การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังบรรจุเม็ดดินเผาและผักกวางตุ้ง

นายเอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL IN THE RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM BY BAKED CLAY BEADS AND CHINESE CABBAGE TANK

Mr. Aeknarin Thanakitpairin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังบรรจุเม็ดดินเผาและผักกวางตุ้ง
โดย	นายเอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

…… อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข)

……กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เบญจพร บุญชยาอนันต์)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี)

เอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์ : การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังบรรจุเม็ดดินเผาและผักกวางตุ้ง. (NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL IN THE RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM BY BAKED CLAY BEADS AND CHINESE CABBAGE TANK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข, 213 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการหมุนเวียนน้ำและตะกอนอินทรีย์ผ่านระบบบำบัดที่มีการปลูกพืชบนวัสดุตัวกลางเม็ดดินเผา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง การทดลองในช่วงแรกเป็นการศึกษาบทบาทและอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) พบว่าการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจะเกิดตะกอนแขวนลอยขึ้นในน้ำปริมาณมาก โดยตะกอนแขวนลอยมีบทบาทสำคัญในการบำบัดของเสียไนโตรเจน (แอมโมเนียและไนไทรต์) ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน เมื่อทดลองดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงปลาทั้งสองระดับความหนาแน่นด้วยอัตราร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถังเป็นจำนวน 6 รอบ พบว่าตะกอนแขวนลอยในน้ำจะเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณเท่าเดิมในระยะเวลา 4 วัน คิดเป็นอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยเท่ากับ 2.45±0.73 และ 5.17±1.26 มก./ล.-วัน สำหรับระบบการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและสูง ตามลำดับ สำหรับการทดลองในช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาการสะสมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของผักกวางตุ้ง *(Brassica pekinensis)* โดยเปรียบเทียบอัตราการเติบโตและดูดซึมธาตุอาหารระหว่างผักกวางตุ้งที่ปลูกบนวัสดุตัวกลางเม็ดดินเผาและบนดินเพาะปลูกที่มีแหล่งสารอาหารเป็นปุ๋ยอินทรีย์เป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่าผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกและเม็ดดินเผามีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.04±0.01 และ 0.03±0.01 ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน โดยในผักกวางตุ้งมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสคิดเป็นร้อยละ 100 และ 1.78 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนการทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดคุณภาพน้ำจากระบบเลี้ยงปลานิลเมื่อทดลองทำการหมุนเวียนน้ำเลี้ยงปลาและตะกอนแขวนลอยเข้าสู่ระบบบำบัดที่มีวัสดุตัวกลางเม็ดดินเผาเป็นตัวกรองตะกอนแขวนลอยร่วมกับการปลูกผักกวางตุ้ง ด้วยอัตราการไหล 3 ล./นาที เป็นเวลา 10 นาที และหยุดพัก 60 นาที หมุนเวียนไปตลอด 24 ชม. แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลา + เม็ดดินเผา + ผักกวางตุ้ง) ชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลา + เม็ดดินเผา) ผลการทดลองพบว่าอัตราการเติบโตของปลานิลในชุดทดลอง (0.45±0.15 ก.-นน. เปียก/วัน) มีค่าสูงกว่าในชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ที่มีอัตราการเติบโตใกล้เคียงกัน คือ 0.37±0.16 และ 0.38±0.05 ก.-นน. เปียก/วัน ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักเฉลี่ยของผักกวางตุ้งตลอดการทดลองพบว่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15±0.02 เป็น 1.00±0.38 ก.-นน. เปียก ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิล พบว่าน้ำในชุดทดลองมีคุณภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยมีปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตต่ำ ผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกเปลี่ยนเป็นเนื้อเยื่อของผักกวางตุ้งมีค่าเพียงร้อยละ 1.31 และร้อยละ 0.11 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปลูกพืชในถังบำบัดมีส่วนช่วยในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่มากนัก ส่วนการบำบัดของเสียไนโตรเจนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในถังที่บรรจุเม็ดดินเผา โดยการตกค้างของตะกอนในชั้นของเม็ดดินเผาจะเกิดกระบวนการย่อยสลายและกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในชั้นตะกอนภายในถังบำบัด

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270588821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS : CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM / NITROGEN COMPOUNDS / *OREOCHROMIS NILOTICUS* LINNAEUS / *BRASSICA PEKINENSIS* / AQUAPONICS CULTIVATION

AEKNARIN THANAKITPAIRIN : NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL IN THE RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM BY BAKED CLAY BEADS AND CHINESE CABBAGE TANK. ADVISOR : ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 213 pp.

This research evaluated the nitrogen and phosphorus removal efficiency in the recirculating aquaculture system (RAS) with the water treatment tank containing plant and baked clay beads. The experiments consisted of 3 parts i.e., (1) the study on suspended solid accumulation during fish culture at low (0.5 kg/m^3) and high (2 kg/m^3) densities, (2) estimation of nitrogen and phosphorus content in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*), and (3) evaluation of the RAS for fish (Nile tilapia: *Oreochromis niloticus*) cultivation with water treatment using baked clay beads for sediment removal and Chinese cabbage for nutrients removal. The results showed that high density culture of tilapia produced high amount of suspended solids and this solids commencing on nitrification treatment of nitrogen wastes (ammonia and nitrite). Removal of suspended organic solid from the RAS at 50% for 6 rounds revealed that an increase of suspended solid (SS) to the original concentration took approximately 4 days and the SS removal rates were 2.45±0.73 and 5.17±1.26 mg/L-day for low and high density fish culture, respectively. Growth comparison between Chinese cabbage cultivated in baked clay beads and organic soil for 45 days showed that organic soil provided higher growth rate (0.04±0.01 g-wet/tree-day) than in baked clay beads (0.03±0.01 g-wet/tree-day) with nitrogen and phosphorus content was 100 and 1.78%, respectively. In the last experiment, the water from Nile tilapia tank was circulated to the baked clay beads tank containing Chinese cabbage at 3 L/min for the continuous cycle of 10 minutes flow and 60 minutes pause. Three experimental units were assigned as treatment (fish tank + baked clay beads tank with Chinese cabbage), control-1 (fish tank only), and control-2 (fish tank + baked clay beads tank without Chinese cabbage). It was found that growth of tilapia in treatment tanks (0.45±0.15 g-wet/day) was higher than control-1 and control-2 tanks (0.37±0.16 and 0.38±0.05 g-wet/day, respectively). Average weight of Chinese cabbage increased from 0.15±0.02 to 1.00±0.38 g-wet. Water quality analysis revealed that water quality in treatment tank had lower ammonia, nitrite nitrate and phosphate concentration than control systems. However, nitrogen and phosphorus balance analysis showed that only 1.31% of nitrogen and 0.11% of phosphorus input was incorporated into Chinese cabbage. Hence, nitrogen and phosphorus removal by plant was only the minor role. Most of the nitrogen removal was from decomposition and denitrification processes in sediment layer trapped in baked clay beads tank.

Department…Environmental Engineering	Student's Signature……..
Field of Study.Environmental Engineering	Advisor's Signature……..
Academic Year :……2011……	Co-advisor's Signature ……...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน อาจารย์ ดร. เบญจพร บุญชยาอนันต์ กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ รวมทั้งคำปรึกษาและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจาก อาจารย์ ดร. ภัทรวดี สุ่มทอง นาคมี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำการทดลอง และตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์บางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปี 2554 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และทุนวิจัยเพิ่มเติมจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (รหัสโครงการ FW1017A) ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำการวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและครุภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็น

ขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัย เจ้าหน้าที่ และนิสิตปริญญาโทที่ทำงานวิจัยในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกคน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับมิตรภาพ กำลังใจ ตลอดจนความช่วยเหลือทั้งในด้านการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่เลี้ยงดู มอบความรัก กำลังใจ คำปรึกษา และสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน จนได้รับปริญญามหาบัณฑิตสมดังตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญรูป..... ด

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 ศักยภาพของผลผลิตสัตว์น้ำ..... 4

2.1.1 สถานภาพผลผลิตสัตว์น้ำ..... 4

2.1.2 การควบคุมคุณภาพผลผลิตสินค้าสัตว์น้ำ..... 5

2.2 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 5

2.2.1 ระบบเปิด..... 6

2.2.2 ระบบกึ่งเปิด..... 7

2.2.3 ระบบหมุนเวียนน้ำหรือระบบปิด..... 7

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 8

2.3.1 แอมโมเนีย..... 8

2.3.2 ไนไทรต์..... 9

2.3.3 ไนเทรต..... 9

2.3.4 อุณหภูมิ..... 10

2.3.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ..... 11

2.3.6 ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช..... 11

2.3.7 สภาพด่าง..... 12

หน้า

2.3.8 ฟอสฟอรัส..... 12
2.3.9 อนุภาคของแข็งแขวนลอย..... 13
2.4 ประเภทของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ..... 14
2.4.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน..... 14
2.4.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน..... 14
2.4.3 สารประกอบไนไทรต์..... 15
2.4.4 สารประกอบไนเทรต..... 15
2.5 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ..... 15
2.5.1 กระบวนการดูดซึม..... 16
2.5.2 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน..... 17
2.5.3 กระบวนการไนทริฟิเคชัน..... 17
2.5.4 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน..... 18
2.6 การหมุนเวียนของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 19
2.6.1 สมดุลไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 19
2.6.2 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากกระบวนการเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 20
2.7 ระบบอะควาโปนิกส์..... 21
2.7.1 ปัจจัยการทำงานของระบบอะควาโปนิกส์..... 24
2.7.2 กลไกการบำบัดของเสียจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการใช้ประโยชน์ของพืช..... 25
2.7.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน..... 27
2.7.4 รูปแบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน..... 29
2.7.5 ข้อเด่นและข้อด้อยในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน..... 31
2.7.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน..... 32
2.7.7 เม็ดดินเผา..... 33
2.8 คุณลักษณะของปลานิลและการเลี้ยง..... 34
2.8.1 สรีรวิทยาของปลานิล..... 34
2.8.2 การเลี้ยงปลานิล..... 35
2.9 ชีววิทยาผักกวางตุ้ง..... 37
2.9.1 ส่วนประกอบของผักกวางตุ้ง..... 38
2.9.2 โรคและศัตรูพืชที่สำคัญของผักกวางตุ้ง..... 38

หน้า

2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 39
2.10.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 39
2.10.2 อิทธิพลของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 40
2.10.3 สมดุลของสารอาหารและสภาวะที่เหมาะสมในระบบอะควาโปนิกส์..... 43
2.10.4 การใช้ตัวกรองในการรองรับสารอาหารของระบบปลูกพืช..... 44
2.11 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 47
2.11.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 47
2.11.2 อิทธิพลของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 48
2.11.3 สมดุลของสารอาหารและสภาวะที่เหมาะสมในระบบอะควาโปนิกส์..... 48
2.11.4 การใช้ตัวกรองในการรองรับสารอาหารของระบบปลูกพืช..... 49

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย..... 50
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี..... 55
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง..... 55
3.1.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ..... 55
3.1.3 สารเคมี..... 56
3.2 การทดลอง..... 56
3.2.1 การเตรียมถังเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 56
3.2.2 การเตรียมวัสดุกรองชีวภาพ..... 57
3.2.3 การเตรียมถังปลูกพืช..... 58
3.2.4 การเตรียมต้นกล้าผักกวางตุ้ง..... 58
3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 68
3.3.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ..... 68
3.3.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงปลานิล..... 68
3.3.3 การประเมินอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง..... 69

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 72
4.1 การศึกษาระบบเลี้ยงปลานิลและอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอย..... 72
4.1.1 คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิล..... 72
4.1.2 ปริมาณอนุภาคสารแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล..... 81
4.1.3 อัตราการเติบโตของปลานิล..... 86

หน้า

4.1.4 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังเลี้ยงปลานิล..... 90
4.2 การศึกษาอัตราการเติบโตและความต้องการธาตุอาหารของพืช..... 97
4.2.1 อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง..... 97
4.2.2 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังปลูกผักกวางตุ้ง..... 100
4.3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์..... 106
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิล..... 108
4.3.2 ปริมาณอนุภาคสารแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล..... 115
4.3.3 การเลี้ยงและอัตราการเติบโตของปลานิล..... 118
4.3.4 อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง..... 123
4.3.5 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด..... 128
4.3.6 การประเมินสมดุลของฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด..... 133

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... **140**
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 140
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 144

รายการอ้างอิง..... **146**

ภาคผนวก..... **157**
ภาคผนวก ก..... 158
ภาคผนวก ข..... 168
ภาคผนวก ค..... 185
ภาคผนวก ง..... 187
ภาคผนวก จ..... 204
ภาคผนวก ฉ..... 208

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... **213**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อกุ้งและปลาในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	11
2.2	ระดับความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	12
2.3	อัตราการกักเก็บและอัตราการปล่อยสารอาหารของสัตว์น้ำชนิดต่างๆ โดยคิดจากร้อยละของสารอาหารที่มีในอาหารสัตว์น้ำ	14
2.4	การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์และไฮโดรโนิกส์.....	29
2.5	การเปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน.....	32
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1.....	60
3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.....	62
3.3	รูปแบบของชุดการทดลองช่วงที่ 3.....	64
3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3.....	65
3.5	พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนความถี่สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิล.....	70
4.1	ผลสรุปคุณภาพน้ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)และที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)....	79
4.2	ผลการเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 56 วัน จากถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ.....	90
4.3	ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง.....	93
4.4	ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นต่ำ.....	94
4.5	ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง.....	95

ตารางที่ หน้า

4.6 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นต่ำ..... 96

4.7 ผลการเปรียบเทียบการปลูกผักกวางตุ้งระหว่างการปลูกด้วยดินเพาะและการปลูกบนเม็ดดินเผาเป็นเวลา 45 วัน..... 99

4.8 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก (ชุดควบคุม)..... 102

4.9 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง)..... 103

4.10 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก (ชุดควบคุม)..... 104

4.11 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง)..... 105

4.12 ผลสรุปคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2..... 114

4.13 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลจากชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2..... 118

4.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีของน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2..... 118

4.15 ผลการเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 35 วัน ของถังเลี้ยงชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2..... 119

4.16 ผลการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ของระบบการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์..... 124

4.17 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลอง..... 130

ตารางที่ หน้า

4.18 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการควบคุม-1..... 131
4.19 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการควบคุม-2..... 132
4.20 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลอง..... 135
4.21 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดควบคุม-1..... 136
4.22 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดควบคุม-2..... 137
4.23 การเปรียบเทียบผลของการศึกษา nitrogen budget จากเอกสารที่ได้มีรายงานไว้กับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้..... 138
ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองในการทดลองที่ 4.1.1..... 168
ข-2 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและที่ระดับความหนาแน่นสูงจากการทดลองที่ 4.1.1..... 169
ข-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจากการทดลองที่ 4.1.2..... 171
ข-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำจากการทดลองที่ 4.1.2..... 172
ข-5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจากการทดลองที่ 4.1.2..... 173
ข-6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำจากการทดลองที่ 4.1.2..... 173

ตารางที่ หน้า

ข-7 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)..... 174
ข-8 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)..... 175
ข-9 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)..... 176
ข-10 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)..... 177
ข-11 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)..... 178
ข-12 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)..... 179
ข-13 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)..... 180
ข-14 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)..... 180
ข-15 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)..... 180
ข-16 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)..... 181
ข-17 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)..... 181
ข-18 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)..... 182
ข-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลองเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำและที่ระดับความหนาแน่นสูง..... 182
ข-20 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำและที่ระดับความหนาแน่นสูง..... 184

ตารางที่ หน้า

ค-1 สุ่มตัวอย่างตรวจวัดน้ำหนักและความสูงของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกในวันที่ 7 14 21 28 และ 45 จากการทดลอง 4.2.1…….. 185

ค-2 สุ่มตัวอย่างตรวจวัดน้ำหนักและความสูงของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผาในวันที่ 7 14 21 28 และ 45 จากการทดลอง 4.2.1…….. 185

