดารัตน์ น้อยรักษา และชัชรี แก้วสุรลิขิต. 2550. สาหร่ายทะเลบริเวณเกาะครามและเกาะใกล้เคียง. กรุงเทพฯ: บริษัทเวิร์ค สแควร์ จำกัด.

คมน์ ศิลปาจารย์, คมคาย ลาวัณยวุฒิ, รัชดาภรณ์ เอี่ยมสำอาง และอุไร เจียรนัย. 2548. การทดลองหาระดับธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายผมนาง *Gracilaria fisheri* (Xia & Abbott) Abbott, Zhang & Xia โดยวิธี Non-Linear Regression Analysis. เอกสารวิชาการฉบับที่ 33/2548. ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งประจวบคีรีขันธ์ กรมประมง.

จามรี รักษ์บางแหลม และพุทธ ส่องแสงจินดา. 2548. ประสิทธิภาพของบ่อบำบัดน้ำหมุนเวียนในฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบสมดุลนิเวศ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 9/2548. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง. กรมประมง.

ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. 2548. การใช้ SPSS เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล. สงขลา: คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ. 2550. การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม เพื่อการบริโภคและการส่งออก. เข้าถึงจาก http://www.rdi.ku.ac.th/Techno_ku60/res-68/index68.html เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม 2550.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ และนิติ ชูเชิด. 2548. แนวทางการผลิตกุ้งขาวแวนนาไม. กรุงเทพฯ: คณะประมง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชลี ไพบูลย์กิจกุล, ศิริวรรณ อัศวอัจฉริยกุล และเบ็ญจมาศ ไพบูลย์กิจกุล. 2548. ผลของความเค็มและความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพการดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนของสาหร่ายช่อพริกไทย *(Caulerpa lentillifera)*. การประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 18-20 ตุลาคม 2548.

ชวนพิศ สิทธิมังค์. 2547.สถานการณ์การเลี้ยงกุ้งขาว. รายงานสรุปผลการดำเนินงานโครงการฉบับสมบูรณ์: โครงการประเมินผลกระทบการนำกุ้งขาวเข้าประเทศไทย. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

เชาว์ ศรีวิชัย, สิริ เอกมหาราช และเนตรดาว วิเศษโส. 2548. รายงานการวิจัย “การรวบรวมเอกสารการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอินทรีย์: เน้นการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลระบบอินทรีย์”. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ธวัช ศรีวีระชัย และสุริยะ แพงดี. 2548. การเลี้ยงสาหร่ายเขากวาง *Gracilaria edulis* (Gmelin) Silva และสาหร่ายมงกุฎหนาม *Acanthophora spicifera* (Vahl) Borgesen ในบ่อบำบัดน้ำทิ้ง. เอกสารวิชาการฉบับที่ 17/2548. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดตราด กรมประมง.

ธวัช ศรีวีระชัย, ชัชวาล วุฒิเมธี และจุฑารัตน์ ศิริสมบัติ. 2548ก. การเพาะเลี้ยงหอยหวาน *Babylonia areolata* Link, 1807 ในบ่อซีเมนต์ระบบปิดชีวภาพแบบก้าวหน้า. เอกสารวิชาการฉบับที่ 9/2548. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดตราด กรมประมง.

ธวัช ศรีวีระชัย, สุวรรณา วรสิงห์ และสุริยะ แพงดี. 2548ข. ประสิทธิภาพของสาหร่ายมงกุฎหนาม *Acanthophora spicifera* (Vahl) Borgesen ในการบำบัดคุณภาพน้ำทะเลและน้ำทิ้งจากโรงเพาะอนุบาลสัตว์น้ำ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 18/2548. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดตราด กรมประมง.

ธีระพงษ์ จรัญญากรณ์, สรวิศ เผ่าทองศุข และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2550. ผลของการเติมคาร์บอนไดออกไซด์และการพรางแสงแดดต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*). เข้าถึงจาก http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/I_09/I21.htm เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2550.

นิคม ละอองศิริวงศ์ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2546. วิธีวิเคราะห์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง. 211 หน้า.

นิคม ละอองศิริวงศ์, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และทองเพชร สันบูกา. 2549. การทดลองใช้สาหร่ายหนาม *Najas indica* (Willd) Chane กำจัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 27/2549. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

นิสราภรณ์ ภักดีพันธ์. 2543. การเจริญเติบโตและคุณค่าทางอาหารของสาหร่ายพวงองุ่น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประหยัด มะหมัด. 2547. การใช้สาหร่ายทะเลบำบัดคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา.

พุทธ ส่องแสงจินดา และสำรอง อินเอก. 2546. ประสิทธิภาพของหอยนางรม (*Crassostrea lugubris*) หอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) และสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง. เอกสารวิชาการฉบับที่ 6/2546. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

พุทธ ส่องแสงจินดา, กฤษณา องอาจ, วลีรัตน์ มูสิกะสังข์ และพนารัตน์ สอนสุกใส. 2550. ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตกับคุณภาพน้ำทิ้งและตะกอนดินจากการเลี้ยงกุ้งขาวแบบพัฒนา. รายงานการสัมมนาวิชาการด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ประจำปี 2550 ณ เนวาด้าแกรนด์ จังหวัดอุบลราชธานี 10-14 มิถุนายน 2550. หน้า 33-36.

เพ็ญแข คุณาวงศ์เดช. 2548. การเลี้ยงหอยเป๋าฮื้อ (*Haliotis asinina*) ด้วยการบำบัดน้ำทางชีวภาพ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 25/2548. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาประมงอ่าวคุ้งกระเบน กรมประมง.

มกรานนท์ โพธิ์ชัย. 2550. การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดด้วยการใช้สาหร่ายทะเลและตัวกรองชีวภาพในการบำบัดในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และคณิต ไชยาคำ. 2537. ผลกระทบของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 7/2537. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ: คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยุวดี พีรพรพิศาล. 2549. สาหร่ายวิทยา. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ลักขณา ละอองศิริวงศ์. 2551. การแลกเปลี่ยนไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และออกซิเจนระหว่างน้ำและตะกอนดินในรอบปี และผลกระทบต่อการเลี้ยงปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) ในกระชังบริเวณเกาะยอ ทะเลสาบสงขลาภายนอก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วราภรณ์ แก้วไทย, วัลลภ ทิมดี, อาภรณ์ เทพพานิช และอุทัย รัตนอุบล. 2547. การทดลองเลี้ยงสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*), สาหร่ายพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) และสาหร่ายมงกุฎหนาม (*Acanthophora spicifera*)ในบ่อดิน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23/2547. ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งสุราษฎร์ธานี กรมประมง.

วรารินวงษ์พานิช, อัญชนา ประเทพ และจรัสศรี อ่างตันญา. 2550. โครงการแผนที่ภูมินิทัศน์ภาคใต้: ฐานเศรษฐกิจและทุนวัฒนธรรม; สาหร่าย. เข้าถึงจาก http://www.sru.ac.th/TRF/Documents/0108.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2550.

วลีรัตน์ มูสิกะสังข์ และพุทธ ส่องแสงจินดา. 2547. ประสิทธิภาพและดุลไนโตรเจนของการบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งระบบหมุนเวียนโดยใช้สาหร่ายพวงองุ่น *(Caulerpa lentillifera)*. เอกสารวิชาการฉบับที่ 71/2547. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

วิทยา ศรีมโนภาษ. 2521. สาหร่ายทะเลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจของไทย. เอกสารเผยแพร่ฉบับที่ 3 สถาบันวิจัยประมงทะเล. กรมประมง.

ศิริวรรณ คิดประเสริฐ. 2538. การใช้สาหร่ายทะเลลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา.

สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล. 2552. การผลิตกุ้งคุณภาพ. เข้าถึงจาก http://www.thaiqualityshrimp.com/production/home.asp เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 มกราคม 2552.

สถาพร ดิเรกบุษราคม และสุนิตย์ โรจนพิทยากุล. 2540. ผลของคลอรีนต่อแบคทีเรียเรืองแสงในน้ำทะเลและน้ำทะเลที่มีตะกอนดิน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 12/2540. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

สมศักดิ์ แสนสุข. 2534. รายงานการวิจัย “การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Polycavernosa changii* ในระบบฟาร์มปิดโดยใช้ปุ๋ยยูเรีย 46%ในอัตราส่วนและความถี่ระดับต่าง ๆ เพื่อพัฒนาการเพาะเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป”. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสานมิตร.

สมหมาย เชี่ยววารีสัจจะ. 2539. เอกสารคำสอน วิชาการจัดการคุณภาพน้ำ. สงขลา: คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สรวิศ เผ่าทองศุข. 2543. สาหร่าย “ศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศไทย”. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สันติ ปริยะวาที. 2546. การใช้สาหร่ายพวงองุ่น *(Caulerpa lentillifera)* ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) แบบพัฒนา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.

สันติ ปริยะวาที, พุทธ ส่องแสงจินดา, สถาพร ดิเรกบุษราคม, ปิติวงษ์ ตันติโชดก และสมหมาย เชี่ยววารีสัจจะ. 2546. สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lentillifera* : J. Agardth). วารสารการประมง 56: 443-448.

สิริ เอกมหาราช, ก่อเกียรติ กูลแก้ว, พุทธ ส่องแสงจินดา, จุลีรัตน์ พรหมสุด, นิคม ละอองศิริวงศ์ และวลีรัตน์ มุสิกะสังข์. 2548. การศึกษาน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเพื่อประเมินผลกระทบต่อระบบนิเวศในทะเลสาบสงขลา. รายงานการประชุมวิชาการประมง ประจำปี 2548 กรมประมง. หน้า 601-617.

สุวรรณา วรสิงห์, ธวัช ศรีวีระชัย และจุฑารัตน์ ศิริสมบัติ. 2550. ผลของระดับความเค็มน้ำทะเลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* สาหร่ายพวงองุ่น *Caulerpa lentillifera* สาหร่ายไส้ไก่ *Enteromorpha clathrata*. เอกสารวิชาการฉบับที่ 25/2550. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง.