ค-3 ค่าความเข้มแสงระหว่างการปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง……... 186

ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลองจากการทดลองที่ 4.3.1…….. 187

ง-2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 จากการทดลองที่ 4.3.1……. 188

ง-3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-2 จากการทดลองที่ 4.3.1……. 189

ง-4 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง……. 190

ง-5 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1……... 190

ง-6 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-2……... 190

ง-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2……. 191

ง-8 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2…….. 191

ง-9 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (ถังที่ 1)…… 192

ง-10 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (ถังที่ 2)…… 192

ง-11 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (ถังที่ 3)…… 192

ง-12 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (ถังที่ 1)…… 193

ง-13 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (ถังที่ 2)…… 193

ง-14 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (ถังที่ 3)…… 193

ตารางที่ หน้า

ง-15 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (ถังที่ 1)..... 194

ง-16 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (ถังที่ 2)..... 194

ง-17 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (ถังที่ 3)..... 194

ง-18 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง ชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2..... 195

ง-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2..... 195

ง-20 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)..... 196

ง-21 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)..... 197

ง-22 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)..... 197

ง-23 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)..... 198

ง-24 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)..... 199

ง-25 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)..... 199

ง-26 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)..... 200

ง-27 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)..... 201

ง-28 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)..... 201

ง-29 ค่าความเข้มแสงระหว่างการปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง..... 202

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบกลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละรูปแบบ.....	6
2.2	วัฏจักรการหมุนเวียนและเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	16
2.3	ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปและสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของบ่อเลี้ยงปลาระบบปิด.....	19
2.4	แนวคิดและระบบการเกษตรแบบผสมผสานหรืออะควาโปนิกส์.....	22
2.5	การหมุนเวียนสารอาหารและกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นในระบบอะควาโปนิกส์...	23
2.6	ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบภายในระบบอะควาโปนิกส์.....	24
2.7	วัฏจักรของไนโตรเจนในถังปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบมีตัวกลาง.....	26
2.8	การเปรียบเทียบลักษณะที่พืชได้รับธาตุอาหารจากการปลูกบนดินกับการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์.....	28
2.9	แสดงการปลูกพืชแบบให้รากลอยอยู่กลางอากาศ.....	30
2.10	แสดงการปลูกพืชในวัสดุปลูกแบบการให้สารละลายโดยการหยด.....	30
2.11	แสดงการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารโดยการไหลผ่านรากพืช.....	31
2.12	ปลานิล *Oreochromis niloticus* Linnaeus.....	35
2.13	ลักษณะส่วนประกอบของผักกวางตุ้ง (*Brassica pekinensis*).....	38
3.1	สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้.....	50
3.2	แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 1.....	52
3.3	แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 2.....	53
3.4	แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 3.....	54
3.5	ลักษณะของตัวกลางเม็ดดินเผาที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.6	ไดอะแกรมและภาพถ่ายแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในถังปลูกพืช.....	58
3.7	ต้นกล้าผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	58
3.8	การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงปลานิลระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนกลางแจ้ง.....	61
3.9	แสดงการตรวจวัดการเติบโตของปลานิลด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว.....	61

รูปที่		หน้า
3.10	การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการปลูกผักกวางตุ้งบนชั้นเม็ดดินเผาในโรงเรือน……..……..……..	63
3.11	แสดงการตรวจวัดการเติบโตของผักกวางตุ้งด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความสูง……..	63
3.12	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแต่ละชุดการทดลองในการทดลองช่วงที่ 3……..	64
4.1	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วันที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)……...	73
4.2	สภาพด่างในมวลน้ำของถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วัน ในถังการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……	78
4.3	สภาพการติดตั้งระบบและสีของน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……	80
4.4	แสดงสีของตัวอย่างน้ำและตะกอนแขวนลอยภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……..	81
4.5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 56 วัน ในการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……..……...	82
4.6	การเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ…….……	83
4.7	อัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในแต่ละวันของระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……..……..……	84
4.8	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรตะกอน (SV_{30}) ในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……..	85
4.9	ภาพถ่ายเปรียบเทียบการวัดปริมาตรตะกอนจากถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……	85
4.10	ภาพถ่ายปลานิลก่อนการทดลองและสิ้นสุดการทดลอง……...	86
4.11	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ ในแต่ละสัปดาห์ของการทดลอง……..	87
4.12	ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่ให้สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ……..	88

รูปที่		หน้า
4.13	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้งในถังที่ปลูกด้วยดินเพาะและในถังที่ปลูกบนเม็ดดินเผา ในแต่ละสัปดาห์ของการทดลอง……	98
4.14	ภาพถ่ายการเติบโตของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกและปลูกบนเม็ดดินเผาของผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน และสิ้นสุดการทดลอง 45 วัน…….	99
4.15	ปริมาณความเข้มแสงที่แตกต่างกันที่เวลา 13.00 น. ตลอดการทดลอง…….....	100
4.16	ภาพถ่ายภายในแต่ละถังของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2……...	107
4.17	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 35 วัน ของชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2……	109
4.18	การเปลี่ยนแปลงสภาพด่างในมวลน้ำของถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 35 วัน ของชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2…….....	113
4.19	การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยและปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 35 วัน ของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2……..	116
4.20	ลักษณะตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาตลอดการทดลอง 35 วัน…..	117
4.21	ภาพถ่ายเปรียบเทียบการตรวจวัดปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง ชุดควบคุม 1 และชุดควบคุม 2……	117
4.22	ภาพถ่ายขนาดที่เปลี่ยนแปลงของปลานิลก่อนการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ……	120
4.23	น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิล ของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2…….....	121
4.24	ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่ให้สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิลของชุดการทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2……..	122
4.25	ผักกวางตุ้งที่ทดลองขังน้ำไว้ในระดับที่รากจมน้ำตลอดเวลา……...	124
4.26	การเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดการทดลองระยะเวลา 35 วัน ด้านความสูงเฉลี่ยของต้น ความกว้างเฉลี่ยของใบ และความกว้างเฉลี่ยของทรงพุ่ม……...	125
4.27	แสดงการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง 35 วัน สำหรับการเริ่มดำเนินการ สิ้นสุดการทดลอง และการตรวจวัดความสูง……	126
4.28	การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พี (ORP) ในถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดระยะเวลา 35 วัน ของชุดการทดลอง และชุดควบคุม-2……...	127
4.29	ปริมาณความเข้มแสงที่แตกต่างกันของแต่ละวันตลอดการทดลอง 35 วัน……..	127

รูปที่ หน้า

ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย-ไนโตรเจน..... 159
ก-2 กราฟมาตรฐานไนไทรต์-ไนโตรเจน..... 160
ก-3 กราฟมาตรฐานไนเทรต-ไนโตรเจน..... 161
ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส..... 163

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยงในเชิงธุรกิจมากขึ้น เพื่อให้เพียงพอและรองรับความต้องการของตลาดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการจัดการบ่อเลี้ยงด้วยการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูง (Intensive Aquaculture System; IAS) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถเพิ่มผลผลิตได้สูงและมีความคุ้มทุน ซึ่งมีรายงานว่าสัดส่วนการเลี้ยงแบบดังกล่าวนี้คิดเป็นร้อยละ 85 ของระบบเลี้ยงทั้งหมด (ชลอ ลิ้มสุวรรณ, 2535) หลักการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบนี้คือ ให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปอย่างเพียงพอ มีการควบคุมคุณภาพน้ำและคุณภาพอาหารของสัตว์น้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยง นอกจากนี้ยังทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจากระบบบ่อเปิดที่มีการถ่ายน้ำที่ผ่านการใช้เลี้ยงสัตว์น้ำแล้วทิ้งออกนอกระบบเลี้ยงหรือทิ้งออกจากฟาร์ม มาเป็นการนำน้ำทิ้งบางส่วนหรือทั้งหมดมาผ่านการบำบัดให้มีคุณภาพดีแล้วหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (ระบบกึ่งปิดหรือระบบปิด) โดยการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดมีข้อดี คือ สามารถควบคุมผลผลิตได้ ป้องกันการติดโรค และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนรูปต่างๆ รวมทั้งฟอสฟอรัสซึ่งเกิดขึ้นจากเศษอาหารที่เหลือตกค้าง ของเสียสิ่งปฏิกูลจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการย่อยสลายโปรตีนจากซากสัตว์น้ำที่ตายไป โดยเฉพาะไนเทรตเมื่อสะสมอยู่ในระบบการเลี้ยงที่ระดับความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดความเป็นพิษกับสัตว์น้ำ จากรายงานของกลุ่มสถิติและสารสนเทศการประมง (2537) พบว่าหากถ่ายน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำได้ ดังนั้นในการประกอบกิจกรรมด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งที่ระบายออกจากบ่อเลี้ยง โดยควรยึดตามแนวทางและค่ามาตรฐานต่างๆ ที่อ้างอิงตามประกาศกระทรวง เรื่องการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547)

การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนในระบบปิด (Recirculating Aquaculture System; RAS) ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะเป็นวิธีที่ให้ผลผลิตสูงสุด ช่วยประหยัดน้ำ ลด

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปใช้ได้กับการเลี้ยงสัตว์น้ำทุกชนิด โดยเป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำหรือปล่อยน้ำทิ้ง แต่น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการขับถ่ายของเสียจากสัตว์น้ำและเศษอาหารที่เหลือภายในบ่อเลี้ยง ซึ่งมีการสะสมของปริมาณแอมโมเนียที่มีพิษต่อสัตว์น้ำและส่งผลเสียต่อคุณภาพน้ำในระบบ จะถูกบำบัดและผ่านการปรับสภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้นแล้วหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ โดยแนวทางในการบำบัดมีหลายวิธี ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปไม่ว่าจะเป็นการออกแบบระบบบำบัดด้วยเครื่องมือต่างๆ ทางกล ซึ่งปัญหาที่ตามมาก็คือต้นทุนในการเลี้ยงสัตว์น้ำสูงขึ้น หรือการใช้แนวทางการบำบัดคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยกระบวนการทางชีวภาพด้วยการใช้สิ่งมีชีวิตที่มีต้นทุนต่ำกว่า เช่น การใช้สาหร่าย พืชน้ำ และจุลินทรีย์ ซึ่งก็ล้วนมีประสิทธิภาพต่อการบำบัดคุณภาพน้ำให้ดีขึ้นก่อนนำน้ำหมุนเวียนกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยง จากแนวความคิดที่ว่าพืชสามารถนำธาตุอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำและตะกอนแขวนลอยไปใช้โดยการดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียและไนเทรตรวมถึงฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการเติบโตได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Aquaponics cultivation) ด้วยการนำน้ำและตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีสารประกอบไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักออกมาใช้ในการปลูกพืช เพื่อให้เกิดการย่อยสลายเป็นธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยกลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นการหมุนเวียนของเสียที่เกิดจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเพิ่มผลผลิตพืช ซึ่งเป็นแนวทางการแก้ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมตามแนวทฤษฎีเศรษฐกิจพอเพียงอย่างแท้จริง สำหรับประเด็นการวิจัยที่ให้ความสนใจจะเป็นการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยสะสมในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบความหนาแน่นต่ำและสูง เพื่อการหมุนเวียนตะกอนและน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความสมดุลกับการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนเพื่อเป็นธาตุอาหารที่จะถูกดูดซึมโดยพืชที่ปลูก ซึ่งเป็นการช่วยบำบัดของเสียไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนในระบบปิดอย่างมีประสิทธิภาพอีกแนวทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยภายในถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นต่ำและสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในสัตว์น้ำ ในพืชทดลอง และในตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำในระบบปิดด้วยการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในระดับทดลอง (Pilot scale) โดยทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตต่างๆ ของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) โดยเลี้ยงที่ 2 ระดับความหนาแน่น คือความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ในถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. (กว้าง x ยาว X สูง) ที่บรรจุน้ำจืด ไม่มีดินก้นถัง และตั้งอยู่ในโรงเรือน ให้อาหารปลาด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาด (โปรตีนร้อยละ 25) ซึ่งมีสารอินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ให้อาหารในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน

1.3.2 วัสดุตัวกลางที่ใช้รองรับน้ำและตะกอนแขวนลอยในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน คือ เม็ดดินเผา (Expanded clay) ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 8 - 16 มม.

1.3.3 พืชที่ใช้ศึกษาคือ ผักกวางตุ้ง (*Brassica pekinensis*) สายพันธุ์เนเธอร์แลนด์ซึ่งเจริญเติบโตเร็วและมีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 45 วัน โดยทดลองปลูกในถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.24 ม. และตั้งอยู่ในโรงเพาะชำที่แสงส่องผ่านได้

1.3.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต ฟอสเฟต พีเอช ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และปริมาณตะกอนแขวนลอย ฯลฯ ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA, WPCF, 2005)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการหมุนเวียนของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการปลูกพืชวงจรชีวิตสั้นที่สามารถใช้เป็นอาหารได้

1.4.2 เป็นการเพิ่มพูนความรู้เกี่ยวกับระบบอะควาโปนิกส์ในการบำบัดคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่ปัจจุบันมีอยู่อย่างจำกัด

1.4.3 เป็นแนวทางการเพิ่มผลผลิตของปลาและพืชเพื่อเป็นแหล่งอาหารในชุมชนตามแนวทฤษฎีเศรษฐกิจพอเพียง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ศักยภาพของผลผลิตสัตว์น้ำ

จากอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ มากมาย จนเป็นเหตุให้แหล่งน้ำธรรมชาติในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเข้าสู่ภาวะเสื่อมโทรม ซึ่งส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรประมง รวมทั้งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตและสังคมของชาวประมงอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการทรัพยากรประมงแบบผสมผสานเพื่อให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืนด้วยแนวทางการจัดการด้านสังคมที่มีต่อแหล่งน้ำ เพื่อช่วยลดผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติในบริเวณแหล่งน้ำและพื้นที่ใกล้เคียง

2.1.1 สถานภาพผลผลิตสัตว์น้ำ

จากการรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรปี 2552 ได้จำแนกผลผลิตทางการเกษตรออกเป็น 4 กลุ่มคือกลุ่มพืชไร่ กลุ่มพืชพลังงานทดแทน กลุ่มพืชสวน และกลุ่มปศุสัตว์และการประมง โดยพบว่าตลอดระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2548 - พ.ศ. 2552) กลุ่มผลผลิตทางการเกษตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยกลุ่มปศุสัตว์และการประมงเป็นหนึ่งในสี่ของผลผลิตหลักที่มีการส่งออกและสร้างรายได้ต่อประเทศในปริมาณที่สูง สำหรับปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์และการประมงของไทยในปี 2552 มีปริมาณ 363,246 ตัน คิดเป็นมูลค่า 86,330.58 ล้านบาท โดยมีสัดส่วนการส่งออกคิดเป็นมูลค่าร้อยละ 8.43 และประเทศไทยเป็นอันดับที่ 13 ของประเทศผู้ส่งออก เมื่อจำแนกตามประเภทผลิตภัณฑ์พบว่าปลาและผลิตภัณฑ์มีร้อยละการส่งออกเป็น 10.12 ส่วนกุ้งและผลิตภัณฑ์มีร้อยละการส่งออกเป็น 7.42 นั่นคือมีปริมาณการเพิ่มขึ้นจากปี 2551 ร้อยละ 2.29 และ 0.96 ตามลำดับ สำหรับในปี 2553 พบว่าปริมาณผลผลิตการเกษตรของโลกโดยรวมทรงตัวใกล้เคียงกับปี 2552 สืบเนื่องมาจากการเกิดวิกฤตเศรษฐกิจทั่วโลก และสินค้ากลุ่มปศุสัตว์และการประมงมีราคาค่อนข้างสูงส่งผลให้ผู้บริโภคอาจจะมีกำลังในการบริโภคน้อยลง ดังนั้นผู้ผลิตกลุ่มปศุสัตว์และการประมงจึงชะลอการขยายการผลิต สำหรับประเทศคู่ค้าที่นำเข้าสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของไทยสามลำดับแรกคือ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และจีน โดยปัจจุบันมีประเทศผู้ส่งออกสัตว์น้ำเพิ่มจำนวนมากขึ้นส่งผลต่อการแข่งขันทางการตลาดที่รุนแรง และในขณะเดียวกันประเทศผู้นำเข้าสินค้าที่สำคัญต่างมีมาตรการกีดกันทางการค้ารูปแบบต่างๆ ประเทศผู้ส่งออกทั้งหลายจึงต้องมีแนวทางการควบคุมผลผลิตให้มีคุณภาพและความยั่งยืนเป็นไป