อนงค์ จีรภัทร์. 2543. รายงานการวิจัย “การใช้น้ำทิ้งจากนากุ้งเพื่อการเลี้ยงสาหร่ายวุ้นและการสกัดวุ้นในประเทศไทย”. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรกัญญา เม่งหยู. 2551. ปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ในสาหร่ายเขากวาง (*Caulerpa racemosa* var. *corynephora*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเล เปรียบเทียบกับที่เพาะเลี้ยงด้วยปุ๋ยเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อรัญญา อัศวอารีย์, นิคม ละอองศิริวงศ์ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2549. ประสิทธิภาพและความสามารถของระบบบำบัดน้ำทางชีวภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำจากการเลี้ยงปลากะพงขาว. เอกสารวิชาการฉบับที่ 32/2549. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.

อลิสา โชควิวัฒนวนิช. 2543. ประสิทธิภาพของสาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* และสาหร่ายหนาม *Acanthophora spicifera* ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉรียา แก้วมีศรี. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) โดยใช้สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล.

อัญชนา ประเทพ. 2547. รายงานการวิจัย “การศึกษาความหลากหลายและสังคมสาหร่ายทะเล บริเวณเกาะลิบง จ.ตรัง”. สงขลา: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

APHA, AWWA and WPCF (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation). 1980. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. New York : American Public Health Publishers.

Burfeind, D. D. and Udy, J. W. 2009. The effects of light and nutrients on *Caulerpa taxifolia* and growth. Aquatic Botany 90: 105–109.

Cohen, R. A. and Fong, P. 2004. Nitrogen uptake and assimilation in *Enteromorpha intestinalis* (L) Link (Chlorophyta): Using 15N to determine preference during simultaneous pulses of nitrate and ammonium. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 309: 67-77.

Corzo, A. and Niell, F. X. 1992. Inorganic nitrogen metabolism in *Ulva rigida* illuminated with blue light. Marine Biology 112: 223-228.

Cribb, A. B. 1996. Seaweeds of Queensland A Naturalist’s Guide. Brisbane: The Queensland Naturalist’s Club Inc.

Friedlander, M., Kosov, Y., Keret, G. and Dawes, C. 2006. Production of rhizoids by *Caulerpa prolifera* in culture. Aquatic Botany 85: 263-266.

Gacia, E., Littler, M. M. and Littler, D. S. 1996. The relationships between morphology and photosynthetic parameters within the polymorphic genus *Caulerpa*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 204: 209-224.

Gordillo, F. J. L., Niell, F. X. and Figueroa, F. L. 2001. Non-photosynthetic enhancement of growth by high CO_2 level in the nitrophilic seaweed *Ulva rigida* C. Agardh (Chlorophyta). Planta 213: 64-70.

Grasshoff, K., Ehrhardt, M. and Kremling, K. 1983. Method of Seawater Analysis. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH.

Hodgson, L. M., Tri, P. H., Lewmanomont, K. and McDermid, K. J. 2004. Annotated Checklist of Species of *Caulerpa* and *Caulerpella* (Bryopsidales, Caulerpaceae) from Vietnam, Thailand and the Hawaiian Island. In Taxonomy of Economic Seaweeds (eds., Abbott, I. A. and McDermid, K. J.), pp. 21-38. Hawaii Sea Grant College Programme.

Hoek, C. V. D., Mann, D. G. and Janns, H. M. 1995. Chlorophyta (Green algae). In Algae An Introduction to Phycology. New York: Cambridge University Press. pp. 300-435.

Horstmann, U. 1983. Cultivation of the green alga, *Caulerpa racemosa*, in tropical waters and some aspects of its physiological ecology. Aquaculture 32: 361-371.

Ivesa, L., Jaklin, A. and Devescovi, M. 2006. Vegetation patterns and spontaneous regression of *Caulerpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh in Malinska (Northern Adriatic, Croatia). Aquatic Botany 85: 324-330.

Lamouroux, J. V. 2008. *Caulerpa sertularioides*. Available from http://www.surialink.com/HANDBOOK/Genera/greens/Caulerpa/Caulerpa.htm Accessed on 5 January 2008.

Larned, S. T. 1998. Nitrogen-versus phosphorus-limited growth and source of nutrients for coral reef macroalgae. Marine Biology 132: 409-421.

Lewis, R. J. and Hanisak, M. D. 1996. Effects of phosphate supply on productivity, agar content and physical properties of agar of *Gracilaria* strain G-16S. Journal of Applied Phycology 8: 41-49.

Lewmanomont, K. and Ogawa, H. 1995. Common Seaweeds and Seagrasses of Thailand. Bangkok : Faculty of Fisheries. Kasetsart University.

Lewmanomont, K., Wongrat, L. and Supanwanid, C. 1995. Algae in Thailand. Bangkok : Office of Environment Policy and Planning.

Littler, D. S. and Littler, M. M. 2000. Caribbean Reef Plant. Washington: Offshore Graphics, Inc.

Lobban, C. S. and Harrison, P. J. 1994. Seaweed Ecology and Physiology. Cambridge: Cambridge University Press.

Marine Biosecurity. 2001. Caulerpa (*Caulerpa taxifolia*). Available from http://www.biodiversity.govt.nz/pdfs/seas/c_taxifolia_action_plan.pdf Accessed on 5 September 2008.

Marinho-Soriano, E., Nunes, S. O., Carneiro, M. A. A. and Pereira, D.C. 2009. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae*. Biomass and Bioenergy 33: 327-331.

Martínez-Aragón, J. F., Hernández, I., Pérez-Lloréns, J. L., Vázquez, R. and Vergara, J. J. 2002. Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 1. Phosphate. Journal of Applied Phycology 14: 365–374.

Matos, J., Costa, S., Rodrigues, A., Pereira, R. and Pinto, I.S. 2006. Experimental integrated aquaculture of fish and red seaweeds in Northern Portugal. Aquaculture 252: 31-42.

Msuya, F.E., Kyewalyanga, M.S. and Salum, D. 2006. The performance of the seaweed *Ulva reticulata* as a biofilter in a low-tech, low-cost, gravity generated water flow regime in Zanzibar, Tanzania. Aquaculture 254: 284-292.

Neori, A., Shpigel, M. and Ben-Eza, D. 2000. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. Aquaculture 186: 279-291.

Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M. and Yarish, C. 2004. Integrated aquaculture: Rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. Aquaculture 231: 361-391.

Ohba, H., Nashima, H. and Enomoto, S. 1992. Culture studies on *Caulerpa* (Caulerpales, Chlorophycea) III. Reproduction, development and morphological variation of laboratory-cultured *C. racemosa* var. *peltata*. Botanical Magazine Tokyo 105: 589-600.

Pedersen, A., Kraemer, G. and Yarish, C. 2004. The effects of temperature and nutrient concentrations on nitrate and phosphate uptake in different species of *Porphyra* from Long Island Sound (USA). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 312: 235-252.

Powtongsook, S., Chokwiwattanawanit, A. and Menasveta, P. 2000. Optimal photosynthetic activities of two macroalgae used in recirculating seawater systems in Thailand. (ed., Menasveta, P.), pp. 162-169. Bangkok: Marine Biotechnology Research Unit, Chulalongkorn University.

Schuenhoff, A., Shpigel, M., Lupatsch, I., Ashkenazi, A., Msuya, F.E. and Neori, A. 2003. A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. Aquaculture 221: 167-181.

Silkin, V. A. and Chubchikova, I. N. 2007. Kinetics of uptake of phosphates and nitrates by marine multicellular algae *Gelidium latifolium* (Grev.) Born. et Thur. Biology Bulletin 34: 156–162.

Soriano, E.C., Morales, C. and Moreira, W. S. C. 2002. Cultivation of *Gracilaria* (Rhodophyta) in shrimp pond effluents in Brazil. Aquaculture Research 33: 1081-1086.

Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. (2nd ed), Ottawa : Fisheries Research Board of Canada Bulletin. 167 p.

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 Applied Phycology 35: 740-746.

Trono, G. C. 1988. Pond culture of *Caulerpa*. In Manual on Seaweed Culture. pp.1 -12. Manila: FAO of the United Nations.

Trono, G. C. 1997. Field Guide and Atlas of the Seaweed Resources of the Philippines. Makati: Bookmark, Inc.

Trono, G. C. and Ganzon-Fortes, E. T. 1980. An Illustrated Seaweed Flora of Calatagan, Batangas, Philippines. Manila: Filipinas Foundation, Inc.

Valente, L.M.P., Gouveia, A., Rema, P., Matos, J., Gomes, E.F. and Pinto, I.S. 2006. Evaluation of three seaweeds *Gracilaria bursa-pastoris*, *Ulva rigida* and *Gracilaria cornea* as dietary ingredients in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Aquaculture 252: 85-91.

Wang, H., Liu, C. F., Qin, C. X., Cao, S. Q. and Ding, J. 2007. Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Aquacultural Engineering 36: 217-224.

Wilkes, R. 2005. *Caulerpa*. Available from http://www.algaebase.org/search/genus/detail/?genus_id=32944&session=abv4:CA0C4A4E163e31BAA0mGN249CE37. Accessed on 5 September 2007.

William, S. L. and Dennison, W. C. 1990. Light availability and diurnal growth of a green macroalga (*Caulerpa cupressoides*) and seagrass (*Halophila decipient*). Marine Biology 106: 437-443.