ตามมาตรฐานที่ทางประเทศผู้นำเข้าสินค้ากำหนด ดังนั้นภาครัฐและเอกชนของไทยจึงต้องมีการปรับปรุงพัฒนาศักยภาพการแข่งขันที่สอดคล้องกับสถานการณ์ทางการค้าที่เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะการลดต้นทุนการผลิต ตลอดจนการพัฒนามาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

2.1.2 การควบคุมคุณภาพผลผลิตสินค้าสัตว์น้ำ

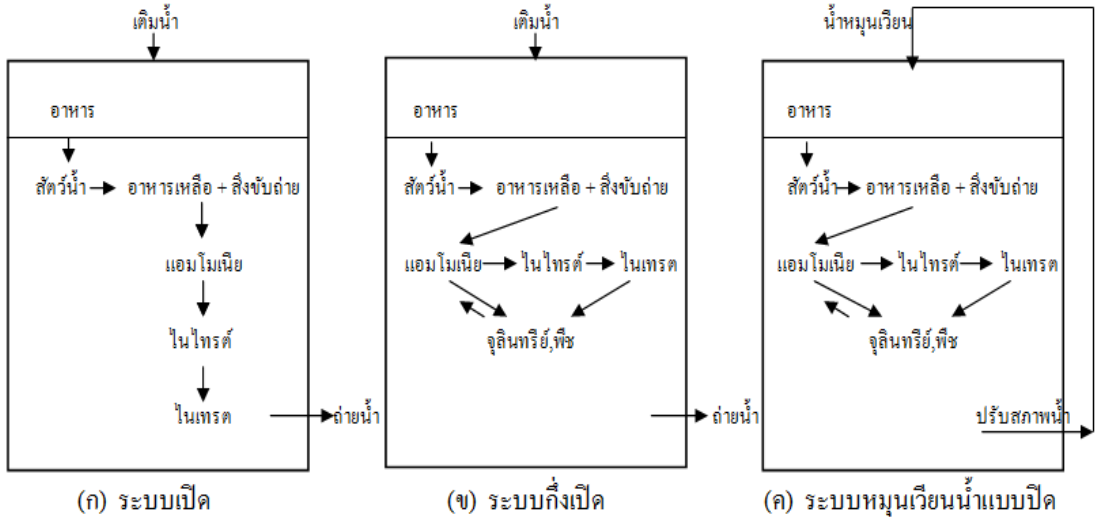
แม้ว่าสถานการณ์ด้านการส่งออกปศุสัตว์และการประมงของประเทศไทยจะยังคงต้องเผชิญกับปัญหาต่างๆ เช่น ข้อกีดกันทางการค้าของประเทศผู้นำเข้าเกี่ยวกับมาตรฐานสินค้า การพบสารตกค้าง ปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้น รวมทั้งปัญหาภาวะเศรษฐกิจถดถอยของประเทศผู้นำเข้าที่สำคัญ แต่เนื่องจากสินค้าปศุสัตว์และการประมงของไทยเป็นสินค้าที่มีคุณภาพและมีความปลอดภัยในการบริโภคสูง จากเหตุผลที่ภาครัฐโดยเฉพาะกรมประมงได้พยายามควบคุมให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่ระบบการตรวจสอบย้อนกลับจนถึงระดับแหล่งเพาะเลี้ยงให้มากที่สุด และประกอบกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสำเร็จรูปของไทยมีกระบวนการผลิตที่ทันสมัยได้รับการรับรองมาตรฐานการผลิตทั้งในประเทศและต่างประเทศ ผลิตภัณฑ์จึงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ทำให้ประเทศไทยสามารถส่งสินค้าให้แก่ประเทศคู่ค้าได้ทันต่อความต้องการเนื่องจากมีวัตถุดิบในการผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปี

สำหรับเขตการค้าเสรี (FTA) เป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มมูลค่าการส่งออกผลผลิตโดยการจัดทำความตกลงระหว่างประเทศที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดอุปสรรคทางการค้าโดยอยู่ในรูปแบบของการรวมกลุ่มทางเศรษฐกิจ (Economic integration) รวมทั้งการลดภาษีขาเข้ากับประเทศคู่เจรจา โดยสินค้าประมงเป็นอีกหนึ่งประเภทสินค้าที่ได้รับประโยชน์จากการเปิดเสรีทางการค้าทำให้มีมูลค่าการส่งออกที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามภาครัฐควรมีมาตรการในการสนับสนุนทางด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการประมง รวมทั้งการพัฒนาระบบบริหารจัดการให้มากขึ้น เช่น ระบบฟาร์ม การกำหนดมาตรฐานด้านสุขอนามัย ระบบการขนส่ง และการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์จากแหล่งเลี้ยงจนถึงกระบวนการของการส่งออกผลผลิต รวมทั้งการควบคุมระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบชีวนิเวศน์ที่ไม่มีการปล่อยมลพิษจากระบบเลี้ยงออกสู่สิ่งแวดล้อมให้เป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น (นิวัติ สุธีมีชัยกุล, 2551)

2.2 ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนารูปแบบการเลี้ยงในเชิงธุรกิจมากขึ้น เพื่อรองรับความต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ

จะเห็นได้ว่าปัจจุบันอุตสาหกรรมปศุสัตว์และการประมงสร้างรายได้จากการส่งออกผลผลิตในระดับสูง จึงเกิดการพัฒนารูปแบบของระบบการเลี้ยงจากอดีตจนถึงปัจจุบันโดยการจัดการบ่อเลี้ยงด้วยการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบความหนาแน่นสูง (Intensive Aquaculture System; IAS) ที่ให้ผลผลิตสูงและมีความคุ้มทุนรวมทั้งมีคุณภาพของผลผลิตที่ดีขึ้น ซึ่ง Hart และ Sullivan (1993) ได้แบ่งระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำออกเป็น 3 รูปแบบ คือ ระบบเปิด ระบบกึ่งเปิด และระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด โดยทั้งสามรูปแบบมีกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบแตกต่างกัน รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบกลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละรูปแบบ

2.2.1 ระบบเปิด (Open systems)

เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิม โดยน้ำที่ใช้สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำมาจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยตรงหรืออาจผ่านกระบวนการกรองอย่างง่าย จากนั้นจึงนำน้ำเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อน้ำผ่านระบบการเลี้ยงแล้วจะถูกปล่อยทิ้งคืนสู่ธรรมชาติโดยตรงอีกครั้งในบริเวณที่ห่างจากจุดนำน้ำเข้า หรืออาจจะให้น้ำผ่านบ่อพักเพื่อให้เกิดการบำบัดด้วยกระบวนการตามธรรมชาติเพื่อให้น้ำนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่มีการนำน้ำนั้นกลับเข้าสู่ระบบเลี้ยงใหม่ แต่ใช้การเปลี่ยนถ่ายน้ำอย่างเต็มที่ ดังนั้นการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิดจึงต้องมีแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีคุณภาพน้ำที่เหมาะสมตลอดเวลา ถ้าหากบางช่วงเวลาคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมจะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหาทำได้เพียงการเลือกสถานที่สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำที่เหมาะสม มีคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงที่คงที่ตลอดปี จะเห็นได้ว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบเปิดส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมสูงจากการปล่อยของเสียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด และอาจก่อให้เกิดโรคระบาดในสัตว์น้ำที่เกิดจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำในแต่ละครั้ง

2.2.2 ระบบกึ่งเปิด (Semi - Open systems)

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำประเภทนี้เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการลดปริมาณการเปลี่ยนถ่ายน้ำให้น้อยลง หรือมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำของบางช่วงเวลา ซึ่งช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นสูงกว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบเปิดในเรื่องของการให้อาหารสัตว์น้ำเข้าระบบเลี้ยง ความสามารถในการเปิดและปิดระบบเมื่อคุณภาพน้ำภายนอกเหมาะสมและไม่เหมาะสม การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบนี้ต้องมีความใส่ใจในทุกขั้นตอนของการจัดการทั้งคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยง ความสะอาดและอื่นๆ ซึ่งระบบการเลี้ยงแบบกึ่งเปิดส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมน้อยว่าระบบเปิดเนื่องจากมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำที่น้อยกว่า

2.2.3 ระบบหมุนเวียนน้ำหรือระบบปิด (Closed or Recirculating system)

ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาการปล่อยน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงออกสู่สิ่งแวดล้อม ระบบดังกล่าวจึงเป็นระบบที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำออกจากระบบ ดังนั้นปัจจัยของคุณภาพน้ำจึงเป็นตัวกำหนดคุณภาพสัตว์น้ำในระบบ จากการที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำออกจากระบบจึงเกิดการสะสมของปริมาณเศษอาหารที่เหลือจากการกินและสิ่งขับถ่ายที่ออกมาจากสัตว์น้ำ เป็นสาเหตุของการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำ ส่งผลกระทบให้ระบบเลี้ยงขาดออกซิเจนจนเข้าสู่ภาวะที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ นอกจากนี้การที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำออกจากระบบทำให้เมื่อสัตว์น้ำเกิดโรคจะมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นปัจจัยของปริมาณสารอาหารที่ละลายในน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (ธีรพงษ์ จรัญญากรณ์, 2545) โดยของเสียที่เกิดขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่คือ ของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3^-) ไนไทรต์ (NO_2^-) และไนเทรต (NO_3^-) การเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจึงต้องมีการปรับสภาพน้ำที่ใช้แล้วในบ่อเลี้ยงโดยผ่านระบบบำบัดเพื่อลดปริมาณของเสียทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น จากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการลดปริมาณการปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Closed Recirculation Aquaculture System; CRAS) สามารถจำแนกออกได้เป็นสามรูปแบบ คือ ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือน ระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง และระบบบ่อดินกลางแจ้ง (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยพบว่าแนวทางการปรับปรุงสภาพน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นระบบการกรองทางชีวภาพ เช่น ระบบโปรยกรอง (Tricking filter) ระบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed) ระบบตัวกรองหมุน (Rotating media filter) เป็นต้น (Lawson, 1995) ส่วนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งอาศัยการทำงานของแบคทีเรียช่วยในการเปลี่ยนของเสียแอมโมเนียและไนไทรต์ให้เป็นไนเทรตที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า

แอมโมเนีย (ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ, 2541) แต่หากเกิดการสะสมไนเทรตเป็นเวลานานโดยไม่มีการบำบัดอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำได้ โดยทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีไนเทรตสะสมสูงกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. (Lee และคณะ, 2000)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การจัดการคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ไม่ดีสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพ อัตราการเติบโต การเกิดโรคจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำและอาจเป็นสาเหตุทำให้สัตว์น้ำตายได้ โดยปัจจัยทางคุณภาพน้ำที่มีความสำคัญในการเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่

2.3.1 แอมโมเนีย (Ammonia)

เนื่องจากอาหารสัตว์น้ำส่วนใหญ่มีปริมาณไนโตรเจนสูง และไนโตรเจนที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมาอยู่ในรูปแอมโมเนีย การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่นจะมีการสะสมของแอมโมเนียในปริมาณที่สูง โดยปริมาณแอมโมเนียเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ขึ้นอยู่กับแอมโมเนียนั้นอยู่ในรูปแบบใด (ธีรพงษ์ จรัญญากรณ์, 2545) Timmons และคณะ (2002) ได้จำแนกแอมโมเนียที่พบในน้ำเป็นสองรูปแบบ คือ แอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ โดยแอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมอิออน เมื่อพีเอชและอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นอัตราส่วนของแอมโมเนียจะสูงขึ้น ส่งผลให้มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของพีเอชและอุณหภูมิ พบว่าพีเอชมีอิทธิพลต่อแอมโมเนียในน้ำมากกว่าอุณหภูมิ (Spotte, 1979) โดยมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปมาของแอมโมเนียดังสมการ

$$\text{(Low pH)} \qquad NH_4^+ + OH^- \longleftrightarrow NH_3 + H_2O \qquad \text{(High pH)}$$

วิรัช จิ๋วแหยม (2544) รายงานว่าน้ำจืดโดยทั่วไปมีค่าพีเอชระหว่าง 6.5 - 7.5 ขณะที่แหล่งน้ำเค็มมีพีเอชระหว่าง 7.8 - 8.5 ดังนั้นสัตว์น้ำเค็มจึงมีความเสี่ยงต่อพิษแอมโมเนียสูงกว่าสัตว์น้ำจืด และเนื่องจากความเป็นพิษของแอมโมเนียมีความสัมพันธ์กับสภาพด่าง (Alkalinity) ของน้ำด้วย (Bitton, 1994) นอกจากนี้การให้อาหารสัตว์น้ำปริมาณมากเกินไปในการเลี้ยงแบบหนาแน่นมีสาเหตุให้แอมโมเนียสูงขึ้น (Hart และ O'sullivan, 1993) โดยจากรายงานของ Avnimelech และ Rityo (2003) พบว่าโปรตีนร้อยละ 25 - 30 ในอาหารสัตว์น้ำถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย ซึ่งในน้ำที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงจะมีผลต่อการสะสมแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ ส่งผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีในตัวสัตว์น้ำทำให้มีความต้องการออกซิเจนมากขึ้น นอกจากนี้แอมโมเนีย

จะทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจน ส่งผลให้สัตว์น้ำอ่อนแอและติดโรคง่าย (ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล, 2547) ส่วน Liao และ Mayo (1972) รายงานถึงระดับของแอมโมเนียที่มีผลกระทบต่อการเลี้ยงปลาโดยเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นมากกว่า 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลให้ปลาอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย แต่จากรายงานของมั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2536) พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียเพียง 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. ก็สามารถส่งผลต่อการเติบโตของปลาได้

2.3.2 ไนไทรต์ (Nitrite)

โดยทั่วไปปริมาณไนไทรต์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะไม่สูงเพราะไนไทรต์ไม่คงตัว มักพบอยู่ในรูปไนเทรต แต่หากในระบบมีปริมาณแอมโมเนียสูงจะมีโอกาสเกิดการสะสมของปริมาณไนไทรต์ได้ (ธีรพงษ์ จรัญญากรณ์, 2545) สำหรับความเป็นพิษของไนไทรต์ต่อสัตว์น้ำมักเกิดจากไนไทรต์ไปออกซิไดซ์เหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) เกิดเป็นเมทธีโมโกลบิน (Methemoglobin) ทำให้เลือดไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ จนเกิดสภาพที่เลือดมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปกติ (Hypoxia or Brown blood disease) สัตว์น้ำจึงตายจากการขาดออกซิเจน โดยทั่วไปความเป็นพิษของไนไทรต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนต่ำและอุณหภูมิสูง มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2539) รายงานว่าปริมาณไนไทรต์ที่สูงเกิน 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะเป็นอันตรายต่อปลา และระดับความเข้มข้นของไนไทรต์ที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ คือ ไม่ควรเกิน 0.3599 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ที่พบว่าความเข้มข้นของไนไทรต์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำจืดมีค่าไม่เกิน 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับการลดความเป็นพิษของไนไทรต์อาจทำได้หลายแนวทาง เช่น การเติมแคลเซียมและคลอไรด์ หรือการใช้วิธีการทางกายภาพ เช่น การเติมอากาศหรือการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ซึ่งแนวทางเหล่านี้จะส่งผลให้ไนไทรต์ก่อปัญหากับระบบลดลง นอกจากนี้ ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล (2547) ยังรายงานไว้ว่าหากมีการควบคุมค่าพีเอชของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้อยู่ในช่วง 7.5 - 8.5 จะสามารถป้องกันปัญหาความเป็นพิษของไนไทรต์ได้