Yang, Y.F., Fei, F.G., Song, J.M., Hu, H.Y, Wang, G.C. and Chung, I.K. 2006. Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal water. Aquaculture 254: 248-255.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ 1 ปริมาณแอมโมเนียรวม, ไนเตรท, ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ และออร์โธฟอสเฟต ที่ตรวจวัดได้ในน้ำที่ใช้ความ เข้มข้นปุ๋ย 1, 2, 4 และ 5 มก./ล. ในชั่วโมงที่ 0 และ 12

ชม.ที่		แอมโมเนียรวม		ไนเตรท		ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ		ออร์โธฟอสเฟต	
		0	12	0	12	0	12	0	12
ความเข้มข้น 1 มก./ล.	ชุดควบคุม	1.000	0.980	1.010	1.000	0.986	0.957	1.000	1.000
	ซ้ำที่ 1	1.000	0.894	0.970	0.890	0.984	0.937	1.010	0.970
	ซ้ำที่ 2	0.999	0.887	1.010	0.910	0.986	0.940	1.010	0.980
	ซ้ำที่ 3	0.998	0.891	0.990	0.900	0.983	0.940	0.990	0.940
ค่าเฉลี่ยชุดทดลอง		0.999	0.891	0.990	0.900	0.984	0.939	1.003	0.963
SD ชุดทดลอง		0.001	0.004	0.020	0.010	0.002	0.002	0.012	0.021
ความเข้มข้น 2 มก./ล.	ชุดควบคุม	1.980	1.970	1.990	1.990	1.966	1.939	1.990	1.990
	ซ้ำที่ 1	2.010	1.810	2.010	1.890	1.967	1.923	2.000	1.950
	ซ้ำที่ 2	1.980	1.780	1.980	1.840	1.965	1.921	1.990	1.930
	ซ้ำที่ 3	1.960	1.750	2.000	1.850	1.964	1.916	2.000	1.960
ค่าเฉลี่ยชุดทดลอง		1.983	1.780	1.997	1.860	1.965	1.920	1.997	1.947
SD ชุดทดลอง		0.025	0.030	0.015	0.026	0.002	0.004	0.006	0.015

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ชม.ที่		แอมโมเนียรวม		ไนเตรท		ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ		ออร์โธฟอสเฟต	
		0	**12**	**0**	**12**	**0**	**12**	**0**	**12**
ความเข้มข้น 4 มก./ล.	ชุดควบคุม	3.990	3.970	3.990	3.970	3.920	3.649	3.980	3.970
	ซ้ำที่ 1	4.010	3.770	4.010	3.850	3.918	3.625	3.980	3.890
	ซ้ำที่ 2	3.970	3.720	3.990	3.820	3.916	3.623	3.990	3.910
	ซ้ำที่ 3	3.980	3.750	3.980	3.790	3.920	3.626	4.000	3.930
ค่าเฉลี่ยชุดทดลอง		3.987	3.747	3.993	3.820	3.918	3.625	3.990	3.910
SD ชุดทดลอง		0.021	0.025	0.015	0.030	0.002	0.002	0.010	0.020
ความเข้มข้น 5 มก./ล.	ชุดควบคุม	4.990	4.870	4.990	4.980	4.890	4.639	5.010	4.990
	ซ้ำที่ 1	5.010	4.670	5.000	4.770	4.870	4.596	5.010	4.910
	ซ้ำที่ 2	4.980	4.610	4.980	4.720	4.868	4.596	4.990	4.870
	ซ้ำที่ 3	4.970	4.580	5.010	4.810	4.880	4.604	5.000	4.890
ค่าเฉลี่ยชุดทดลอง		4.987	4.620	4.997	4.767	4.873	4.599	5.000	4.890
SD ชุดทดลอง		0.021	0.046	0.015	0.045	0.006	0.005	0.010	0.020

ตารางภาคผนวกที่ 2 น้ำหนักสดของสาหร่ายขนนก (ก.) ที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 2:1, 4:1, 8:1, 10:1 และชุดควบคุมที่เลี้ยงด้วยน้ำทะเลไม่ใส่ปุ๋ยในวันที่ 7, 14, 21 และ 28

วันที่	ซ้ำที่	แหล่งไนโตรเจนจากยูเรีย				แหล่งไนโตรเจนจากแอมโมเนีย				แหล่งไนโตรเจนจากไนเตรท				ชุดควบคุม
		2 :1	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	
เริ่มต้น (0)	1	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.00	20.01	20.02	20.01	20.01	20.02	20.01	20.01
	2	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.00	20.01	20.02	20.02	20.01	20.02	20.02
	3	20.02	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.02	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01
	$\bar{x}$	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01
	SD	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	1	21.79	21.34	21.45	21.17	22.56	21.73	21.44	21.03	22.14	22.30	22.90	23.12	23.06
	2	21.85	21.03	21.15	21.27	22.74	21.28	21.11	21.23	21.95	22.79	22.94	23.03	22.96
	3	21.47	21.95	21.02	21.74	22.64	22.14	21.69	21.94	22.57	22.12	23.24	23.43	22.34
	$\bar{x}$	21.70	21.44	21.21	21.39	22.65	21.72	21.41	21.40	22.22	22.40	23.03	23.19	22.79
	SD	0.20	0.47	0.22	0.30	0.09	0.43	0.29	0.48	0.32	0.35	0.19	0.21	0.39

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)

วันที่	ซ้ำที่	แหล่งไนโตรเจนจากยูเรีย				แหล่งไนโตรเจนจากแอมโมเนีย				แหล่งไนโตรเจนจากไนเตรท				ชุดควบคุม
		2 :1	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	
14	1	24.36	23.00	23.17	22.24	25.03	23.96	22.94	22.24	24.08	24.53	25.99	25.88	24.70
	2	23.87	23.01	22.38	22.85	25.35	23.39	22.23	22.59	23.69	25.49	26.83	26.10	24.94
	3	24.44	23.82	22.13	23.17	25.59	25.01	23.36	23.68	24.70	24.24	26.09	26.94	24.28
	$\bar{x}$	24.22	23.28	22.56	22.75	25.32	24.12	22.84	22.84	24.16	24.75	26.30	26.31	24.64
	SD	0.31	0.47	0.54	0.47	0.28	0.82	0.57	0.75	0.51	0.65	0.46	0.56	0.33
21	1	27.32	25.37	24.44	23.36	29.28	26.80	24.05	24.35	25.15	26.62	29.37	27.90	25.58
	2	26.14	25.04	23.49	24.08	28.94	25.64	24.17	25.03	25.05	27.20	30.24	28.43	26.62
	3	27.41	26.03	23.72	24.99	28.86	27.48	24.79	25.47	26.22	25.38	29.67	28.81	26.17
	$\bar{x}$	26.96	25.48	23.88	24.14	29.03	26.64	24.34	24.95	25.47	26.40	29.76	28.38	26.12
	SD	0.71	0.50	0.50	0.82	0.22	0.93	0.40	0.56	0.65	0.93	0.44	0.46	0.52

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)

วันที่	ซ้ำที่	แหล่งไนโตรเจนจากยูเรีย				แหล่งไนโตรเจนจากแอมโมเนีย				แหล่งไนโตรเจนจากไนเตรท				ชุดควบคุม
		2 :1	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	**2 :1**	**4 :1**	**8 :1**	**10 :1**	
28	1	29.41	27.80	25.45	24.55	32.81	28.99	25.53	26.48	26.18	27.68	32.25	29.12	26.66
	2	28.88	26.78	24.62	25.93	32.44	28.18	25.19	26.33	26.06	28.23	33.40	29.44	27.74
	3	29.56	27.70	24.75	26.28	32.07	30.26	25.86	26.99	27.45	26.55	32.87	30.18	27.42
	$\bar{x}$	29.28	27.43	24.94	25.59	32.44	29.14	25.53	26.60	26.56	27.49	32.84	29.58	27.27
	SD	0.36	0.56	0.45	0.91	0.37	1.05	0.34	0.35	0.77	0.86	0.58	0.54	0.55

ตารางภาคผนวกที่ 3 อัตราการเจริญเติบโต (ADG) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) ของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนจากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

	ชุด	แหล่งไนโตรเจนจากยูเรีย				แหล่งไนโตรเจนจากแอมโมเนีย				แหล่งไนโตรเจนจากไนเตรท			
	ควบคุม	2 : 1	4 : 1	8 : 1	10 : 1	2 : 1	4 : 1	8 : 1	10 : 1	2 : 1	4 : 1	8 : 1	10 : 1
น้ำหนักเริ่มต้น (ก.)	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01
	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01
น้ำหนักสุดท้าย (ก.)	27.27	29.28	27.43	24.94	25.59	32.44	29.14	25.53	26.60	26.56	27.49	32.84	29.58
	±0.55	±0.36	±0.56	±0.45	±0.91	±0.37	±1.05	±0.34	±0.35	±0.77	±0.86	±0.58	±0.54
น้ำหนักที่เพิ่ม (ก.)	7.26	9.27	7.42	4.93	5.58	12.43	9.13	5.52	6.59	6.55	7.47	12.83	9.57
	±0.55	±0.35	±0.56	±0.44	±0.92	±0.37	±1.05	±0.33	±0.35	±0.77	±0.85	±0.58	±0.55
% น้ำหนักที่เพิ่ม	36.28	46.33	37.08	24.64	27.89	**62.12**	45.63	27.59	32.93	32.73	37.33	**64.12**	**47.83**
ADG (ก./วัน)	0.26 ^{c}	0.33 ^{d}	0.27 ^{c}	0.18 ^{a}	0.20 ^{ab}	**0.44** ^{e}	0.33 ^{d}	0.20 ^{ab}	0.24 ^{bc}	0.23 ^{bc}	0.27 ^{c}	**0.46** ^{e}	**0.34** ^{d}
	±0.02	±0.01	±0.02	±0.02	±0.03	**±0.01**	±0.04	±0.01	±0.01	±0.03	±0.03	**±0.02**	**±0.02**
SGR (%/วัน)	1.10 ^{c}	1.36 ^{d}	1.13 ^{c}	0.79 ^{a}	0.88 ^{ab}	**1.72** ^{e}	1.34 ^{d}	0.87 ^{ab}	1.02 ^{bc}	1.01 ^{bc}	1.13 ^{c}	**1.77** ^{e}	**1.39** ^{d}
	±0.07	±0.04	±0.07	±0.06	±0.13	**±0.04**	±0.13	±0.05	±0.05	±0.10	±0.11	**±0.06**	**±0.07**

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงสองทางของค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจน (Source) จากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วน (Ratio) ไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.288(a)	11	.026	48.757	.000
Intercept	3.028	1	3.028	5647.337	.000
SOURCE	.044	2	.022	41.145	.000
RATIO	.031	3	.010	19.136	.000
SOURCE * RATIO	.213	6	.035	66.105	.000
Error	.013	24	.001		
Total	3.328	36			
Corrected Total	.300	35			

a R Square = .957 (Adjusted R Square = .938)

ตารางภาคผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงสองทางของค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนก ที่เลี้ยงด้วยแหล่งปุ๋ยไนโตรเจน (Source) จากยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และมีอัตราส่วน (Ratio) ไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 2:1, 4:1, 8:1 และ 10:1 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3.433(a)	11	.312	44.632	.000
Intercept	51.888	1	51.888	7421.408	.000
SOURCE	.526	2	.263	37.636	.000
RATIO	.370	3	.123	17.631	.000
SOURCE * RATIO	2.537	6	.423	60.465	.000
Error	.168	24	.007		
Total	55.488	36			
Corrected Total	3.600	35			

a R Square = .953 (Adjusted R Square = .932)

ตารางภาคผนวกที่ 6 น้ำหนักสดของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ที่ใช้ความเข้มข้นปุ๋ยโปแตสเซียมไนเตรท 3, 4 และ 5 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. และมีอัตราส่วนไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 8:1 ในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28