2.3.3 ไนเทรต (Nitrate)

เนื่องจากไนเทรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรที่สุด และมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไทรต์ การบำบัดคุณภาพน้ำในการเลี้ยงสัตว์น้ำจึงอาศัยการเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในรูปไนเทรต ซึ่งไนเทรตปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ แต่ถ้ามีการสะสมของไนเทรตปริมาณสูงมากจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัตว์น้ำ ซึ่งในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะควบคุมระดับความเข้มข้นของไนเทรตไม่ให้เกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. (Whiston และคณะ, 1994) ในรายงานของ

Hart และ O'sullivan (1993) แนะนำไว้ว่าระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเทรตเกิน 100 มก.-ไนโตรเจน/ล. ส่วนในรายงานของ Gutierrez-Wing และ Malone (2006) พบว่าในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีสภาวะออกซิเจนสูงจะมีการสะสมของไนเทรตในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ทำให้เกิดความเครียดในสัตว์น้ำ อัตราการบริโภคของสัตว์น้ำต่ำ สัตว์น้ำอ่อนแอ และอัตราการเจริญพันธุ์ลดลง โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไนเทรตสูงมากกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบเลี้ยง และที่ระดับความเข้มข้นของไนเทรต 30 มก.-ไนโตรเจน/ล. มีโอกาสทำให้เกิดโรคจุดขาวในสัตว์น้ำ ส่วนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีสภาวะไร้อากาศไนเทรตจะถูกเปลี่ยนกลับเป็นไนไทรต์โดยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ (Wheaton, 1997 อ้างถึงใน มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551) นอกจากนี้ Zweig และคณะ (1999) ได้รายงานว่าเมื่อไนเทรตเกิดการสะสมจนถึงระดับหนึ่งจะมีผลต่อการขนส่งออกซิเจนและเป็นพิษต่อตับปลา ซึ่งระดับความเข้มข้นของไนเทรตที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์น้ำมีค่าต่ำกว่า 23 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ความเข้มข้นของไนเทรตที่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต้องต่ำกว่า 11 มก.-ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ในรายงานของ ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์ (2544) พบว่าปริมาณไนเทรตที่เป็นพิษต่อปลามีระดับความเข้มข้นมากกว่า 181 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ที่ระดับความเข้มข้นของไนเทรต 69 มก.-ไนโตรเจน/ล. เป็นสาเหตุทำให้ปลาติดโรคได้ง่าย

2.3.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลทั้งทางตรงและทางอ้อมในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นสัตว์เลือดเย็น เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในร่างกายสัตว์น้ำ โดยส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเมทาบอลิซึมในร่างกาย (ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ, 2528) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ เช่น ทำให้ระบบควบคุมการขับถ่ายน้ำและแร่ธาตุภายในผิดปกติ ทำให้ร่างกายอ่อนแอและตาย นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของน้ำด้านอื่นๆ เช่น ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะลดลง และที่สภาวะอุณหภูมิสูงช่วยเร่งการดูดซึมสารพิษที่ละลายในน้ำเข้าสู่ร่างกายของสัตว์น้ำได้รวดเร็วขึ้น (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537) โดยชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชกูล (2547) ได้รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีค่าอยู่ในช่วง 27 – 30 °ซ. ส่วน Chanratchakool และคณะ (1995) พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 °ซ. และสูงกว่า 33 °ซ. สัตว์น้ำทุกชนิดที่เลี้ยงในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะบริโภคอาหารได้ลดลง

2.3.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม ในทางปฏิบัติการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำต่ำกว่า 3 มก./ล. ถึงแม้การขาดออกซิเจนจะไม่ทำให้สัตว์น้ำตาย แต่มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิต เช่น อัตราการฟักไข่ต่ำลง ตัวอ่อนไม่แข็งแรงและผิดปกติ ประสิทธิภาพการย่อยอาหารลดลง (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537) ส่วน Lawson (1995) แนะนำว่าในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5 - 6 มก./ล. ซึ่งความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเค็ม โดยน้ำที่มีความเค็มและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยลง นอกจากนี้ถ้าในน้ำมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดสภาวะไร้อากาศ แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนจะเจริญเติบโตและผลิตแก๊สมีเทน (CH_4) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (วิลาสินี ไตรยราช, 2546) ซึ่งผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีผลต่อสัตว์น้ำดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อกุ้งและปลาในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (Boyd, 1998 อ้างถึงใน มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
0.3 - 1.0	สามารถเสียชีวิตเมื่อสัมผัสเป็นเวลานาน
1.0 - 1.5	สามารถดำรงชีวิตได้ แต่เติบโตช้าและการสืบพันธุ์ผิดปกติถ้าอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
สูงกว่า 5	เหมาะสมต่อการเติบโต

2.3.6 ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนในน้ำ สามารถแสดงได้ด้วยค่าของ $-\log_{10}[H^+]$ (Boyd, 1998) โดยพีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปส่งผลให้ปลาเกิดอาการเครียดและมีผลโดยตรงต่อการเจริญของปลา (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) โดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ระหว่าง 7.8 - 8.5 (Hart และ O'sullivan, 1993) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะทำให้สารพิษชนิดอื่นๆ เกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลง เช่น เมื่อค่าพีเอชสูงทำให้พิษของแอมโมเนียเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพีเอชต่ำจะทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นพิษมากขึ้น (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537) ซึ่ง วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เดี่ยววาณิชย์ (2535) ได้สรุปผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการเติบโตของสัตว์น้ำไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระดับความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
น้อยกว่า 5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว
ระหว่าง 5 - 7	การเติบโตลดลง กินอาหารลดลง หรืออาจตายได้ถ้าอยู่ในสภาพนี้นานๆ
ระหว่าง 7.5 - 8.5	เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ
ระหว่าง 8.5 - 10.5	การเติบโตลดลง กินอาหารลดลง หรืออาจตายได้ถ้าอยู่ในสภาพนี้นานๆ
มากกว่า 10.5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว

2.3.7 สภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างของน้ำ คือความสามารถของน้ำในการรับไฮโดรเจนอิออนเพื่อให้กรดอยู่ในสภาวะเป็นกลาง สารประกอบที่ทำให้เกิดสภาพด่างมี 3 ชนิด ได้แก่ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) โดยสภาพด่างในน้ำสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ด้วยระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) ดังสมการที่ 1 และ 2

$$HCO_3^- \xleftrightarrow{OH^-} CO_3^{2-} + H_2O \qquad (1)$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \xrightarrow{H^+} 2\,OH^- + CO_2^- \qquad (2)$$

ดังนั้นสภาพด่างจึงมีความจำเป็นต่อระบบเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดในการช่วยรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ โดย Hart และ O'sullivan (1993) รายงานว่าสภาพด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.

2.3.8 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสที่มักพบในแหล่งน้ำธรรมชาติเกิดจากการแตกตัวเป็นอิออนของกรดออร์โธฟอสเฟต (H_3PO_4) ดังสมการที่ 3 ถึง 5

$$H_3PO_4 \longrightarrow H^+ + H_2PO_4^- \qquad (3)$$

$$H_2PO_4^- \longrightarrow H^+ + HPO_4^{2-} \qquad (4)$$

$$HPO_4^{2-} \longrightarrow H^+ + PO_4^{3-} \qquad (5)$$

รูปของฟอสฟอรัสที่พบมักเปลี่ยนไปตามค่าพีเอชของน้ำ โดยในน้ำตามธรรมชาติมีพบ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2 – 7 มักพบ $H_2PO_4^-$ เป็นหลัก แต่ถ้าพีเอชของน้ำอยู่ระหว่าง 7 – 12 จะพบฟอสฟอรัสในรูปของ HPO_4^{2-} เป็นหลัก (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2536) ซึ่งปริมาณของฟอฟอรัสที่พบในน้ำมีปริมาณไม่มากนัก แต่เป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อผลผลิตของสัตว์น้ำ โดยฟอสฟอรัสสามารถพบได้ทั้งในรูป

สารละลายและอนุภาคแขวนลอย ซึ่งฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำอยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสมักเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในขณะที่สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต โดยแบคทีเรียในน้ำสามารถย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตในรูปสารละลายหรือตะกอนแขวนลอยให้เป็นออร์โธฟอสเฟต สำหรับปริมาณออร์โธฟอสเฟตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. ถ้าในน้ำมีปริมาณออร์โธฟอสเฟตน้อยควรเติมปุ๋ยลงในน้ำเพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2536) นอกจากนี้บริเวณก้นบ่อที่อยู่ในสภาวะมีออกซิเจน (Aerobic) สารประกอบฟอสเฟตต่างๆ ละลายน้ำได้น้อย แต่ถ้าเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic) ฟอสเฟตจำนวนมากจะถูกปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำ ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

2.3.9 อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid matter)

เนื่องจากในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปมีการให้อาหารสำหรับการบริโภคของสัตว์น้ำในปริมาณมากเกินพอ จึงส่งผลให้เกิดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่เกิดจากการรวมตัวของสารต่างๆ ในแหล่งน้ำ เช่น อาหารที่เหลือตกค้าง สิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำ รวมทั้งเซลล์ของแบคทีเรีย จากข้อมูลของ ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์ (2552) กล่าวว่าการให้อาหารสัตว์น้ำในระบบส่วนหนึ่งจะถูกสัตว์น้ำบริโภคและขับถ่ายออกมาประมาณร้อยละ 80 – 90 ของปริมาณอาหารที่บริโภคทั้งหมด ทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลว และในรูปของก๊าซ ขณะที่อาหารส่วนที่เหลือกลายเป็นของเสีย โดยทั่วไปการประมาณปริมาตรของแข็งแขวนลอยทั้งหมดคิดจากร้อยละ 25 ของปริมาณอาหารที่ให้ในระบบ (คิดเป็นน้ำหนักแห้ง) ส่วนรายงานของ Timmons และคณะ (2002) กล่าวว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก./ล. เนื่องจากส่งผลให้ระบบต้องการออกซิเจนมากขึ้น รวมทั้งบดบังการหาอาหารของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามปริมาณการกักเก็บสารอาหารของสัตว์น้ำแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันและสภาวะการเลี้ยงในแต่ละแห่ง ดังตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกกักเก็บและปล่อยออกมาโดยสัตว์น้ำชนิดต่างๆ นั่นคือไนโตรเจนในรูปอนุภาคของแข็งอยู่ระหว่างร้อยละ 5.4 - -35 ของปริมาณไนโตรเจนที่มีในอาหาร ส่วนฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอนุภาคของแข็งอยู่ระหว่างร้อยละ 15 – 70 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่มีในอาหารสัตว์น้ำ (Piedrahita, 2003) นอกจากนี้การศึกษาของ Timmons และคณะ (2002) พบว่าประมาณร้อยละ 97 ของอาหารที่เหลืออยู่จะถูกย่อยสลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 60 ไมโครเมตร และอีกประมาณร้อยละ 73 เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มม. ซึ่งระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำจะพบอนุภาคขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตรมากที่สุด สำหรับกระบวนการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่ใช้ประยุกต์ร่วมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่ การ

แยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation) การแยกด้วยระบบกรอง (Filtration) และการแยกด้วยกระบวนการลอยตัว (Floatation) (Timmons และคณะ, 2002)

ตารางที่ 2.3 อัตราการกักเก็บและอัตราการปล่อยสารอาหารของสัตว์น้ำชนิดต่างๆ โดยคิดจากร้อยละของสารอาหารที่มีในอาหารสัตว์น้ำ (Piedrahita, 2003)

ปริมาณที่ถูกกักเก็บ		ปริมาณที่ถูกปล่อยในรูปของแข็ง		ปริมาณที่ถูกปล่อยในรูปสารละลาย		ชนิดสัตว์น้ำ	เอกสารอ้างอิง
%N	%P	%N	%P	%N	%P		
49	36	14	55	37	9	ปลาแซลมอน	Johnsen และคณะ ,1993 ; Berggheim และ Asgard, 1996
10	40	35	15	55	45	ปลากระพง	Lemarie และคณะ, 1998
25	30	15	70	60	0	ปลาเทร้าท์สายรุ้ง	Hakanson, 1998 ; Pillay, 1992
22	18.8	5.4	22	72	62	ปลานิลพันธุ์ผสม	Siddiqui และ Al-Harbi, 1999

2.4 ประเภทของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำมีการเปลี่ยนรูปได้หลายรูปแบบ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตและปัจจัยสภาวะแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วไปพบว่ารูปของสารประกอบไนโตรเจนที่มีความสำคัญต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

2.4.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compounds)

สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน หมายถึง สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์พืชและสัตว์ และยังรวมถึงสิ่งขับถ่ายจากสัตว์และสารจากการย่อยสลายสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน กรดยูริก และยูเรีย เป็นต้น

2.4.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds)

สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน หมายถึง ไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในรูปแอมโมเนียหรือสารประกอบแอมโมเนีย ซึ่งจะพบในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมอิออนที่เกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนจากสารอินทรีย์และจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำในรูปแอมโมเนียเป็นสารอนินทรีย์

2.4.3 สารประกอบไนไทรต์ (Nitrite-nitrogen compounds)

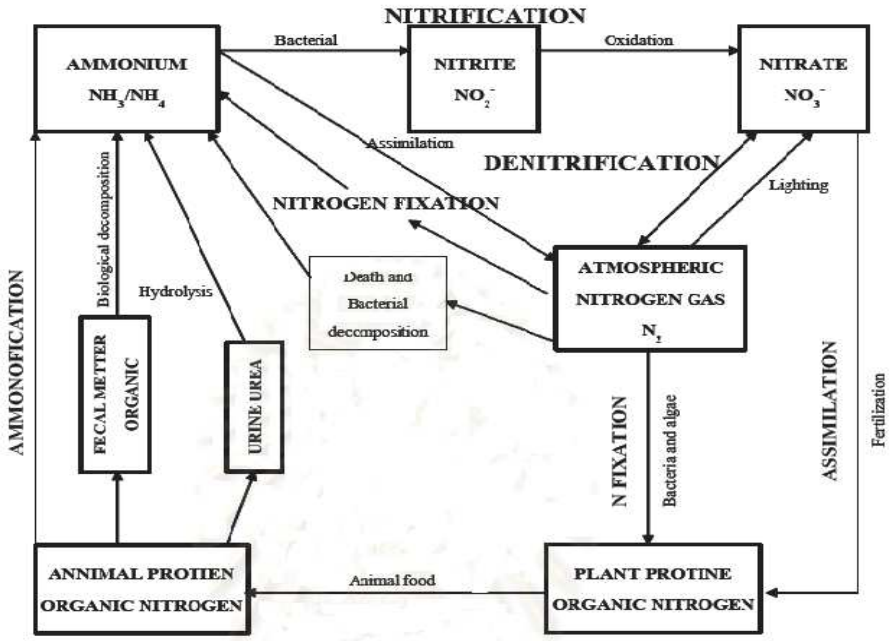
สารประกอบไนไทรต์ หมายถึง สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนไทรต์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกระบวนการไนทริฟิเคชันจากแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในน้ำและดิน

2.4.4 สารประกอบไนเทรต (Nitrate-nitrogen compounds)

สารประกอบไนเทรต หมายถึง สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนเทรตซึ่งเกิดจากกระบวนการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่นในกระบวนการไนทริฟิเคชัน และถ้าอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนปริมาณมากเกินพอ สารประกอบไนเทรตจะเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เสถียรที่สุด นอกจากนี้ยังเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืชน้ำและสาหร่าย