วันที่	ซ้ำที่	ความเข้มข้นปุ๋ย (มก./ล.)	ความหนาแน่นของสาหร่าย								
			0.5 ก./ล.			1.0 ก./ล.			1.5 ก./ล.		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
เริ่มต้น (0)	1		10.02	10.01	10.00	20.01	20.00	20.01	30.01	30.01	30.02
	2		10.00	10.00	10.02	20.01	20.02	20.00	30.01	30.01	30.01
	3		10.01	10.02	10.01	20.02	20.01	20.02	30.02	30.02	30.01
	$\bar{x}$		10.01	10.01	10.01	20.01	20.01	20.01	30.01	30.01	30.01
	SD		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	1		11.29	13.09	14.77	27.35	28.28	30.3	40.91	40.69	44.83
	2		11.55	13.54	14.26	26.88	28.34	31.74	41.05	41.07	43.44
	3		11.15	14.93	13.65	27.23	29.82	30.33	39.52	40.34	42.99
	$\bar{x}$		11.33	13.85	14.23	27.15	28.81	30.79	40.49	40.70	43.75
	SD		0.20	0.96	0.56	0.24	0.87	0.82	0.85	0.37	0.96

ตารางภาคผนวกที่ 6 (ต่อ)

วันที่	ซ้ำที่	ความเข้มข้นปุ๋ย (มก./ล.)	ความหนาแน่นของสาหร่าย								
			0.5 ก./ล.			1.0 ก./ล.			1.5 ก./ล.		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
14	1		13.03	18.93	18.49	31.71	35.25	35.91	46.12	47.92	49.59
	2		13.8	17.76	17.04	31.17	34.99	36.72	48.04	48.78	48.71
	3		13.3	19.35	16.76	31.85	36.19	35.82	46.24	48.12	49.64
	$\bar{x}$		13.38	18.68	17.43	31.58	35.48	36.15	46.80	48.27	49.31
	SD		0.39	0.82	0.93	0.36	0.63	0.50	1.08	0.45	0.52
21	1		16.99	20.04	19.62	33.93	37.83	38.24	48.21	50.85	53.5
	2		18.96	18.78	18.53	33.54	38	39.34	51.23	51.96	52.56
	3		17.88	21.34	18.22	33.5	38.31	38.26	48.36	50.7	53.31
	$\bar{x}$		17.94	20.05	18.79	33.66	38.05	38.61	49.27	51.17	53.12
	SD		0.99	1.28	0.74	0.24	0.24	0.63	1.70	0.69	0.50

ตารางภาคผนวกที่ 6 (ต่อ)

วันที่	ซ้ำที่	ความเข้มข้นปุ๋ย (มก./ล.)	ความหนาแน่นของสาหร่าย								
			0.5 ก./ล.			1.0 ก./ล.			1.5 ก./ล.		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
28	1		22.54	25.27	26.76	42.84	49.3	46.19	58.47	62.6	70.37
	2		24.06	23.96	25.99	44.3	51.05	48.23	62.47	65.74	68.81
	3		24.72	27.65	26.25	44.08	49.89	47.34	60.57	62.23	67.53
	$\bar{x}$		23.77	25.63	26.33	43.74	50.08	47.25	60.50	63.52	68.90
	SD		1.12	1.87	0.39	0.79	0.89	1.02	2.00	1.93	1.42

ตารางภาคผนวกที่ 7 อัตราการเจริญเติบโต (ADG) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) ของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นของปุ๋ย 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

ความเข้มข้นปุ๋ย (มก./ล.)	สาหร่าย 0.5 ก./ล.			สาหร่าย 1.0 ก./ล.			สาหร่าย 1.5 ก./ล.		
	3	**4**	**5**	**3**	**4**	**5**	**3**	**4**	**5**
น้ำหนักเริ่มต้น (ก.)	10.01	10.01	10.01	20.01	20.01	20.01	30.01	30.01	30.01
	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01
น้ำหนักสุดท้าย (ก.)	23.77	25.63	26.33	43.74	50.08	47.25	60.50	63.52	68.90
	±1.12	±1.87	±0.39	±0.79	±0.89	±1.02	±2.00	±1.93	±1.42
น้ำหนักที่เพิ่ม (ก.)	13.76	15.62	16.32	23.73	30.07	27.24	30.49	33.51	38.89
	±1.12	±1.86	±0.40	±0.79	±0.88	±1.03	±2.00	±1.93	±1.42
% น้ำหนักที่เพิ่ม	137.46	**156.04**	**163.04**	118.59	**150.27**	136.13	101.60	111.66	129.59
ADG (ก./วัน)	0.49 ^{a}	0.56 ^{ab}	0.58 ^{b}	0.85 ^{c}	1.07 ^{e}	0.97 ^{d}	**1.09** ^{e}	**1.20** ^{f}	**1.39** ^{g}
	±0.04	±0.07	±0.01	±0.03	±0.03	±0.04	**±0.07**	**±0.07**	**±0.05**
SGR (%/วัน)	3.09 ^{ef}	**3.35** ^{g}	**3.45** ^{g}	2.79 ^{bc}	**3.28** ^{fg}	3.07 ^{ef}	2.50 ^{a}	2.68 ^{ab}	3.04 ^{cd}
	±0.17	**±0.26**	**±0.06**	±0.06	**±0.06**	±0.08	±0.12	±0.11	±2.96

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงสองทางของค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น (Density) 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นปุ๋ย (Conc) เท่ากับ 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2.351(a)	8	.294	122.052	.000
Intercept	22.505	1	22.505	9348.038	.000
DENSITY	2.121	2	1.061	440.591	.000
CONC	.147	2	.073	30.500	.000
DENSITY * CONC	.082	4	.021	8.558	.000
Error	.043	18	.002		
Total	24.899	27			
Corrected Total	2.394	26			

a R Square = .982 (Adjusted R Square = .974)

ตารางภาคผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแจกแจงสองทางของค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่ายขนนกที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น (Density) 0.5, 1.0, 1.5 ก./ล. และมีความเข้มข้นปุ๋ย (Conc) เท่ากับ 3, 4 และ 5 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 28 วัน

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2.428(a)	8	.303	18.996	.000
Intercept	246.190	1	246.190	15411.873	.000
DENSITY	1.540	2	.770	48.189	.000
CONC	.695	2	.347	21.742	.000
DENSITY * CONC	.193	4	.048	3.026	.045
Error	.288	18	.016		
Total	248.905	27			
Corrected Total	2.715	26			

a R Square = .894 (Adjusted R Square = .847)

ตารางภาคผนวกที่ 10 ปริมาณแอมโมเนียรวม (มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.) ที่ตรวจวัดได้ในน้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
ชุดควบคุม	ซ้ำที่ 1	1.560	1.510	1.340	0.937	0.914	0.787	0.512	0.021	0.010
	ซ้ำที่ 2	1.540	1.470	1.290	0.957	0.949	0.736	0.506	0.011	0.010
	ซ้ำที่ 3	1.510	1.430	1.220	0.855	0.854	0.778	0.498	0.031	0.015
	$\bar{x}$	1.537	1.470	1.283	0.916	0.906	0.767	0.505	0.021	0.012
	SD	0.025	0.040	0.060	0.054	0.048	0.027	0.007	0.010	0.003
สาหร่าย 0.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	1.560	1.240	0.790	0.400	0.360	0.001	0.001	0.001	0.001
	ซ้ำที่ 2	1.540	1.160	0.890	0.490	0.470	0.002	0.000	0.000	0.002
	ซ้ำที่ 3	1.510	1.070	0.830	0.370	0.340	0.001	0.001	0.002	0.002
	$\bar{x}$	1.537	1.157	0.837	0.420	0.390	0.001	0.001	0.001	0.002
	SD	0.025	0.085	0.050	0.062	0.070	0.001	0.001	0.001	0.001

ตารางภาคผนวกที่ 10 (ต่อ)

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
สาหร่าย 1.0 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	1.560	1.090	0.810	0.392	0.254	0.000	0.002	0.002	0.002
	ซ้ำที่ 2	1.540	1.100	0.850	0.519	0.301	0.000	0.001	0.001	0.004
	ซ้ำที่ 3	1.510	1.270	0.940	0.371	0.281	0.000	0.000	0.002	0.003
	$\bar{x}$	1.537	1.153	0.867	0.427	0.279	0.000	0.001	0.002	0.003
	SD	0.025	0.101	0.067	0.080	0.024	0.000	0.001	0.001	0.001
สาหร่าย 1.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	1.560	1.240	0.880	0.465	0.143	0.000	0.003	0.002	0.003
	ซ้ำที่ 2	1.540	1.290	0.810	0.461	0.233	0.000	0.001	0.003	0.004
	ซ้ำที่ 3	1.510	1.340	1.010	0.522	0.183	0.000	0.000	0.001	0.002
	$\bar{x}$	1.537	1.290	0.900	0.483	0.186	0.000	0.001	0.002	0.003
	SD	0.025	0.050	0.101	0.034	0.045	0.000	0.002	0.001	0.001

ตารางภาคผนวกที่ 11 ปริมาณไนไตรท์ (มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล.) ที่ตรวจวัดได้ในน้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
ชุดควบคุม	ซ้ำที่ 1	0.150	0.169	0.193	0.319	0.452	0.491	0.596	0.627	0.603
	ซ้ำที่ 2	0.130	0.173	0.198	0.326	0.448	0.486	0.603	0.639	0.611
	ซ้ำที่ 3	0.160	0.170	0.185	0.322	0.437	0.482	0.587	0.626	0.601
	$\bar{x}$	0.147	0.171	0.192	0.322	0.446	0.486	0.595	0.631	0.605
	SD	0.015	0.002	0.007	0.004	0.008	0.005	0.008	0.007	0.005
สาหร่าย 0.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.150	0.151	0.141	0.249	0.353	0.315	0.389	0.128	0.105
	ซ้ำที่ 2	0.130	0.149	0.135	0.247	0.349	0.311	0.384	0.131	0.108
	ซ้ำที่ 3	0.160	0.155	0.143	0.253	0.36	0.319	0.394	0.137	0.112
	$\bar{x}$	0.147	0.152	0.140	0.250	0.354	0.315	0.389	0.132	0.108
	SD	0.015	0.003	0.004	0.003	0.006	0.004	0.005	0.005	0.004

ตารางภาคผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
สาหร่าย 1.0 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.150	0.147	0.127	0.216	0.319	0.263	0.001	0.001	0.000
	ซ้ำที่ 2	0.130	0.142	0.128	0.219	0.321	0.267	0.002	0.002	0.000
	ซ้ำที่ 3	0.160	0.145	0.131	0.223	0.327	0.271	0.004	0.001	0.000
	$\bar{x}$	0.147	0.145	0.129	0.219	0.322	0.267	0.002	0.001	0.000
	SD	0.015	0.003	0.002	0.004	0.004	0.004	0.002	0.001	0.000
สาหร่าย 1.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.150	0.138	0.131	0.233	0.331	0.225	0.003	0.001	0.000
	ซ้ำที่ 2	0.130	0.140	0.133	0.231	0.327	0.221	0.001	0.001	0.000
	ซ้ำที่ 3	0.160	0.142	0.129	0.227	0.322	0.219	0.000	0.001	0.000
	$\bar{x}$	0.147	0.140	0.131	0.230	0.327	0.222	0.001	0.001	0.000
	SD	0.015	0.002	0.002	0.003	0.005	0.003	0.002	0.000	0.000

ตารางภาคผนวกที่ 12 ปริมาณไนเตรท (มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.) ที่ตรวจวัดได้ในน้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
ชุดควบคุม	ซ้ำที่ 1	0.195	0.195	0.196	0.197	0.202	0.203	0.202	0.201	0.200
	ซ้ำที่ 2	0.191	0.19	0.189	0.193	0.199	0.201	0.199	0.199	0.198
	ซ้ำที่ 3	0.192	0.191	0.19	0.191	0.201	0.202	0.201	0.198	0.197
	$\bar{x}$	0.193	0.192	0.192	0.194	0.201	0.202	0.201	0.199	0.198
	SD	0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002
สาหร่าย 0.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.195	0.189	0.186	0.185	0.185	0.161	0.142	0.127	0.041
	ซ้ำที่ 2	0.191	0.185	0.183	0.181	0.179	0.157	0.139	0.123	0.032
	ซ้ำที่ 3	0.192	0.183	0.182	0.182	0.178	0.154	0.136	0.121	0.029
	$\bar{x}$	0.193	0.186	0.184	0.183	0.181	0.157	0.139	0.124	0.034
	SD	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003	0.003	0.006

ตารางภาคผนวกที่ 12 (ต่อ)

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
สาหร่าย 1.0 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.195	0.189	0.187	0.186	0.181	0.161	0.119	0.008	0.001
	ซ้ำที่ 2	0.191	0.182	0.179	0.178	0.175	0.147	0.108	0.005	0.001
	ซ้ำที่ 3	0.192	0.184	0.185	0.182	0.176	0.144	0.105	0.007	0.001
	$\bar{x}$	0.193	0.185	0.184	0.182	0.177	0.151	0.111	0.007	0.001
	SD	0.002	0.004	0.004	0.004	0.003	0.009	0.007	0.002	0.000
สาหร่าย 1.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.195	0.179	0.174	0.173	0.161	0.129	0.015	0.001	0.000
	ซ้ำที่ 2	0.191	0.182	0.179	0.175	0.164	0.131	0.018	0.002	0.000
	ซ้ำที่ 3	0.192	0.187	0.185	0.179	0.168	0.138	0.021	0.001	0.000
	$\bar{x}$	0.193	0.183	0.179	0.176	0.164	0.133	0.018	0.001	0.000
	SD	0.002	0.004	0.006	0.003	0.004	0.005	0.003	0.001	0.000

ตารางภาคผนวกที่ 13 ปริมาณออร์โธฟอสเฟต (มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส /ล.) ที่ตรวจวัดได้ในน้ำที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายด้วยความหนาแน่น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. ในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
ชุดควบคุม	ซ้ำที่ 1	0.214	0.214	0.214	0.214	0.215	0.208	0.204	0.198	0.192
	ซ้ำที่ 2	0.216	0.217	0.215	0.213	0.213	0.209	0.208	0.195	0.192
	ซ้ำที่ 3	0.217	0.216	0.217	0.212	0.211	0.204	0.203	0.199	0.193
	$\bar{x}$	0.216	0.216	0.215	0.213	0.213	0.207	0.205	0.197	0.192
	SD	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.001
สาหร่าย 0.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.214	0.215	0.214	0.2	0.197	0.185	0.179	0.145	0.123
	ซ้ำที่ 2	0.216	0.216	0.215	0.204	0.195	0.187	0.178	0.132	0.121
	ซ้ำที่ 3	0.217	0.214	0.214	0.204	0.203	0.183	0.176	0.137	0.123
	$\bar{x}$	0.216	0.215	0.214	0.203	0.198	0.185	0.178	0.138	0.122
	SD	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.002	0.007	0.001

ตารางภาคผนวกที่ 13 (ต่อ)

ชุดทดลอง	วันที่	0	1	3	5	7	9	11	13	15
สาหร่าย 1.0 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.214	0.214	0.213	0.207	0.188	0.177	0.171	0.127	0.110
	ซ้ำที่ 2	0.216	0.215	0.214	0.204	0.185	0.175	0.169	0.113	0.108
	ซ้ำที่ 3	0.217	0.214	0.212	0.196	0.194	0.166	0.161	0.126	0.111
	$\bar{x}$	0.216	0.214	0.213	0.202	0.189	0.173	0.167	0.122	0.110
	SD	0.002	0.001	0.001	0.006	0.005	0.006	0.005	0.008	0.002
สาหร่าย 1.5 ก./ล.	ซ้ำที่ 1	0.214	0.215	0.214	0.204	0.173	0.149	0.139	0.119	0.099
	ซ้ำที่ 2	0.216	0.215	0.213	0.201	0.193	0.163	0.153	0.121	0.107
	ซ้ำที่ 3	0.217	0.214	0.212	0.205	0.187	0.162	0.151	0.121	0.105
	$\bar{x}$	0.216	0.215	0.213	0.203	0.184	0.158	0.148	0.120	0.104
	SD	0.002	0.001	0.001	0.002	0.010	0.008	0.008	0.001	0.004

ตารางภาคผนวกที่ 14 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ ไนเตรท และออร์โธฟอสเฟต เมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มต้นของสาหร่ายขนนก ที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ความหนาแน่นของสาหร่าย (ก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)							
		วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 5	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	0.5	ก 20.38±5.53^{b}	ก 29.04±3.28^{c}	ก 32.27±4.06^{c}	ก 33.57±4.55^{c}	ก **49.82±0.04**^{d}	ก 32.81±0.04^{c}	ก 1.30±0.07^{a}	ก 0.67±0.04^{a}
	1.0	ก 20.60±6.58^{b}	ก 27.09±4.33^{c}	ก 31.79±5.21^{c}	ข 40.81±1.54^{d}	ข **49.90±0.00**^{e}	ก 32.79±0.07^{c}	ก 1.26±0.03^{a}	ก 0.59±0.07^{a}
	1.5	ก 11.71±3.25^{b}	ก 24.92±6.60^{c}	ก 28.19±2.22^{cd}	ข 46.82±2.93^{e}	ข **49.90±0.00**^{e}	ก 32.77±0.10^{d}	ก 1.24±0.07^{a}	ก 0.59±0.07^{a}
ไนไตรท์-ไนโตรเจน	0.5	ก 13.15±2.08^{b}	กข 22.45±1.36^{c}	ก 13.61±1.37^{b}	ก 12.70±1.72^{b}	ก 54.42±1.18^{d}	ก 23.81±0.68^{c}	ข **198.64±2.72**^{e}	ข -1.59±0.79^{a}
	1.0	ข 17.92±1.71^{c}	ข 25.17±2.36^{d}	ค 26.76±1.04^{d}	ก 13.61±0.68^{b}	ข 65.54±0.79^{e}	ข **254.19±1.71**^{f}	ก 24.49±1.18^{d}	ก -16.78±0.39^{a}
	1.5	ข 21.09±1.36^{c}	ก 20.41±2.36^{bc}	ข 20.86±1.57^{c}	ข 18.14±1.04^{b}	ค 99.32±1.18^{e}	ค **224.04±1.04**^{f}	ก 24.04±1.04^{d}	ก -17.01±0.00^{a}
ไนเตรท - ไนโตรเจน	0.5	ก 3.28±1.58^{a}	ก 4.32±1.08^{a}	ก 5.87±1.08^{a}	ก 10.54±1.96^{b}	ก 23.14±1.82^{c}	ก 32.12±1.56^{d}	ก 39.55±1.58^{e}	ก 85.49±3.23^{f}
	1.0	ก 3.63±1.87^{a}	ก 4.32±2.16^{a}	ก 6.22±2.07^{a}	ก 12.26±1.67^{b}	ก 26.60±4.70^{c}	ข 46.81±3.82^{d}	ข 100.17±0.79^{e}	ข **102.59±0.00**^{e}
	1.5	ก 4.84±2.10^{a}	ก 6.57±2.85^{ab}	ข 9.50±1.58^{b}	ข 19.00±1.82^{c}	ข 35.92±2.45^{d}	ค 94.82±1.56^{e}	ค **102.94±0.30**^{f}	ข **103.11±0.00**^{f}

ตารางภาคผนวกที่ 14 (ต่อ)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ความหนาแน่นของสาหร่าย (ก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)							
		วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 5	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15
ออร์โธ	0.5	ก 0.46±0.47^{a}	ก 0.77±0.27^{a}	ก 4.79±1.07^{b}	ก 6.79±1.93^{b}	ก 10.19±0.93^{c}	ก 12.66±0.71^{d}	ก 27.78±3.04^{e}	ก 32.72±0.53^{f}
ฟอสเฟต -	1.0	ก 0.77±0.27^{a}	ก 1.39±0.46^{ab}	ก 4.94±2.63^{b}	ก 11.11±2.12^{c}	ข 15.89±2.71^{d}	ก 17.59±2.45^{d}	ข 35.18±3.62^{e}	ข **38.58±0.71**^{e}
ฟอสฟอรัส	1.5	ก 0.62±0.27^{a}	ก 1.39±0.46^{a}	ก 4.48±0.97^{a}	ก 13.27±4.75^{b}	ค 22.68±3.62^{c}	ข 26.54±3.51^{c}	ข **35.96±0.53**^{d}	ค **41.36±1.93**^{e}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่กำกับด้วยอักษรภาษาไทยต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรภาษาอังกฤษต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ 15 อัตราการดูดซับแอมโมเนียรวม ไนไตรท์ ไนเตรท และออร์โธฟอสเฟตของสาหร่ายขนนกที่ความหนาแน่น 0.5, 1.0 และ 1.5 ก./ล. เป็นเวลา 15 วัน ($\bar{x}$ ±SD, n=3)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ความหนาแน่นของสาหร่าย (ก./ล.)	อัตราการดูดซับ (มก./ก.นน.สด/วัน)							
		วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 5	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	0.5	ข**0.627±0.170**^{f}	ก0.133±0.113^{cd}	ก0.049±0.037^{c}	ก0.019±0.010^{c}	ข**0.245±0.068**^{e}	ก-0.255±0.001^{b}	ก-0.469±0.001^{a}	ก-0.010±0.001^{c}
	1.0	ข**0.317±0.101**^{d}	ก0.049±0.020^{c}	ก0.036±0.060^{c}	ข0.068±0.032^{c}	ก0.068±0.012^{c}	ข-0.128±0.001^{b}	ข-0.235±0.001^{a}	ข-0.005±0.001^{c}
	1.5	ก0.120±0.033^{e}	ก0.067±0.026^{d}	ก0.017±0.023^{c}	ข0.094±0.020^{de}	ก0.015±0.015^{c}	ค-0.085±0.001^{b}	ค-0.157±0.001^{a}	ค-0.003±0.000^{c}
ไนไตรท์-ไนโตรเจน	0.5	ข0.039±0.006^{d}	ค0.033±0.002^{c}	ข0.020±0.002^{b}	ข0.019±0.003^{b}	ข0.078±0.002^{e}	ก0.034±0.001^{cd}	ค**0.283±0.004**^{f}	ค-0.002±0.001^{a}
	1.0	ก0.026±0.003^{d}	ข0.018±0.002^{c}	ข0.019±0.001^{c}	ก0.010±0.001^{b}	ก0.048±0.001^{e}	ค**0.182±0.001**^{f}	ข0.017±0.001^{c}	ก-0.012±0.000^{a}
	1.5	ก0.021±0.002^{e}	ก0.010±0.001^{bc}	ก0.010±0.001^{cd}	ก0.009±0.001^{b}	ก0.048±0.001^{f}	ข**0.107±0.001**^{g}	ก0.011±0.001^{d}	ข-0.008±0.000^{a}
ไนเตรท - ไนโตรเจน	0.5	ก0.013±0.006^{bc}	ก0.002±0.001^{a}	ก0.003±0.001^{a}	ข0.009±0.002^{b}	ข0.024±0.001^{d}	ก0.017±0.001^{c}	ข0.014±0.001^{c}	ข**0.086±0.003**^{e}
	1.0	ก0.007±0.004^{b}	ก0.001±0.001^{a}	ก0.001±0.001^{a}	ก0.006±0.001^{b}	ก0.013±0.003^{c}	ข0.019±0.001^{d}	ค**0.050±0.003**^{e}	ก0.002±0.001^{a}
	1.5	ก0.006±0.003^{b}	ก0.001±0.001^{a}	ก0.002±0.001^{a}	ก0.006±0.000^{b}	ก0.011±0.001^{c}	ค**0.037±0.001**^{d}	ก0.005±0.001^{b}	ก0.000±0.000^{a}

ตารางภาคผนวกที่ 15 (ต่อ)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	ความหนาแน่นของสาหร่าย (ก./ล.)	อัตราการดูดซับ (มก./ก.นน.สด/วัน)							
		วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 5	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15
ออร์โธ	0.5	ก 0.002±0.002^{a}	ก 0.001±0.001^{a}	ข 0.010±0.002^{b}	ก 0.004±0.004^{ab}	ก 0.007±0.006^{ab}	ข 0.005±0.002^{ab}	ค **0.031±0.006**^{c}	ก **0.010±0.005**^{b}
ฟอสเฟต -	1.0	ก 0.002±0.001^{a}	ก 0.000±0.001^{a}	ก 0.004±0.003^{a}	ก 0.006±0.005^{a}	ก 0.005±0.005^{a}	ก 0.002±0.001^{a}	ข **0.018±0.005**^{b}	ก 0.004±0.003^{a}
ฟอสฟอรัส	1.5	ก 0.001±0.000^{a}	ก 0.001±0.001^{a}	ก 0.003±0.001^{ab}	ก 0.006±0.004^{c}	ก 0.007±0.001^{c}	ก 0.003±0.000^{ab}	ก 0.006±0.002^{c}	ก 0.004±0.001^{bc}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่กำกับด้วยอักษรภาษาไทยต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรภาษาอังกฤษต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ค่าเฉลี่ยที่มีค่าเป็นลบแสดงว่าสาหร่ายไม่สามารถดูดซับธาตุอาหารได้

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

1. การวิเคราะห์หาแอมโมเนีย (Strickland and Parsons, 1972)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. น้ำกลั่น de-ionized ใช้สำหรับเตรียมสารละลาย, blank และสารมาตรฐาน ซึ่งน้ำกลั่นที่ใช้ควรได้จากการกลั่นใหม่ ๆ

2. สารละลายฟีนอล: ละลายฟีนอล (C_6H_5OH) 5 ก. ในเอธิลแอลกอฮอล์ 95 % (V/V) 50 มล.

3. สารละลายโซเดียมไนโตรปรัสไซด์: ละลายโซเดียมไนโตรปรัสไซด์ ($Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$) 0.5 ก. ในน้ำกลั่น de-ionized 100 มล. เก็บรักษาสารละลายนี้ในขวดแก้วสีชา สารละลายนี้มีอายุ 1 เดือน

4 สารละลายอัลคาไลน์: ละลายไตรโซเดียมซิเตรทไดไฮเดรต ($Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$) (analytical reagent grade) 20 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (analytical reagent grade) 1 ก. ในน้ำกลั่น de-ionized 100 มล.

5 สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่มีอยู่ในท้องตลาด (เช่น ไฮเตอร์) เพื่อให้ความเข้มข้นของคลอไรด์มากกว่า 1.5 นอร์มอล ควรซื้อที่ผลิตขึ้นมาใหม่ ๆ อย่างไรก็ตามจะต้องตรวจสอบความแรงของไฮเตอร์ก่อนใช้ ดังนี้

1) ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 12.5 ก. ในน้ำ deionized 500 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

2) ละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 ก. ในน้ำ de-ionized 50 มล. ในฟลาสก์แล้วเติมไฮเตอร์ลงไป 1 มล.

3) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (12 นอร์มอล) ลงในสารละลายในข้อ 2)

4) ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นไม่มีสี

5) ไฮเตอร์จะเสื่อมสภาพและนำมาวิเคราะห์หาแอมโมเนียไม่ได้ถ้าการไตเตรทตามข้อ 4) ใช้สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตน้อยกว่า 12 มล.

6. สารละลาย oxidizing: ผสมสารละลายอัลคาไลน์และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ เข้าด้วยกันในอัตราส่วน 4:1 สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้ง

7. น้ำทะเลเทียม ละลายโซเดียมคลอไรด์ (analytical reagent quality) เป็น ก. ตามความเค็มที่ต้องการในน้ำกลั่น 1 ล.

8. สารละลายมาตรฐานของแอมโมเนีย: ละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2 SO_4$) (analytical reagent grade) ที่อบแห้ง 105-110 °ซ. นาน 1-24 ชม. 0.165 ก. ด้วยน้ำกลั่น de-ionized แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ล. ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายนี้มีความเข้มข้น 35 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. และเรียกสารละลายนี้ว่า stock standard solution เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดแก้วสีชา สารละลายนี้มีอายุการใช้งาน 6 เดือน ถึง 1 ปี

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1) ดูดสารละลายจาก stock standard solution มา 10 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 3.5 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล.

2) ดูดสารละลายจากข้อ 1) มา 1, 2, 4 และ 8 มล. ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มล. แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 50 มล. ด้วยน้ำกลั่น หรือน้ำทะเลเทียม สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.070, 0.140, 0.280 และ 0.56 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับ blank ใช้น้ำกลั่นหรือน้ำทะเลเทียมให้สอดคล้องกับสารละลายมาตรฐาน

3) จากนั้นเติมสารละลายฟีนอล 2.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมสารละลายโซเดียมไนโตรปรัสไซด์ และสารละลายออกซิไดซิง 2.5 และ 5 มล. ตามลำดับ หลังจากเติมน้ำยาเคมีแต่ละชนิดเขย่าให้เข้ากัน

4) ทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชม. แต่ไม่เกิน 24 ชม. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นน.ม. จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี Linear regression (ผู้วิเคราะห์อาจหาความสัมพันธ์จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยตรงก็ได้)

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ดูดน้ำตัวอย่าง ซึ่งผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C ด้วยไปเปต 10 มล. ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิดเป็นเกลียวเพื่อป้องกันการระเหยของแอมโมเนีย

2) เติมสารละลายฟีนอล 0.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไนโตรปรัสไซด์ และสารละลายออกซิไดซิง 0.5 และ 1 มล. ตามลำดับ หลังจากเติมน้ำยาเคมีแต่ละชนิดเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชม. แต่ไม่เกิน 24 ชม.

3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นน.ม.

4) จดบันทึกค่าความเข้มข้นที่วัดได้ หรือนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานที่ได้เตรียมไว้

ในกรณีความเค็มของน้ำตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานแตกต่างกันเกิน 2 ส่วนในพัน ควรปรับแก้ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากตัวอย่างด้วยสูตรดังต่อไปนี้

$NH_{3(corr)} = (1+0.0073 \times (S_s - S_0)) \times NH_{3(unc)}$

เมื่อ $NH_{3(corr)}$, $NH_{3(unc)}$ = ความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างที่ปรับแก้ผลเนื่องจากความเค็มแล้ว และยังไม่ได้ปรับแก้ผลเนื่องจากความเค็มตามลำดับ สำหรับ S_0 และ S_s = ความเค็มของสารละลายมาตรฐานและน้ำตัวอย่างตามลำดับ

2. การวิเคราะห์หาไนไตรท์ (NO_2^-) (Strickland and Parsons, 1972)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์: ละลายซัลฟานิลาไมด์ ($C_6H_8N_2O_2S$) 5 ก. ในของผสมของ 50 มล. ของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นกับน้ำกลั่นประมาณ 300 มล. จากนั้นเจือจางสารละลายที่ได้ให้มีปริมาตร 500 มล.