2.5 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

การบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในแหล่งน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านหลายกระบวนการได้แก่ กระบวนการดูดซึม กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันที่อาศัยการทำงานของพืช แบคทีเรีย เชื้อรา และแบคทีเรียเส้นใยบางกลุ่ม ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือแอมโมเนียมอิออน ซึ่งเป็นแอมโมเนียอิสระที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมาก ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณแอมโมเนียสูงเกินไปสัตว์น้ำจะไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือด ส่งผลให้เป็นอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันในสภาวะที่มีการเติมอากาศโดยแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิง (Nitrifying bacteria) ซึ่งสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไทรต์และไนเทรต ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันโดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริไฟอิง (Denitrifying bacteria) ไนเทรตที่เกิดขึ้นจะลดรูปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ในสภาวะไร้อากาศหรือสภาวะแอน็อกซิก (Anoxic condition) ซึ่งเป็นการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนที่สมบูรณ์ โดยวัฏจักรการหมุนเวียนและเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วัฏจักรการหมุนเวียนและเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (ดัดแปลงจาก วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

2.5.1 กระบวนการดูดซึม (Assimilation)

เป็นกระบวนการที่แอมโมเนียมถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะมิโนเพื่อสร้างโปรตีนหรือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งจากกิจกรรมของพืชเองและกิจกรรมของจุลินทรีย์ อาทิเช่น *Escherichia coli, Synechocystis* sp., *Aspergillus nidulans*, *Candida utilis* เป็นต้น โดยโปรตีนหลักที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาได้แก่ กลูตาเมต อะลานีน และแอสปาร์เทส ส่วนเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญ ได้แก่ Glutamate dehydrogenase (GDH), Glutamate synthetase (GS) และ NADPH-dependent glutamine 2-oxoglutarate amidotransferase (GOGAT) (Alexander, 1977) ซึ่งไนเทรตก็สามารถถูกตรึงเป็นสารอินทรีย์ได้เช่นกันเรียกว่า ไนเทรตรีดักชัน (Nitrate reduction) โดยไนเทรตจะถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนียมก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นพืชหรือจุลินทรีย์จึงใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมเป็นอันดับแรกในการเติบโตและสังเคราะห์เซลล์ สำหรับกระบวนการที่ตรงข้ามกับการดูดซับแอมโมเนียม (Ammonium assimilation) ได้แก่การปลดปล่อยแอมโมเนียจากเซลล์ที่ตายเรียกว่า แอมโมนิฟิเคชัน หรือแอมโมเนียมมิเนอรัลไลเซชัน (Ammonium mineralization) โดยกระบวนการทั้งสองเกิดได้ทั้งในสภาวะมีและไม่มีอากาศ (วีรนุช หลาง, 2551)

2.5.2 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งเรียกว่า ไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen mineralization) แบคทีเรียที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ซึ่งสามารถพบในบริเวณชั้นน้ำและดินตะกอนบริเวณก้นบ่อ โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดได้ในสภาวะมีอากาศและสภาวะไร้อากาศ แต่สารอินทรีย์และแบคทีเรียมักพบได้มากบริเวณดินตะกอน การเกิดแอมโมเนียส่วนใหญ่จึงเกิดที่ชั้นผิวดินตะกอนใต้น้ำ ในส่วนแอมโมเนียที่เกิดในชั้นน้ำจะถูกพืชดูดซึมเป็นอาหาร บางส่วนถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งการใช้แอมโมเนียทั้งสองรูปแบบเกิดได้ดีในน้ำที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงพบการสะสมของแอมโมเนียในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จากรายงานของ Bitton (1994) พบว่าเมื่อพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น แอมโมเนียมจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนีย ซึ่งมีบางส่วนปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ส่วนรายงานของ ชลอ ลิ้มสุวรรณ (2535) พบว่ากระบวนการแอมโมนิฟิเคชันในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากการให้อาหาร จึงจำเป็นต้องมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 4 มก./ล.

2.5.3 กระบวนการไนทริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันที่มีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำให้เป็นไนเทรต (Verstraete และ Alexander, 1972) โดยอาศัยการทำงานของออโตโทรฟ (Autotroph) 2 กลุ่มที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนในสองกระบวนการย่อย ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นกระบวนการไนไทร์ทริฟิเคชัน (Nitritification) ที่อาศัยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียมออกซิไดซ์ซิงค์ (Ammonium oxidizing bacteria; AOB) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียมเป็นไนไทรต์ ดังสมการที่ 6 และ 7 ซึ่งผลจากกระบวนการที่เกิดขึ้นส่งผลให้มีการสะสมไฮโดรเจนอิออนจึงต้องเติมสารละลายด่างเพื่อควบคุมค่าพีเอชในระบบ ส่วนในขั้นตอนที่สองเป็นกระบวนการไนเทรทริฟิเคชัน (Nitratification) ที่อาศัยแบคทีเรียกลุ่มไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงค์ (Nitrite oxidizing bacteria; NOB) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไทรต์เป็นไนเทรต ดังสมการที่ 8 โดยทั้งสองขั้นตอนเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจน (Focht และ Verstraete, 1977) จากรายงานของ US. EPA. (1975) ได้แนะนำว่าตามทฤษฎีควรมีปริมาณออกซิเจนประมาณ 4.6 มก./ล. ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียม 1 มก./ล. ให้กลายเป็นไนเทรต

$$2\,NH_4^+ + O_2 \longrightarrow 2\,NH_2OH + 2\,H^+ \quad (6)$$

$$80.7\,NH_4^+ + 114.55\,O_2 + 160.4\,HCO_3^- \xrightarrow{AOB} C_5H_7O_2N + 79.7\,NO_2^- + 82.7\,H_2O + 155.44\,H_2CO_3 \quad (7)$$

$$134.5\,NO_2^- + NH_4^+ + 4\,H_2CO_3 + HCO_3^- + 62.25\,O_2 \xrightarrow{NOB} C_5H_7O_2N + 134.5\,NO_3^- + 3\,H_2O \quad (8)$$

ถ้าให้ผลผลิต (Yield) ของ Ammonium oxidizing bacteria และ Nitrite oxidizing bacteria มีค่าประมาณ 0.1 ก.-วีเอสเอส/ก.-แอมโมเนียม-ไนโตรเจน และ 0.06 ก.-วีเอสเอส/ก.-ไนไทรต์-ไนโตรเจน ตามลำดับ โดยสามารถแสดงปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่รวมการเติบโตได้ดังสมการที่ 9

$$NH_4^+ + 1.86\ O_2 + 1.98\ HCO_3^- \longrightarrow 0.021\ C_5H_7O_2N + 0.98\ NO_3^- + 1.04\ H_2O + 1.88\ H_2CO_3 \qquad (9)$$

จากปฏิกิริยาแสดงว่าการบำบัดแอมโมเนีย 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ต้องการสภาพด่างและออกซิเจน 7.07 และ 4.25 มก./ล. ตามลำดับ ถ้าหากคิดเฉพาะแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์โดยไม่มีการสร้างเซลล์ปริมาณออกซิเจนและสภาพด่างที่ต้องการจะมีค่าประมาณ 4.57 และ 7.14 มก./ล. (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.5.4 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตให้อยู่ในรูปแก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอื่นๆ ที่เกิดขึ้นรวมถึงไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยอาศัยแบคทีเรียดีไนทริไฟอิงที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแอน็อกซิก ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระแต่ใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอนแทนออกซิเจนอิสระในกระบวนการหายใจของแบคทีเรีย สำหรับแบคทีเรียในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้แก่ *Acinotobacter, Alcaligenes, Bacillus, Psudomonas, Chromobacterium, Micrococcus, Proteus, Flavobacaterium,* (US.EPA., 1975 และ Knowler, 1982) *Dinitrobacillus, Spirillum* และ *Thiobacillus* (Anderson และ Ibahim, 1978) โดยจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่สามารถเจริญได้ในสภาวะไม่มีไนเทรตแต่สามารถย่อยสลายโปรตีนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือกระบวนการอื่นๆ ส่วนกลุ่มที่สองเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องอาศัยไนเทรตในการดำรงชีวิตจึงเจริญได้ในสภาวะที่มีไนเทรตเท่านั้น (Mateju และคณะ, 1992; Her และ Huang, 1995) จากรายงานของ สุรัชดา ไชยชนะ (2544) มีการใช้แบคทีเรีย *Thioballcillus denitrificans* ที่สามารถใช้สารประกอบซัลเฟอร์เป็นตัวให้อิเลคตรอนและใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอนทำให้เกิดการลดซัลเฟตในน้ำ โดยทั่วไปสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเทรตเป็นองค์ประกอบนิยมใช้สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเลคตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอน (Metcalf และ Eddy, 2004) โดยกลไกทางชีวภาพของปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแสดงได้ดังนี้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

$$NO_3^- \xrightarrow{\text{nitrate reductase}} NO_2^- \xrightarrow{\text{nitrite reductase}} NO \xrightarrow{\text{nitric reductase}} N_2O \xrightarrow{\text{nitrousoxide reductase}} N_2$$

หากนำกระบวนการสังเคราะห์เซลล์มาร่วมพิจารณา เมื่อใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนและไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอน จะได้ดังสมการที่ 10 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

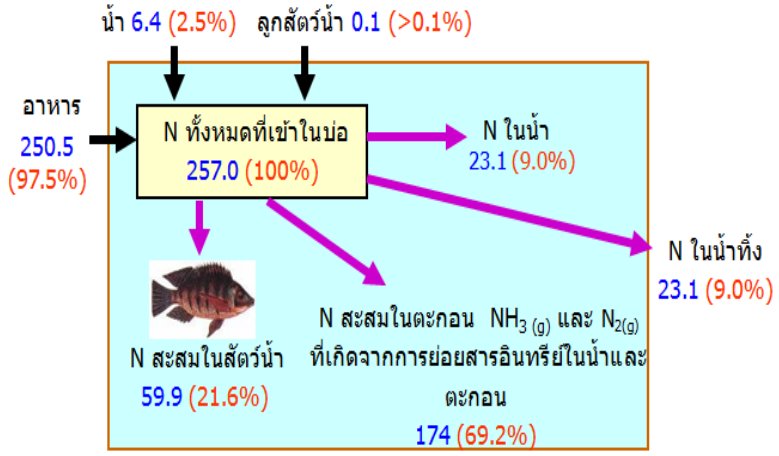
$$NO_3^- + 1.08\ CH_3OH + 0.24\ H_2CO_3 \longrightarrow 0.056\ C_5H_7O_2N + 0.47\ N_2 + 1.68\ H_2O + HCO_3^- \qquad (10)$$

ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ ส่งผลให้เกิดการรีดิวซ์ไนเทรตกลับเป็นไนไทรต์ แต่ไม่เกิดการรีดิวซ์ไนไทรต์เป็นแก๊สไนโตรเจนในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งเรียกว่า การเกิดดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete denitrification) (Koiller และ Avtation, 1985) โดยมีสาเหตุหลายประการ เช่น การขาดแหล่งคาร์บอนหรือแหล่งคาร์บอนไม่เพียงพอ ระยะเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาน้อยเกิดไป มีปริมาณแบคทีเรียน้อย และมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูง (อำไพเทพิน สิงหะพันธุ, 2543)

2.6 การหมุนเวียนของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.6.1 สมดุลไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปริมาณไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 97 ที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลามาจากอาหารปลาที่ให้เข้าสู่ระบบของการเลี้ยง โดยปลาสามารถสะสมไนโตรเจนไว้ในร่างกายได้ประมาณร้อยละ 22 ส่วนอาหารที่เหลือประมาณร้อยละ 40 เกิดการตกค้างอยู่ในบ่อ (Avnimelech และ Rityo, 2003) และอีกประมาณร้อยละ 35 เป็นของเสียจากสิ่งขับถ่ายของปลา (Brune และคณะ, 2003) โดยอาหารที่เหลือและสิ่งขับถ่ายของปลาส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ประเภทโปรตีน สารอินทรีย์เหล่านี้เมื่อถูกย่อยสลายจะทำให้เกิดการสะสมแอมโมเนียภายในบ่อ โดยแอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่รุนแรง ซึ่งระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไทรต์ และไนเทรต ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนีย แต่ภายในบ่อไม่ควรมีไนเทรตสะสมอยู่เกินกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ สำหรับสมดุลของไนโตรเจนในระบบเลี้ยงปลาระบบปิด แสดงดังในรูปที่ 2.3



ตัวเลขแสดงปริมาณไนโตรเจน : หน่วยกิโลกรัมไนโตรเจนต่อรุ่น (%เทียบกับไนโตรเจนทั้งหมด)

รูปที่ 2.3 ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปและสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของบ่อเลี้ยงปลาระบบปิด (ดัดแปลงจาก พุทธ ส่องแสงจินดา, 2553)

2.6.2 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากกระบวนการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ของเสียที่เกิดขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมักเป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ รวมทั้งฟอสฟอรัสซึ่งเกิดขึ้นจากเศษอาหารที่เหลือตกค้าง ของเสียสิ่งปฏิกูลจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการย่อยสลายโปรตีนจากซากสัตว์น้ำที่ตายแล้ว โดยของแข็งที่เกิดขึ้นจะตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียและสารแขวนลอยในน้ำ ดังนั้นกระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนต่างๆ ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีหลายขั้นตอนย่อยประกอบกัน โดยแต่ละขั้นตอนย่อยมีวัตถุประสงค์ในการกำจัดสิ่งสกปรกที่แตกต่างกัน ซึ่งสันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2549) ได้แบ่งประเภทของกระบวนการบำบัดออกเป็น 4 แนวทาง ดังนี้

1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment process) จัดเป็นกระบวนการกำจัดของเสียหรือสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการทางกายภาพ เช่น การดักด้วยตะแกรง (Screening) การกวาดเก็บ (Skimming) การทำให้ลอย (Floating) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกด้วยการเหวี่ยง (Centrifugation) และการกรอง (Filtration) กระบวนการทางกายภาพเหล่านี้มักเหมาะสมกับการแยกสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นยังมีกระบวนการทางกายภาพอื่นๆ เช่น การลดอุณหภูมิของน้ำเสียโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเสียกับน้ำ หรือน้ำเสียกับอากาศ หรือแม้กระทั่งการไล่สิ่งสกปรกในน้ำเสียออกด้วยอากาศ

2 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment process) เป็นกระบวนการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มักอยู่ในรูปของสารละลายน้ำและสารแขวนลอย ซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ หลักการที่ใช้คือ การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) การรวมตะกอน (Coagulation) การเติมและลดออกซิเจนในสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อน (Oxidation-Reduction) โดยวิธีดังกล่าวมักมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากราคาสารเคมีและค่าใช้จ่ายในการควบคุมและเดินระบบบำบัด วิธีนี้เหมาะสมกับการแยกหรือบำบัดน้ำเสียที่มีสิ่งปนเปื้อนโลหะหนัก บางครั้งใช้กับน้ำเสียที่บำบัดไม่ได้ด้วยวิธีทางชีววิทยา นอกจากนี้อาจใช้กระบวนการทางเคมีในการช่วยเสริมให้กระบวนการทางชีววิทยามีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การแยกสารพิษที่อาจเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีววิทยาออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการทางชีววิทยา

3 กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี (Physico-chemical process) เป็นกระบวนการที่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โดยอาศัยหลักการดูดซึมด้วยสารคาร์บอน (Carbon adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) อิเล็กโตรไดอะลิซิส (Eelectrodialysis) และการไล่ด้วยอากาศ (Gas stripping

หรือ Air stripping) เป็นต้น แต่กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมีมักเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Advance wastewater หรือ Tertiary treatment) เป็นส่วนใหญ่

4 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นจุลินทรีย์หรือพืชในการบำบัดหรือลดมลพิษที่ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น สารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส บางครั้งใช้ในการบำบัดสารอนินทรีย์ได้ เช่น การดูดซับโลหะหนัก การบำบัดสีของโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น ซึ่งกรมควบคุมมลพิษ (2546) ได้แบ่งกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ การบำบัดทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระหรือแบบไม่เติมอากาศ (Anaerobic treatment) ได้แก่ ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (Stabilization Pond) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket; UASB) และระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) เป็นต้น และการบำบัดทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจนอิสระหรือแบบเติมอากาศ (Aerobic treatment) ได้แก่ ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activate Sludge; AS) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor; RBC) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch; OD) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon; AL) และระบบโปรยกรอง (Trickling Filter; TF) เป็นต้น สำหรับการบำบัดทางชีววิทยาด้วยการใช้พืชน้ำ เช่น สาหร่าย จอก แหน ผักตบชวา และพืชน้ำอื่นๆ ส่วนใหญ่นิยมออกแบบเป็นระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland systems) ซึ่งพืชน้ำสามารถใช้สารอาหารจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์บริเวณรากพืชเพื่อการเติบโต จึงเป็นการช่วยบำบัดน้ำให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาเป็นที่นิยมในการบำบัดสารอินทรีย์ เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดทางเคมีและทางกายภาพ

2.7 ระบบอะควาโปนิกส์ (Aquaponics system)

อะควาโปนิกส์ (Aquaponics) คือ ระบบผสมผสานที่มีการรวมระบบของการเลี้ยงสัตว์น้ำและการปลูกพืชเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งทำได้โดยการเลี้ยงปลาในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดร่วมกับการปลูกพืชผักด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นแหล่งสารอาหารที่สมบูรณ์ต่อการเติบโตของพืชรวมทั้งเกิดกระบวนการทางชีวภาพจากแบคทีเรียในระบบที่ช่วยเปลี่ยนสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปธาตุอาหารที่พืชใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งกระบวนการดูดซึมของรากพืชเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการบำบัดคุณภาพน้ำเลี้ยงสัตว์น้ำก่อนการหมุนเวียนกลับเข้าสู่ระบบครั้งต่อไป (Nelson, 2008) ในปัจจุบันอะควาโปนิกส์เปรียบเหมือนต้นแบบของการผลิตอาหารแบบยั่งยืนที่ไม่ก่อผลกระทบต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม

โดยอะควาโปนิกส์เป็นการเติบโตของสัตว์น้ำและพืชภายใต้โครงสร้างพื้นฐานของแหล่งน้ำเดียวกัน และปราศจากการใช้สารเคมีซึ่งเป็นระบบเทคโนโลยีอเนกประสงค์ที่ช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพื้นที่หรือสภาพดินที่ไม่เหมาะสม อีกทั้งยังเป็นแนวทางสำคัญในการตอบสนองความต้องการทางอาหารของมนุษย์ที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต โดยอาศัยหลักการดำเนินการที่แน่นอน 4 ประการ คือ

1. ผลิตภัณฑ์ของเสียของระบบชีววิทยาชนิดหนึ่งสามารถผลิตสารอาหารให้ระบบชีววิทยาอีกชนิดหนึ่งได้อย่างเหมาะสม

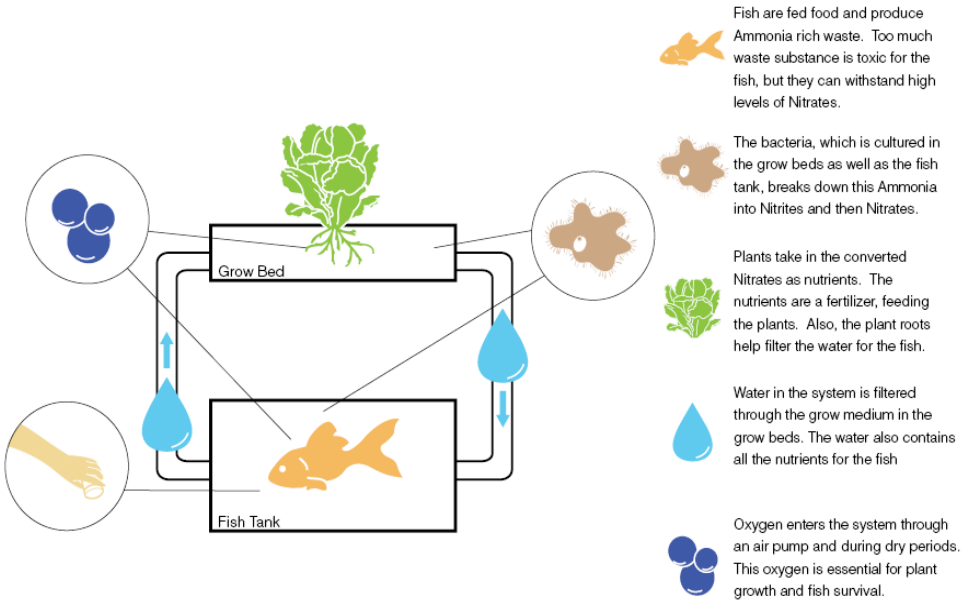
2. เป็นการรวมผลผลิตพืชและการเลี้ยงปลาซึ่งเป็นการเพิ่มผลผลิตให้ได้ปริมาณมากขึ้นภายในระบบนิเวศน์แบบเกื้อกูลกัน

3. น้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำถูกกรองด้วยชีววิธี และหมุนเวียนนำกลับมาใช้ซ้ำ

4. เป็นวิธีการผลิตอาหารเพื่อสุขภาพที่สะอาดและปลอดภัยโดยปราศจากสารเคมีปนเปื้อน รวมทั้งเป็นแนวทางที่ช่วยส่งเสริมเศรษฐกิจระดับท้องถิ่น

รูปที่ 2.4 แนวคิดและระบบการเกษตรแบบผสมผสานหรืออะควาโปนิกส์ (Peak, 2011)

สำหรับการดำเนินการในระบบอะควาโปนิกส์นั้น ทั้งน้ำและตะกอนแขวนลอยภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะอุดมไปด้วยธาตุอาหารสำหรับพืชเพื่อใช้ในการเติบโต (ราเชนทร์ วิสุทธิแพทย์, 2550) ซึ่งธาตุอาหารที่สำคัญส่วนใหญ่เกิดจากอาหารปลาที่ตกค้างภายในระบบ รวมทั้งสิ่งปฏิกูลของปลา โดยธาตุอาหารเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นสารอาหารสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ ซึ่งในระบบของการปลูกพืชรากพืชและจุลินทรีย์บริเวณรากพืชจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองและดูดซึมสารอาหารจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงเท่ากับว่าสามารถใช้ธาตุอาหารเหล่านี้ทดแทนสารอาหารสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ที่ใช้โดยทั่วไป ซึ่งกลุ่มแบคทีเรียที่มีความสำคัญในระบบอะควาโปนิกส์คือแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงที่มีผลในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งทำให้น้ำมีความสะอาดเพียงพอที่จะถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ในถังเลี้ยงปลาได้ รูปที่ 2.5 แสดงการหมุนเวียนธาตุอาหารและกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นในระบบอะควาโปนิกส์



รูปที่ 2.5 การหมุนเวียนสารอาหารและกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นในระบบอะควาโปนิกส์ (Fay, 2011)

ส่วนประกอบสำหรับระบบอะควาโปนิกส์แบ่งออกเป็น 5 ส่วนที่สำคัญ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.6 ได้แก่

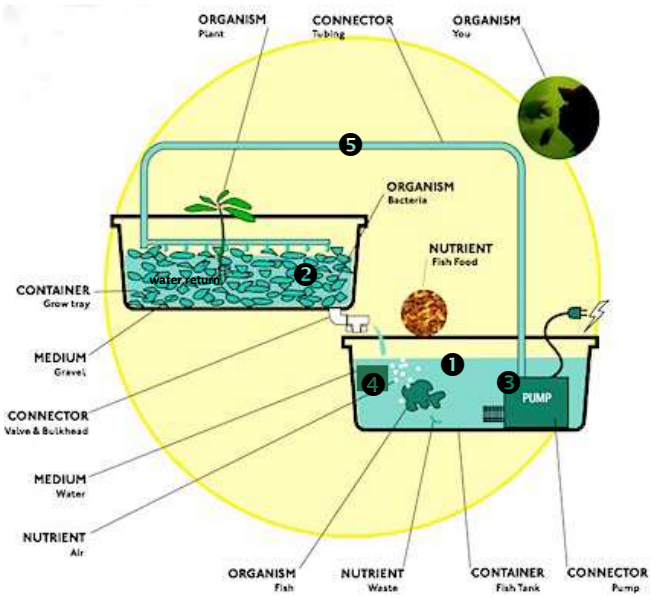
1. ถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งนิยมใช้ถังพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีความคงทนแข็งแรง โดยถังเลี้ยงสัตว์น้ำต้องไม่เกิดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยง และถังเลี้ยงโดยทั่วไปต้องมีการคลุมปากถังด้วยตาข่ายพลาสติกเพื่อป้องกันการกระโดดของสัตว์น้ำออกจากถัง

2. ถังปลูกพืช ควรเป็นถังพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยไม่เกิดสารปนเปื้อนที่ส่งผลกระทบต่อการเติบโตของพืช

3. ปั๊มดูดจ่ายน้ำ นิยมใช้ปั๊มแบบจุ่มใต้น้ำ (Submersible pump) เนื่องจากมีความเหมาะสมต่อการดูดตะกอนแขวนลอยและสารอาหารที่ตกค้างบริเวณก้นบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (Azim และ Little, 2008)

4. เครื่องเติมอากาศ ซึ่งทำหน้าที่ในการให้ออกซิเจนสำหรับสัตว์น้ำที่เลี้ยง และทำให้ตะกอนแขวนลอยเกิดการกระจายตัว รวมทั้งไม่เกิดสภาวะไร้อากาศบริเวณก้นถังเลี้ยง

5. ระบบท่อ โดยใช้ท่อชนิดโพลีไวนิวส์คลอไรด์ (PVC) ที่เชื่อมต่อกับถังเลี้ยงสัตว์น้ำและถังปลูกพืชเพื่อจ่ายน้ำและหมุนเวียนน้ำภายในระบบอะควาโปนิกส์



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบภายในระบบอะควาโปนิกส์ (Bevan, 2010)

2.7.1 ปัจจัยการทำงานของระบบอะควาโปนิกส์ (Nelson, 2008)

ระบบอะควาโปนิกส์เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตอาหารปราศจากการปนเปื้อนสารเคมีอีกทั้งยังเป็นแนวทางในการผลิตอาหารที่ยั่งยืนไม่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงเป็นศาสตร์แห่งเทคโนโลยีที่สำคัญของการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยที่สำคัญต่อการดำเนินระบบอะควาโปนิกส์ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการไนทริฟิเคชันภายในถังปลูกพืชที่ทำหน้าที่เป็นระบบกรองชีววิธี โดยบริเวณชั้นตัวกลางและรากพืชมักเป็นแหล่งอาศัยของแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิง ซึ่งแบคทีเรียเหล่านั้นทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไทรต์และไนเทรต ตามลำดับ โดยพืชสามารถใช้สารประกอบไนโตรเจนในการเติบโตได้ จึงส่งผลให้คุณภาพน้ำมีความปลอดภัยและสามารถหมุนเวียนกับสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้

2. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันของชั้นตัวกลางในถังปลูกพืชเมื่อเกิดการสะสมของแข็งแขวนลอยในปริมาณที่สูงและมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์ม โดยแบคทีเรียดีไนทริฟิเคชันทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนให้กลายเป็นไนไทรต์ที่พืชใช้ในการเติบโต รวมทั้งการสูญเสียออกจากระบบโดยกระบวนการระเหยในรูปของแก๊สไนโตรเจน

3. ความสัมพันธ์ห่างปริมาณสารอาหารที่เป็นของเสียภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำกับปริมาณพืชต้องมีความสมดุลกัน โดยหากปริมาณของเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณ

มากกว่าการนำไปใช้ประโยชน์โดยพืช อาจส่งผลต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนจากถังปลูกพืช ยังคงมีความเข้มข้นสูงและเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แต่ถ้าหากมีปริมาณพืชจำนวนมากกว่าปริมาณของเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ อาจผลต่ออัตราการเติบโตของพืชที่ลดลง

4. ปริมาณอากาศในระบบอะควาโปนิกส์ควรเหมาะสมต่อจำนวนสัตว์น้ำ พืช และแบคทีเรียที่มีประโยชน์ นอกจากนั้นการหมุนเวียนน้ำภายในระบบยังเป็นส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณอากาศอีกทางหนึ่งด้วย

5. ตัวกลางในระบบอะควาโปนิกส์เป็นส่วนสำคัญในการช่วยกรองน้ำและของเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่เวียนสู่ถังปลูกพืช นอกจากนี้ตัวกลางยังมีประโยชน์เป็นส่วนช่วยพยุงลำต้นและรากพืช รวมทั้งเป็นแหล่งอาศัยของแบคทีเรียต่างๆ ส่งผลให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ และพืชสามารถใช้สารอาหารจากสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการเติบโต อีกทั้งยังเป็นส่วนช่วยบำบัดคุณภาพน้ำให้มีความปลอดภัยต่อสัตว์น้ำก่อนการหมุนเวียนกลับสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นความหนาของชั้นตัวกลาง อัตราการไหลหมุนเวียนน้ำ ระยะเวลากักพักชลศาสตร์ และขนาดของปั๊มน้ำควรได้รับการออกแบบให้เหมาะสมต่อระบบนั้นๆ

6. โรงเรือนและการควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับอะควาโปนิกส์นั้นสามารถตั้งอยู่ได้ทั้งบริเวณกลางแจ้งหรือในโรงเรือนตามธรรมชาติ โดยควรมีความเหมาะสมกับพืชที่ปลูก ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุม คือปริมาณความเข้มแสง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความชื้น และอัตราการหมุนเวียนน้ำ เป็นต้น สำหรับระบบอะควาโปนิกส์การควบคุมแมลงศัตรูพืชเป็นการควบคุมด้วยชีววิธีจึงปราศจากการใช้สารเคมีทุกชนิด

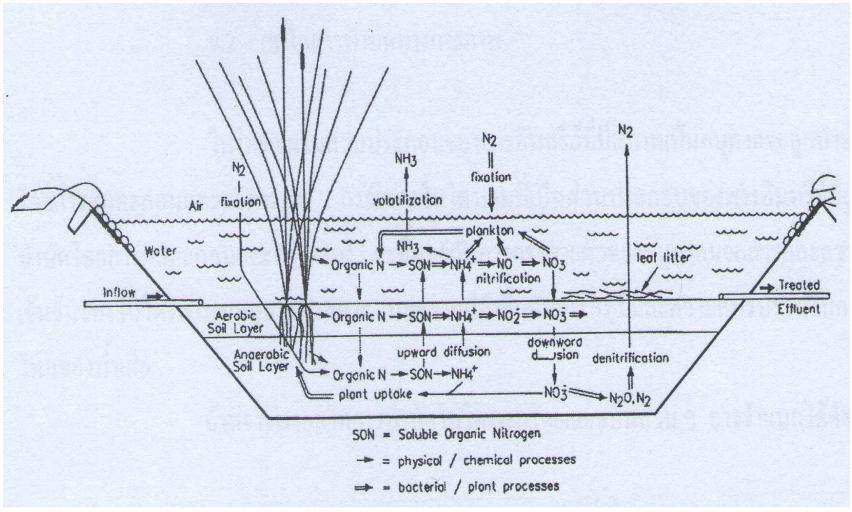
2.7.2 กลไกการบำบัดของเสียจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการใช้ประโยชน์ของพืช

จากแนวคิดและงานวิจัยส่วนใหญ่บ่งชี้ให้เห็นว่า แนวทางการปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอะควาโปนิกส์สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอาหาร และทำลายเชื้อโรคจากน้ำและของเสียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในปริมาณที่สูง โดยกลไกการบำบัดประกอบด้วยการตกตะกอน การทำงานของแบคทีเรีย การย่อยสลายทางเคมี และกระบวนการดูดซึมจากระบบรากพืชและตัวกลาง (Roger และคณะ, 1985) ซึ่งมีรายละเอียดของกลไกการบำบัดต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การกำจัดไนโตรเจนส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรีย ซึ่งช่วยเปลี่ยนรูปจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันในสภาวะมีออกซิเจนซึ่งเติมจากผิวน้ำหรือออกซิเจนชั้นบางๆ บริเวณรากพืชโดยแบคทีเรียเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมอิออนให้กลายเป็นไนเทรต ผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะแอนนอกซิก โดยแบคทีเรียเปลี่ยนไนเทรต

ให้แปรสภาพเป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกจากการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบมีตัวกลาง นอกจากนี้ในอีกแนวทางหนึ่งไนโตรเจนอาจสูญเสียในรูปของแอมโมเนียโดยการระเหย (Volatilization) จากพื้นผิวน้ำ (Roger และคณะ, 1985)

การบำบัดไนโตรเจนโดยทั่วไปมักขึ้นกับอัตราภาระชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate) ซึ่งกลไกที่สำคัญในการบำบัดไนโตรเจนขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำ ตลอดจนอัตราและระยะเวลาในการกักขังน้ำในระบบปลูกพืช โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนประกอบด้วยการตรึงไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังสามารถเกิดขึ้นกับชั้นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออนของแอมโมเนียม และแปรรูปเป็นไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วัฏจักรของไนโตรเจนในถังปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบมีตัวกลาง
(ดัดแปลงจาก Cambell และ Ogden, 1999)

สำหรับสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงปลาที่มีสภาพเป็นอนุภาคจะถูกบำบัดด้วยการตกตะกอนและการกรอง ซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาคมวลสารและความเข้มข้นของไนโตรเจนในอนุภาคมวลสาร นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความแปรปรวนในการไหลของน้ำ โดยมีกลไกการบำบัดไนโตรเจนด้วยการตกตะกอนบนผิวตัวกลางของชั้นปลูกพืชร่วมกับระบบรากของพืช รวมทั้งการเกิดกระบวนการระเหยของแอมโมเนีย ไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันที่พืชสามารถนำไนโตรเจนไปใช้เพื่อการสร้างเซลล์พืช

2. การกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นตัวกลาง โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วง 0 – 90% ซึ่งถ้าหากตัวกลางมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียม และแคลเซียมจะช่วย

ส่งเสริมประสิทธิภาพการกำจัดให้ดีขึ้น สำหรับพืชสามารถใช้ฟอสฟอรัสในการสร้างเซลล์ผ่านทางระบบราก

3. การกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากรวมทั้งสารอินทรีย์คงตัวด้วยวิธีการทำให้เกิดการระเหย การดูดซับ และการย่อยสลายทางชีวภาพ สำหรับการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ย่อยสลายยากในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเมื่อผ่านระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบมีตัวกลางจะเกิดการดูดซับบริเวณผิวหน้าตัวกลาง หลังจากนั้นจึงเกิดการย่อยสลายด้วยกระบวนการกายภาพและชีวภาพ ซึ่งกระบวนการย่อยสลายส่วนใหญ่เกิดจากจุลินทรีย์ในระบบ (Polprasert, 1989)

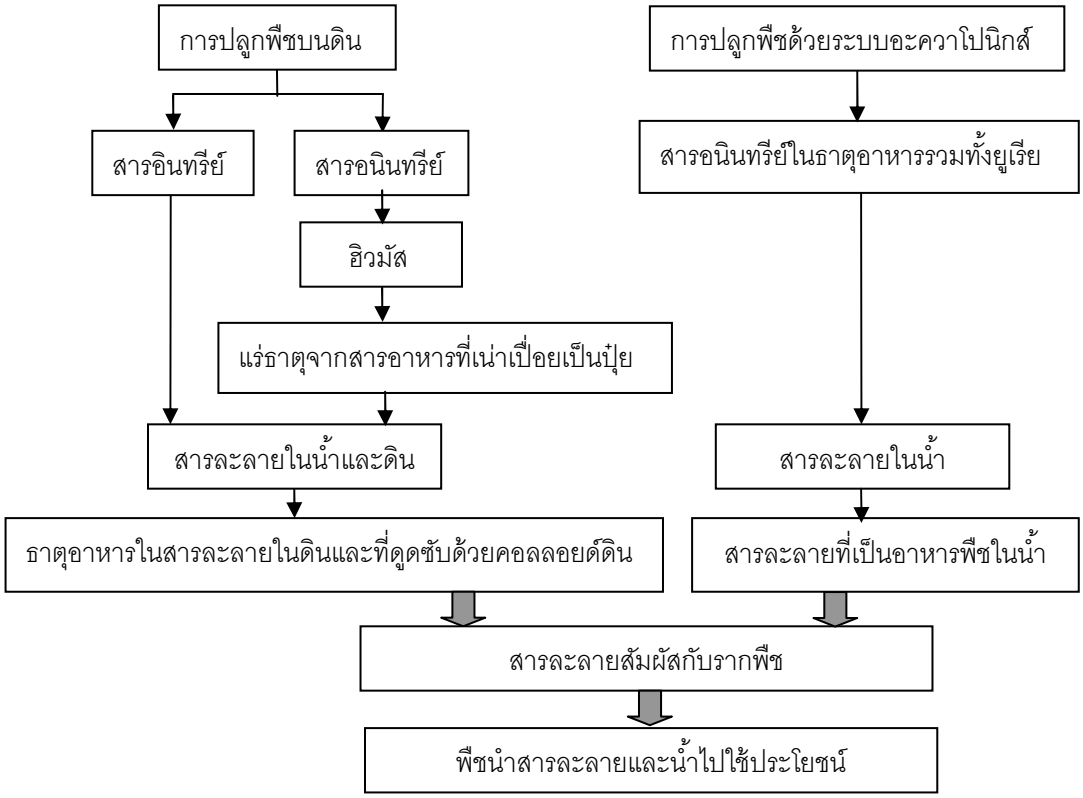
4. การกำจัดเชื้อโรคได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางที่ช่วยบ่งชี้ถึงความสามารถในการกำจัดเชื้อโรคต่างๆ ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการนำของเสียออกจากระบบ เมื่อมีการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์จะพบว่าจุลินทรีย์กลุ่มก่อโรคได้เปลี่ยนแปลงเป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อโรค ซึ่งกลไกหลักนั้นเกิดจากการทดแทนตามธรรมชาติ การจับกินกันเอง การดูดซับของตะกอนในระบบ โดยปัจจัยที่สำคัญขึ้นอยู่กับประเภทจุลินทรีย์ ระยะเวลา และอุณหภูมิ เป็นต้น (Gersberg และคณะ, 1987 และ Reed และคณะ, 1988)

5. การกำจัดสารของแข็งแขวนลอยที่มีประสิทธิภาพควรมีลักษณะการกักขังน้ำที่สงบนิ่ง ระยะเวลากักพักชลศาสตร์ (HRT) ที่ยาวนาน ซึ่งของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่การตกตะกอนที่สมบูรณ์เกิดขึ้นในช่วง 20 – 30 นาทีแรกที่น้ำเข้าระบบ โดยต้นพืชช่วยในการกระจายน้ำและของแข็งแขวนลอยให้ทั่วทั้งระบบและส่งเสริมการตกตะกอนที่ดีขึ้น สำหรับพวกคอลลอยด์และของแข็งที่ไม่ตกตะกอนมักถูกจับยึดด้วยแบคทีเรีย การชนกัน และการดูดติดกับวัสดุอื่นๆ หรือการย่อยสลายมวลสารทำให้เกิดชั้นของตะกอน (Sludge layer in media) สะสมบริเวณชั้นตัวกลาง (Kessomboon, 1990 และ Hammer และ Kadlec, 1983)

2.7.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless culture or Hydroponics)

ปัจจุบันมนุษย์ทุกคนหันมาใส่ใจในสุขภาพมากขึ้นเป็นลำดับ ผักไฮโดรโปนิกส์จึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภค โดยผักไฮโดรโปนิกส์เป็นการใช้เทคโนโลยีในการปลูกพืชบนพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมต่อการทำการเกษตร เป็นวิธีที่ไม่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกแต่พืชสามารถเติบโตได้โดยรับธาตุอาหารจากสารละลายธาตุอาหาร ดิเรก ทองอร่าม (2550) ได้อธิบายว่าควรมีการจัดการผลผลิตพืชในสภาพที่มีการควบคุมสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเติบโตของพืช สำหรับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินนักวิจัยมีการคิดค้นและวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน ซึ่ง Sachs และ Knop (1865) เป็นผู้ริเริ่มการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิกส์ จึงนับเป็นงานทดลองครั้งแรกของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินตามหลักการทางวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ โดยการให้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการ

เติบโตของพืช คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน แคลเซียม และเหล็ก นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายฉบับค้นพบว่ารากที่งอกจากเมล็ดเหนือส่วนสารละลายธาตุอาหาร ทำหน้าที่เป็นรากอากาศ ส่วนรากในสารละลายธาตุอาหารเป็นรากดูดสารอาหาร จึงมีการพัฒนาระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบันมีการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมอย่างชัดเจน สำหรับประเทศไทยหน่วยงานภาครัฐและเอกชนร่วมทั้งสถาบันการศึกษาต่างๆ ได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยอย่างกว้างขวางทำให้เกิดการพัฒนาศักยภาพของระบบการผลิตพืชที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินเพิ่มมากขึ้น โดยดิเรก ทองอร่าม (2550) ได้เปรียบเทียบการได้รับสารอาหารของพืชจากการปลูกบนดินและการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์ดังแสดงตามแผนภาพรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบลักษณะที่พืชได้รับธาตุอาหารจากการปลูกบนดินกับการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์

นอกจากนี้ Nelson (2008) ได้อธิบายเกี่ยวกับระบบอะควาโปนิกส์ซึ่งเป็นระบบของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนร่วมกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน โดยแบคทีเรียทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบที่เป็นพิษจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปธาตุอาหารที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบของการปลูกพืชสามารถหมุนเวียนเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยพบว่าระบบอะควาโปนิกส์ในอนาคตจะมีบทบาทที่สำคัญต่อการผลิตอาหารของประชากรโลกและความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบความแตกต่างของการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์และไฮโดรโปนิกส์ดังแสดงในตารางที่ 2.4

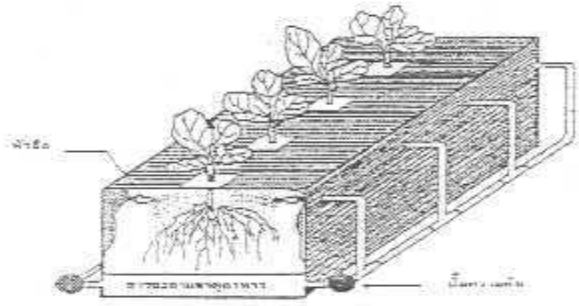
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์และไฮโดรโปนิกส์ (Nelson, 2008)

ระบบอะควาโปนิกส์	ระบบไฮโดรโปนิกส์
1. ระบบผสมผสานของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำและการปลูกพืชเข้าด้วยกัน	1. การปลูกพืชแบบระบบเดี่ยวไม่มีการผสานรวมกับระบบอื่นๆ
2. ระบบการปลูกพืชนิยมใช้ตัวกลางเพื่อเป็นที่ยึดเกาะและพยุงรากพืช นอกจากนั้นยังเป็นที่สะสมตะกอนและน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ	2. สามารถปลูกพืชด้วยรูปแบบการปลูกพืชบนสารละลายธาตุอาหารและการปลูกบนตัวกลาง
3. สารอาหารต่อการเติบโตของพืชขึ้นอยู่กับปริมาณปลาในระบบและปัจจัยสิ่งแวดล้อม ดังนั้นปริมาณสัตว์น้ำควรสมดุลกับสารอาหารที่พืชต้องการ	3. สามารถควบคุมสารอาหารและปัจจัยต่างๆ ด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเติบโตของพืชได้
4. ปฏิกิริยาที่เกิดภายในระบบเป็นปฏิกิริยาทางด้านชีวภาพ	4. ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาทางด้านเคมี
5. ค่าลงทุนต่ำ แต่ผลผลิตที่ได้สูง	5. ค่าลงทุนเดินระบบสูง และผลผลิตที่ได้สูง

2.7.4 รูปแบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponics)

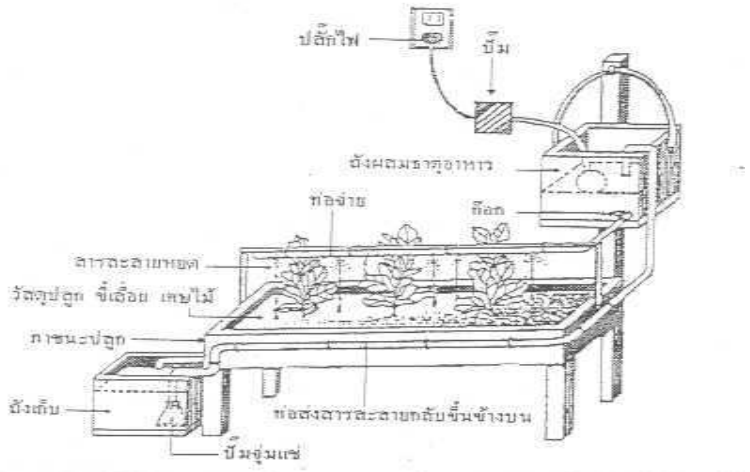
ปัจจุบันการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินมีอยู่มากมายหลายระบบ เนื่องจากมีการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมของประเทศต่างๆ โดยในระยะแรกได้มีการพัฒนาเทคนิคการปลูกพืชในกรวดขึ้น (Gravel culture) ซึ่งนับเป็นเทคนิคการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์แบบแรกที่คิดค้นโดยชาวญี่ปุ่น สำหรับรูปแบบการปลูกผักโดยไม่ใช้ดินสามารถจำแนกได้เป็น 3 ระบบดังนี้ (ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์, 2534)

1. การปลูกให้รากลอยอยู่กลางอากาศ (Aeroponics) เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหาร ส่วนรากของพืชจะแขวนลอยกลางอากาศอยู่ภายในกล่องหรือตู้ที่เป็นห้องมืด จากนั้นจึงเติมธาตุอาหารแก่รากพืชด้วยการใช้ปั๊มอัดผ่านหัวฉีด โดยสารละลายมีลักษณะเป็นฝอยละเอียดตลอดช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้รากคงความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 95 - 100 สำหรับข้อดีของระบบนี้คือ รากพืชไม่ขาดออกซิเจนและจะเจริญเติบโตได้เต็มที่ ส่วนข้อเสียของระบบนี้คือ ตู้ปลูกมักมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก และต้องลงทุนค่าวัสดุอุปกรณ์ค่อนข้างสูง จึงมักนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาทางสรีรวิทยาของพืชเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



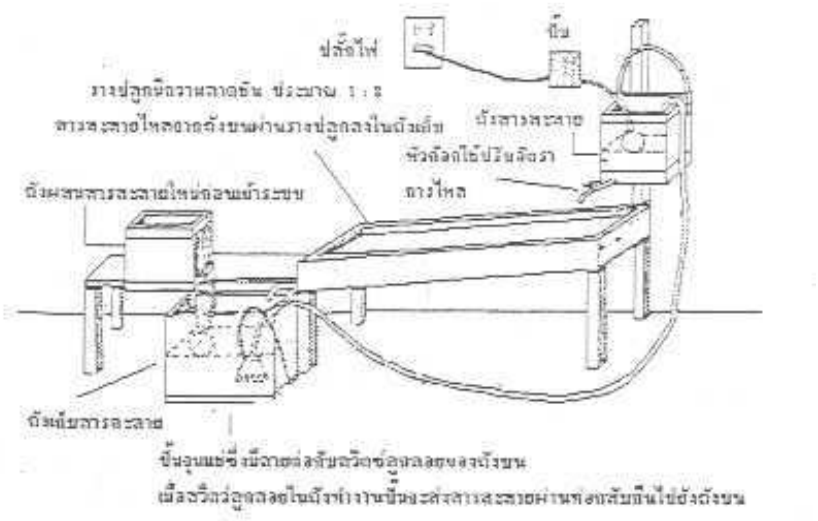
รูปที่ 2.9 แสดงการปลูกพืชแบบให้รากลอยอยู่กลางอากาศ