2. สารละลายแนฟทิล เอธิลีนไดอะมีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (NED): ละลายแนฟทิล เอธิลีนไดอะมีนไดไฮโดรคลอไรด์ ($C_{10}H_7NHCH_2CH_2NH_2.2HCl.CH_3OH$) 0.50 ก. ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล.

3. สารละลายมาตรฐานของไนไตรท์: ละลายโซเดียมไนไตรท์ ($NaNO_2$) ที่อบแห้ง 105-110 °ซ. เป็นเวลา 1 ชม. (อบนาน 24 ชม.ก็ได้) 0.345 ก. ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 70 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. สารละลายนี้เรียกว่า stock nitrite standard solution เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดแก้วสีชาแล้วแช่เย็นไว้ สารละลายนี้มีอายุ 1-2 เดือน

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1) ดูดสารละลายมาตรฐานไนไตรท์จาก stock standard solution มา 1 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำทะเลเทียมให้ได้ 100 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.70 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. สารละลายนี้เรียกว่า intermediate standard solution

2) ดูดสารละลายจากข้อ 1) มา 1, 5, 10, 20 และ 40 มล. ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มล. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 50 มล. สารละลาย working standard นี้มีความเข้มข้น 0.014, 0.07, 0.14, 0.28 และ 0.56 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับ blank ใช้น้ำทะเลเทียมหรือน้ำกลั่นให้สอดคล้องกับสารละลาย working standard

3) เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ 1 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ แล้วเติมสารละลาย NED 1 มล. เขย่าตัวอย่างทันที ทิ้งไว้ 10 นาที ถึง 1 ชม. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นน.ม. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี linear regression (ผู้วิเคราะห์อาจหาความสัมพันธ์จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยตรงก็ได้)

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตวงน้ำตัวอย่างซึ่งผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C 50 มล. ด้วยกระบอกตวงใส่ฟลาสก์รูปชมพู่ขนาด 125 มล.

2) เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ 1 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

3) เติมสารละลาย NED 1 มล. เขย่าตัวอย่างทันที แล้วทิ้งไว้ 10 นาที ถึง 2 ชม. จากนั้นนำน้ำตัวอย่างทั้งที่เติมน้ำยาเคมีและไม่ได้เติมน้ำยาเคมีไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นน.ม.

4) สำหรับ blank ใช้น้ำกลั่น แล้วทำเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง

5) จดบันทึกค่าความเข้มข้นที่วัดได้ หรือนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของไนไตรท์ในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานที่ได้เตรียมไว้

3. การวิเคราะห์หาไนเตรท (NO_3^-) (Cadmium reduction method) (Strickland and Parsons, 1972)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายแอมโมเนียมเข้มข้น: ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 125 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล. เก็บสารละลายที่ได้ในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก

2. สารละลายแอมโมเนียมเจือจาง โดยดูดสารละลายในข้อ 1 มา 50 มล. แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 2,000 มล. เก็บสารละลายที่ได้ในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก

3. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ ใช้สารละลายเดียวกับไนไตรท์

4. สารละลายแนฟทิล เอธิลีนไดอะมีนไดไฮโดรคลอไรด์ (NED) ใช้สารละลายเดียวกับไนไตรท์

5. น้ำทะเลเทียม เตรียมเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาแอมโมเนีย

6. สารละลาย $CuSO_4$ 2 % (W/V): ละลาย $CuSO_4.5H_2O$ 10 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล.

7. สารละลายมาตรฐานของไนเตรท: ละลายโปแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ที่อบแห้ง 105-110 °ซ. นาน 1-1.5 ชม. จำนวน 1.02 ก. ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1 ล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 140 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สารละลายที่ได้เรียกว่า stock standard solution เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดแก้วสีชาแล้วแช่เย็นไว้ สารละลายนี้เสถียรตลอดไป

การเตรียมคอลัมน์

1. ชั่งโลหะแคดเมียมมาประมาณ 50 ก. ผสมกับสารละลาย $CuSO_4$ 2 % (W/V) 250 มล. กวนจนกระทั่งสีฟ้าของสารละลายจางลงและเริ่มมีตะกอนของทองแดงในสารละลาย จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นประมาณ 10 ครั้ง

2. อุดด้านในของคอลัมน์ด้วยใยแก้วหรือขดลวดทองแดง แล้วเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางให้เต็มคอลัมน์ ทำการบรรจุผงแคดเมียมลงในคอลัมน์ (ระวังอย่าให้แคดเมียมสัมผัสกับอากาศ) จากนั้นล้างคอลัมน์ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจาง 3 ครั้ง

3. เติมสารละลายมาตรฐานของไนเตรท 1.4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. 100 มล. (เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 2 มล.) แล้วปล่อยให้ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 8-12 มล./นาที เพื่อ activated คอลัมน์ จากนั้นล้างคอลัมน์ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางอีก 3 ครั้ง

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1) ใช้ไปเปตดูดสารละลายจาก stock standard solution มา 5 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตรแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 500 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 1.4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. สารละลายนี้เรียกว่า intermediate standard solution

2) ดูดสารละลาย intermediate standard solution 1, 5, 10 และ 20 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มล. เจือจางด้วยน้ำทะเลเทียมให้ได้ 100 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.014, 0.070, 0.140, และ 0.280 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สารละลายนี้เรียกว่า working standard solution สำหรับ blank ใช้น้ำทะเลเทียม

3) เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 2 มล. ลงใน working standard solution และ blank ที่จะนำมาผ่านคอลัมน์ แล้วเขย่าให้เข้ากัน

4) นำ working standard solution และ blank ในข้อ 3) ไปผ่านคอลัมน์ โดยปรับให้สารละลายในคอลัมน์ไหลด้วยอัตรา 8-12 มล./นาที จากนั้นเติมสารละลายที่ได้ประมาณ 5-10 มล. ปล่อยสารละลายในคอลัมน์ทิ้งจนเหลือระดับเดิม แล้วเติมสารละลายที่เหลือลงในคอลัมน์ ปล่อยสารละลายทิ้งประมาณ 25 มล. เก็บสารละลายที่เปิดออกในช่วงหลังให้ได้ปริมาตร 50 มล. ส่วนสารละลายที่เหลือปล่อยทิ้งไป

5) เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ 1 มล. ทันที เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบรูณ์ จากนั้นเติมสารละลาย NED 1 มล. เขย่าตัวอย่างทันที ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ถึง 1 ชม. จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 543 นน.ม.

6) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี linear regression (ผู้วิเคราะห์อาจหาความสัมพันธ์จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยตรงก็ได้)

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตวงน้ำตัวอย่างซึ่งผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C ใส่ฟลาสก์รูปชมพู่ 100 มล.

2) เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 2 มล. เขย่าให้เข้ากัน

3) เติมสารละลายในข้อ 2) ประมาณ 5-10 มล. ลงในคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 8-12 นาที ต่อ 100 มล. ปล่อยสารละลายในคอลัมน์ทิ้งจนเหลือระดับเดิม

4) เติมสารละลายในข้อ 2) ที่เหลือลงในคอลัมน์ ปล่อยสารละลายทิ้งไว้ประมาณ 25 มล. แล้วเก็บสารละลายที่เปิดออกในช่วงหลังให้ได้ปริมาตร 50 มล.

5) เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ 1 มล. ทันที เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

6) เติมสารละลาย NED 1 มล. เขย่าตัวอย่างทันที ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ถึง 1 ชม. จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 543 นน.ม. คำนวณหาความเข้มข้นของไนเตรทจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้

7) ความเข้มข้นของไนเตรท = ความเข้มข้นจากตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์– ค่าไนไตรท์ของตัวอย่างนั้น

3. การหาประสิทธิภาพของคอลัมน์

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานของไนไตรท์และไนเตรทที่ความเข้มข้นเดียวกันสำหรับคอลัมน์แต่ละคอลัมน์ (สำหรับ blank ใช้จาก blank ของตัวอย่าง)

2) นำสารละลายของไนเตรทไปผ่านคอลัมน์โดยดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่างทุกขั้นตอน สำหรับสารละลายมาตรฐานของไนไตรท์ เติม sulfanilamide และ NED โดยไม่ต้องผ่านคอลัมน์

3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง คำนวณหาประสิทธิภาพของคอลัมน์ดังนี้

ประสิทธิภาพของคอลัมน์

$$= \frac{\text{Abs(0.070 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.)-Abs(blank มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.)}}{\text{Abs(0.070 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล.)-Abs(blank มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล.)}} \times 100$$

ประสิทธิภาพของคอลัมน์ควรอยู่ระหว่าง 90–110 % หากประสิทธิภาพของคอลัมน์มีค่าต่ำกว่า 90 % และมากกว่า 110 % ควรปฏิบัติดังนี้

1) กระตุ้นด้วยสารละลาย KNO_3 1.4 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 100 มล. โดยปล่อยให้ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลเช่นเดียวกับตัวอย่าง

2) ล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจาง 100 มล. 3 ครั้ง

3) ผ่านตัวอย่างตามปกติ

4) หากประสิทธิภาพของคอลัมน์ยังต่ำกว่า 90 % ควรเตรียมคอลัมน์ใหม่

5) ผงแคดเมียมที่ใช้ไปนาน ๆ อาจแตกละเอียดทำให้สารละลายไหลช้า ควรกรองผงแคดเมียมด้วยตะแกรงร่อนที่มี mesh size 0.5-1 มม. เพื่อแยกผงที่ละเอียดออกไป

4. การวิเคราะห์หาไนโตรเจนละลายน้ำรวมทั้งหมด (Persulfate oxidation)

(Grasshoff *et al.*, 1983)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. น้ำกลั่น de-ionized ควรได้จากการกลั่นใหม่ ๆ

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 โมลาร์:ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ACS grade) 3.0 ก. ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ล. เก็บไว้ในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท

3. สารละลายออกซิไดซิง:ละลายโปแตสเซียมซัลเฟต 10 ก. และกรดบอริก 6 ก. ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 โมลาร์ จำนวน 1 ล. เก็บรักษาสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทไว้ที่อุณหภูมิห้องได้เป็นเวลา 7 วัน

4. สารละลายมาตรฐานไนโตรเจน

1) stock standard solution : สารละลายมาตรฐานไนโตรเจนใช้ไกลซีนเป็นแหล่งไนโตรเจนอินทรีย์ เตรียมโดยชั่งไกลซีน 0.5362 ก. ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 1 ล. จะได้ความเข้มข้นของไกลซีน 100 มก.ไกลซีน-ไนโตรเจน/ล.

2) intermediate standard solution:เตรียมโดยใช้ไปเปตดูดสารละลายจาก stock มา 10 มล. ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 10 มก.ไกลซีน-ไนโตรเจน/ล.

3) working standard solution : เตรียมโดยไปเปตสารละลายจากข้อ 2) มา 10 มล. ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 1 มก.ไกลซีน-ไนโตรเจน/ล.

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ดูดน้ำตัวอย่างซึ่งผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C ด้วยไปเปต 25 มล. ใส่ในขวดย่อยตัวอย่างพร้อมกับเติมสารเคมีสำหรับออกซิไดส์ 5 มล.

2. ดูดสารมาตรฐานของไกลซีนจาก stock ความเข้มข้น 1.00 มก.ไกลซีน-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 25 มล. ลงในขวดย่อย แล้วเติมสารเคมีสำหรับออกซิไดส์ 5 มล.

3. สำหรับ reagent blank ใช้น้ำกลั่น จำนวน 25 มล. ลงในขวดย่อย เติมสารเคมีสำหรับออกซิไดส์ 5 มล.

4. นำไปย่อยด้วยหม้อนึ่งความดันสูง (121 °ซ., 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว) เป็นเวลา 30 นาที

5. หลังจากตัวอย่างเย็นแล้ว เขย่าขวดตัวอย่างเพื่อให้ตะกอนขาวละลาย จากนั้นจึงใช้ไปเปตดูดสารละลายที่ได้ 5 มล. ลงในขวดวัดปริมาตร เจือจางให้เป็น 100 มล. แล้วนำไปวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาไนเตรท

การคำนวณ

ไนโตรเจนละลายน้ำรวมทั้งหมด (TDN)

$$= \left[\frac{C}{\text{Abs.std-Abs.blank}} \right] \text{x (Abs.sample-Abs.blank) x D}$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไกลซีนในขั้นตอนสุดท้าย (= 0.042 มก.ไกลซีน-ไนโตรเจน/ล.)

Abs. std. = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

Abs. blank = ค่าการดูดกลืนแสงของ blank

Abs. sample = ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง

D = อัตราส่วนการเจือจาง (Dilution factor) (= 24)

5. การวิเคราะห์หาออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) (Strickland and Parsons, 1972)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต: ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$) 15 ก. ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล. เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดพลาสติกและไม่ให้ถูกแสง สารละลายนี้เสถียรตลอดไป

2. สารละลายกรดซัลฟูริก: เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) 140 มล. ลงในน้ำกลั่น 900 มล. (ค่อยๆ เท) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเก็บไว้ในขวดแก้ว

3. สารละลายกรดแอสคอร์บิก: ละลายกรดแอสคอร์บิก 27 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล. เก็บสารละลายไว้ในขวดพลาสติก นำไปแช่แข็ง สารละลายนี้เสถียรเป็นเวลาหลายเดือน หากเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจะมีอายุใช้งานเพียง 1 สัปดาห์

4. สารละลายโปแตสเซียมแอนติมอนีทาร์เทรต: ละลายโปแตสเซียมแอนติมอนีทาร์เทรต ($K(SbO)C_4H_4O_6.0.5H_2O$) 0.34 ก. ในน้ำกลั่น 250 มล. เก็บรักษาสารละลายไว้ในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก สารละลายนี้เสถียรเป็นเวลาหลายเดือน

5. น้ำยาเคมีผสม (mixed reagent): ผสมสารละลายต่อไปนี้เข้าด้วยกัน สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต, สารละลายกรดซัลฟูริก, สารละลายกรดแอสคอร์บิก และสารละลายโปแตสเซียมแอนติมอนีทาร์เทรต ในอัตราส่วน 2:5.5:2:1 น้ำยาเคมีผสมควรใช้ภายในเวลา 6 ชม.

6. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต: ละลายโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่อบแห้ง 105 °ซ. นาน 1-24 ชม. จำนวน 0.2197 ก. ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 50 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1) ดูดสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตมา 10 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มล. สารละลายนี้มีความเข้มข้น 5.0 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. สารละลายนี้เรียกว่า intermediate standard solution

2) ดูด intermediate standard solution 1, 2, 3, 4 และ 5 มล. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 50 มล. สารละลายจะมีความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ สำหรับ blank ใช้น้ำกลั่น

3) เติมน้ำยาเคมีผสมจำนวน 5 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที ถึง 2-3 ชม.

4) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 885 นน.ม. จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้

5) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี linear regression

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ใช้กระบอกตวงตวงน้ำตัวอย่างซึ่งผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C จำนวน 100 มล. ใส่ฟลาสก์รูปชมพู่ สำหรับ blank ใช้น้ำกลั่น

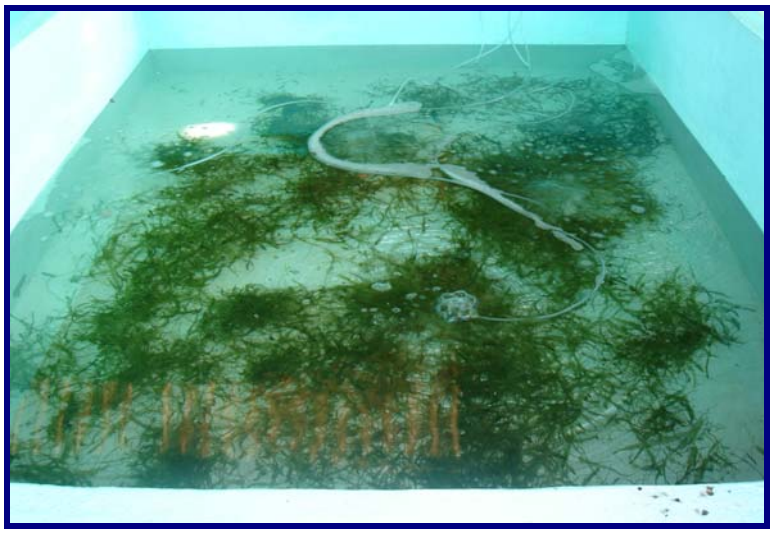
2) เติมน้ำยาเคมีผสมจำนวน 10 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 นาทีถึง 2-3 ชม.

3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 885 นน.ม. จดบันทึกค่าที่วัดได้

ภาคผนวก ค
ภาพแสดงการดำเนินการทดลอง

ภาคผนวก ค

ภาพแสดงการดำเนินการทดลอง

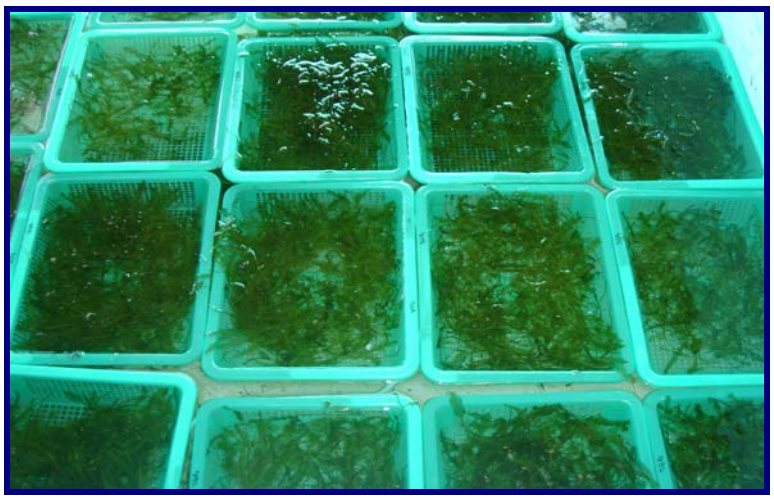


ภาพประกอบภาคผนวก ค 1 การพักสาหร่ายหลังจากตัดเป็นท่อน ๆ ในบ่อซีเมนต์ เป็นเวลา 1 คืนก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

ภาพประกอบภาคผนวก ค 2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับธาตุอาหารยูเรีย แอมโมเนีย ไนเตรท และฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายขนนก

ภาพประกอบภาคผนวก ค 3 การชั่งน้ำหนักสาหร่ายเพื่อใช้ในการทดลอง

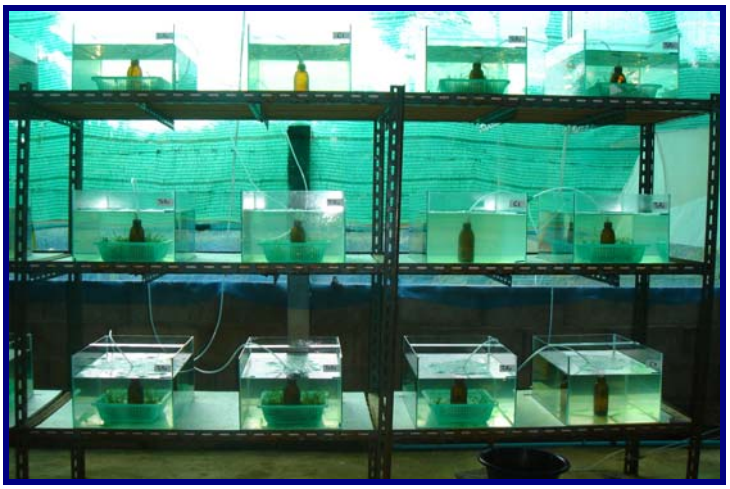
ภาพประกอบภาคผนวก ค 4 การศึกษาชนิดและอัตราส่วนของปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก



ภาพประกอบภาคผนวก ค 5 การพักสาหร่ายในบ่อซีเมนต์ก่อนนำมาใช้ในการศึกษาความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

ภาพประกอบภาคผนวก ค 6 การศึกษาความหนาแน่นของสาหร่ายและความเข้มข้นของปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนนก

ภาพประกอบภาคผนวก ค 7 การเตรียมสาหร่ายเพื่อชั่งน้ำหนักหาอัตราการเจริญเติบโต



ภาพประกอบภาคผนวก ค 8 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมของสาหร่ายขนนก

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางศุลีมาศ สุทธิเนียม

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910620057

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
เทคโนโลยีการเกษตรบัณฑิต	สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้	2533

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ครู คศ.2 วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีพังงา สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