2. การปลูกบนวัสดุปลูก (Substrate culture) เป็นการปลูกในลักษณะที่คล้ายกับการปลูกพืชบนดินมากที่สุด การดูแลรักษาจึงคล้ายกับการปลูกพืชในกระถาง แต่ใช้วัสดุปลูกอื่นแทนดิน เพื่อให้รากพยุงลำต้นให้อยู่ได้ ซึ่งได้แก่วัสดุปลูกที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic substrate) หรือวัสดุปลูกที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic substrate) ซึ่งวัสดุปลูกที่นิยมใช้ เช่น แกลบ ทราย ขุยมะพร้าว หินภูเขาไฟ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุที่ช่วยค้ำและพยุงราก สำหรับการปลูกในวัสดุปลูกจะใช้ปริมาณของวัสดุปลูกน้อยกว่าการปลูกด้วยดินมาก โดยรากพืชจะมีความสามารถในการหาน้ำและอาหารไม่เกิน 5 ล./ต้น ดังนั้นการจัดการเกี่ยวกับน้ำและธาตุอาหารจึงต้องดูแลเป็นพิเศษ ต้องมีการควบคุมปริมาณน้ำในวัสดุปลูกให้เหมาะสม นอกจากการใช้วัสดุปลูกที่มีการระบายน้ำที่ดี ความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อย มีอัตราส่วนระหว่างน้ำและอากาศที่เหมาะสมแล้ว ยังต้องระวังวัสดุปลูกแห้งในช่วงการเติบโต ซึ่งก่อนการเพาะปลูกควรปรับพีเอชของวัสดุปลูกให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.0 โดยใช้สารละลายกรดไนตริกเจือจาง สำหรับการให้สารละลายธาตุอาหารอาจทำได้โดยการให้สารละลายท่วมภาชนะปลูกนานประมาณ 0.5 - 1 ชม. และการให้สารละลายโดยวิธีการหยดดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการปลูกพืชในวัสดุปลูกแบบการให้สารละลายโดยการหยด

3. การปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (Liquid culture) เป็นการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ที่ได้รับความนิยมมากกว่าแบบอื่นๆ และใช้ได้ดีในที่มีแดดจัด วิธีการคือนำรากพืชจุ่มลงในสารละลายโดยตรงโดยรากพืชไม่มีการเกาะยึดกับวัสดุใดๆ ยังสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ ดังนั้นการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารจึงต้องพัฒนารากพืชในต้นเดียวกันนั้นให้สามารถทำงานได้ 2 หน้าที่พร้อมๆ กัน คือ รากดูดออกซิเจน (Oxygen roots) และรากดูดสารละลายธาตุอาหาร (Nutrient roots) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารโดยการไหลผ่านรากพืช

2.7.5 ข้อเด่นและข้อด้อยในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

การปลูกผักโดยไม่ใช้ดินเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการปลูกพืชผักและได้รับการส่งเสริมจากหน่วยงานภาครัฐ เพื่อตอบสนองต่อการรักษาสุขภาพและมีความปลอดภัยต่อสารพิษตกค้าง ซึ่งปัจจุบันได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการปลูกผักโดยไม่ใช้ดินมีข้อเด่นและข้อด้อยที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (ดิเรก ทองอร่าม, 2550)

ข้อเด่น	ข้อด้อย
1. สามารถปลูกพืชในบริเวณพื้นที่ที่ดินไม่ดีหรือสภาพแวดล้อมไม่เหมาะต่อการเพาะปลูก	1. มีต้นทุนการผลิตเริ่มต้นค่อนข้างสูงจากอุปกรณ์ แต่ศักยภาพการคืนทุนเร็ว
2. ประหยัดค่าขนส่งเนื่องจากสามารถเลือกผลิตใกล้เขตชุมชนหรือแหล่งรับซื้อทำให้มีประสิทธิภาพเชิงการค้า	2. ผู้ปลูกต้องมีความชำนาญและมีประสบการณ์สูงพอในการควบคุม
3. ประหยัดพื้นที่ปลูกและผลิตได้สม่ำเสมอ	3. ต้องการการควบคุมดูแลอย่างสม่ำเสมอ
4. ประหยัดเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายในการเตรียมดินและกำจัดวัชพืช	4. ถ้าไม่มีความรู้เพียงพออาจเกิดการสะสมไนเทรตสูงจนเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค
5. สามารถปลูกพืชได้อย่างต่อเนื่องตลอดปีในพื้นที่เดียวกัน	5. วัสดุปลูกบางชนิดย่อยสลายยากอาจเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมถ้าไม่มีการควบคุม
6. พืชเติบโตและให้ผลผลิตเร็วกว่าการปลูกแบบธรรมดา 1-2 สัปดาห์	6. ความหลากหลายของพืชที่ปลูกแบบไม่ใช้ดินยังมีน้อยในประเทศ
7. ใช้แรงงานน้อยแต่มีประสิทธิภาพสูง	
8. สามารถควบคุมน้ำและธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลดการใช้น้ำต่ำกว่า 10 เท่าของการปลูกแบบธรรมดา	
9. ควบคุมสภาพแวดล้อมเกี่ยวกับการเจริญได้แน่นอนและรวดเร็ว	

2.7.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตของพืชที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน

การเติบโตและพัฒนาการของพืชไม่ว่าจะปลูกด้วยวิธีดั้งเดิมหรือปลูกด้วยวิธีไฮโดรโปนิกส์จะถูกควบคุมโดยปัจจัยทั้งภายในและภายนอก สำหรับการเติบโตของพืชที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งอาจจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่มดังนี้

1. พันธุกรรม เป็นปัจจัยภายในตัวพืชเองเพราะเกี่ยวข้องกับยีน (Gene) ซึ่งอยู่ในโครโมโซมของพืช ยีนเป็นตัวกำหนดลักษณะต่างๆ เช่น ความสูง รูปร่าง สี นอกจากนั้นยังเป็นตัวกำหนดการเติบโตของพืช การให้ผลผลิตหรือความสามารถในการต้านทานศัตรูพืช โดยทั่วไปปัจจัยทางพันธุกรรมจะมีอิทธิพลร่วมกับสภาพแวดล้อม (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2538)

2. สารควบคุมการเติบโต ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่พืชสร้างขึ้นเองหรือจากการสังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์ โดยสารปริมาณเพียงหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) ก็สามารถกระตุ้น ยับยั้ง หรือเปลี่ยนสภาพทางสรีรวิทยาของพืชได้ สารควบคุมการเติบโตนั้นจะไปควบคุมการทำงานของยีนในการสร้างโปรตีน กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ (ดิเรก ทองอร่าม, 2550)

3. สภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่ออัตราการเติบโตของพืช โดยปัจจัยที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2538)

3.1 อุณหภูมิ เป็นปัจจัยในการควบคุมอัตราการเติบโตของพืช โดยมีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์แสง การหายใจ การดูดธาตุอาหาร การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเร่งกระบวนการทางเคมีต่างๆ ในพืช การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเติบโตของพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินที่มีผลต่ออัตราการเติบโตของพืช โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโตของพืชอยู่ในช่วง 27 - 30 °ซ.

3.2 ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการคายน้ำของพืช เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจะทำให้พืชคายน้ำน้อยลง ส่งผลให้การลำเลียงแร่ธาตุอาหารต่างๆ จากรากไปสู่ใบลดลง และยังทำให้อุณหภูมิที่ใบสูงขึ้น นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์สูงยังเป็นสาเหตุทำให้พืชเกิดโรคได้ง่าย

3.3 แสง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตและพัฒนาการของพืช เพราะแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างอาหารหรือการสังเคราะห์แสงของพืช โดยมีคลอโรฟิลล์เป็นตัวรับแสงและเปลี่ยนรูปเพื่อให้เกิดการสร้างพลังงาน

3.4 คุณภาพน้ำ มีความสำคัญมากในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน เนื่องจากพืชที่ปลูกได้รับธาตุอาหารต่างๆ จากสารละลายธาตุอาหารซึ่งต้องใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ้าน้ำมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ เชื้อโรคจะแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วสู่รากพืชจึงจำเป็นต้องมีการฆ่าเชื้อก่อนนำน้ำไปใช้

3.5 ความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช ซึ่งเกิดจากคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยทางอ้อมต่อการเติบโตของพืช โดยทั่วไปการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินสารละลายธาตุอาหารพืชควรมีพีเอชอยู่ในช่วง 5.5 - 6.5

3.6 ธาตุอาหารพืช โดยทั่วไปธาตุอาหารที่พืชต้องการมีทั้งสิ้น 16 ธาตุ ซึ่ง 3 ธาตุหลักได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนที่ได้จากน้ำและอากาศ ส่วนอีก 13 ธาตุสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มมหธาตุ (Macronutrient elements) ประกอบด้วย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน เป็นต้น ส่วนกลุ่มจุลธาตุ (Micronutrient element) ประกอบด้วย เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน และโมลิบดินัม เป็นต้น

2.7.7 เม็ดดินเผา (Expanded clay)

งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นเม็ดดินเผาในการเป็นวัสดุตัวกลางที่ใช้รองรับน้ำและตะกอนแขวนลอย เม็ดดินเผาผลิตมาจากดินเหนียวผสมถ่านหินแล้วเผาในเตาเผา (Rotary Kiln) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 °ซ ทำให้น้ำในเม็ดดินถูกขับออกมาอย่างรุนแรงเกิด

ช่องว่างของเม็ดดินเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้มีประโยชน์ต่อรากพืชโดยตรง เพราะอากาศและน้ำจะสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนสำหรับใช้ในการหายใจทำให้เกิดพลังงานในการดึงดูดน้ำและธาตุอาหาร ดังนั้นเมื่อเม็ดดินเผามีช่องว่างเกิดขึ้นมากทำให้มีการถ่ายเทอากาศดี รากพืชสามารถเจริญได้อย่างแข็งแรง ดูดน้ำและธาตุอาหารได้มาก ทำให้ต้นพืชเติบโตแข็งแรง ส่วนความเป็นกรดเป็นด่างของเม็ดดินประมาณ 6.5 - 7.0 (ปกติดินจะมีพีเอชอยู่ระหว่าง 3.0 - 9.0) มีความสามารถในการอุ้มน้ำร้อยละ 14.7 - 16 โดยน้ำหนัก ไม่มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนประจุ ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้งคือ 0.3 - 0.6 ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่นิยมใช้มีขนาด 8 - 16 มม. โดยทั่วไปมีการใช้เม็ดดินเผาในระบบไฮโดรโปนิกส์กับไม้ประดับ โดยใช้ร่วมกับวัสดุปลูกที่เป็นวัสดุปลูกอื่นๆ ที่ไม่ใช่ดินหรือเป็นดิน การใช้เม็ดดินเผาเป็นวัสดุปลูกรากของพืชจะได้รับประโยชน์จากความพรุนของเม็ดดินเผาโดยตรง สามารถดึงเอาอากาศมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเพียงพอ โดยเม็ดดินเผามีข้อดีคือ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายธาตุอาหาร ระบายอากาศดีมาก ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง อายุการใช้งานยาวนาน แต่ความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อย

2.8 คุณลักษณะของปลานิลและการเลี้ยง

ปลานิลจัดเป็นสัตว์น้ำเชิงเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ภายในประเทศและการส่งออกที่มีมูลค่าค่อนข้างสูง รวมทั้งเป็นที่นิยมต่อการเลี้ยงของเกษตรกร เนื่องจากเป็นสัตว์น้ำที่เลี้ยงได้ง่าย เติบโตที่รวดเร็ว โดยปลานิลเป็นสัตว์น้ำที่นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.8.1 สรีรวิทยาของปลานิล

อนุกรมวิธานของปลานิลสามารถลำดับได้ดังนี้

Kingdom : Animalia

Phylum : Vertebrata

Class : Osteichthyes

Order : Percifomes

Family : Cichlidae

Genus : *Oreochromis*

Species : *niloticus*

รูปที่ 2.12 ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus)

ปลานิลมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* Linnaeus จัดอยู่ในวงศ์ Cichlidae ซึ่งมีปลาอยู่ในวงศ์นี้อยู่ประมาณ 700 ชนิด ลักษณะปลานิลคือ มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน ลำตัวสีเขียวปนน้ำตาลและลายพาดขวาง 9 - 10 แถบ มีครีบหลัง ครีบก้นและครีบหางเป็นจุดขาวและมีเส้นสีดำตัดขวาง ปลานิลมีลักษณะต่างจากปลาหมอเทศตรงที่ปลานิลมีเกล็ด 3 แถวบริเวณแก้ม และอีก 1 แถวบริเวณเหนือเส้นข้างลำตัวเล็กน้อย ครีบหลังมีอันเดียว ประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 15 - 18 อัน และก้านครีบอ่อน 12 - 14 อัน ครีบก้นมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9 - 10 อัน บนแถบเส้นข้างลำตัวมีเกล็ด 33 เกล็ด ทางด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาลตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม บริเวณกระดูกแก้มมีสีเข้มอยู่หนึ่งจุด ปลานิลเป็นปลากินพืช แบคทีเรียและพืชน้ำเป็นอาหารจึงเป็นที่นิยมเลี้ยงกันทั่วไป เนื่องจากเลี้ยงง่าย อัตราการเติบโตสูง การเลี้ยงปลานิลนิยมเลี้ยงในบ่อและกระชัง ปัจจุบันอาหารปลานิลนิยมใช้ปลายข้าว กากถั่วเหลือง ปลาป่น พืชจำพวกแหน เป็นต้น เพื่อเพิ่มอัตราการเติบโต โดยธรรมชาติปลานิลเป็นสัตว์น้ำจืดแต่สามารถนำไปเลี้ยงในน้ำกร่อยได้ เนื่องจากปลานิลมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถอาศัยในน้ำได้อย่างปกติที่ความเค็มสูงถึง 20 ส่วนในพันล้านส่วน (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.8.2 การเลี้ยงปลานิล

โดยรูปแบบการเลี้ยงปลานิลสามารถจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

1. การเลี้ยงแบบยังชีพ (Extensive method) เป็นการเลี้ยงเพื่อการบริโภคในครัวเรือนเป็นหลัก ซึ่งความหนาแน่นของการเลี้ยงคือ 5,000 - 20,000 ตัว/เฮกเตอร์ (0.5 - 2 ตัว/ตร.ม.) การเลี้ยงส่วนมากใช้วิธีใส่ปุ๋ยโดยไม่มีการให้อาหารเสริม

2. การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (Semi-intensive method) เป็นการเลี้ยงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคและจำหน่ายส่วนที่เหลือจากการบริโภค มีการให้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มอาหารธรรมชาติเพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับอาหารเสริมบ้างเล็กน้อย โดยความหนาแน่นปลาที่เลี้ยงคือ 20,000 - 40,000 ตัว/เฮกเตอร์ (2 - 4 ตัว/ตร.ม.)

3. การเลี้ยงแบบพัฒนา (Intensive method) เป็นการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์มากกว่าการเลี้ยงแบบยังชีพ โดยเน้นการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบความหนาแน่นสูง ซึ่งผลผลิตปลาต้องมีน้ำหนักและขนาดตัวปลาตามความต้องการของผู้บริโภค สำหรับอาหารที่ให้เป็นอาหารสำเร็จรูปโปรตีนสูงเป็นหลัก โดยทั่วไปเกษตรกรมักเลือกใช้เทคโนโลยีการแปลงเพศปลาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่คุ้มค่า และความหนาแน่นที่นิยมใช้ในการเลี้ยง คือ 40,000 – 100,000 ตัว/เฮกเตอร์ (4 - 10 ตัว/ตร.ม.)

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการบริโภคอาหารของปลาได้แก่

1. อุณหภูมิ ปลานิลสามารถบริโภคอาหารได้ดีที่อุณหภูมิน้ำสูงกว่า 24 °ซ. และหยุดบริโภคอาหารเมื่ออุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15 °ซ. โดยสามารถตายได้เมื่ออุณหภูมิเริ่มต่ำกว่า 8 °ซ.

2. ลักษณะสมบัติของน้ำ โดยน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายปริมาณสูงกว่า 3 มก./ล. ปลาสามารถบริโภคอาหารได้อย่างปกติ ถ้าหากปริมาณออกซิเจนลดลงการย่อยอาหารของปลาจะใช้เวลานานกว่าปกติ

3. ความถี่ของการให้อาหาร ปลาที่มีขนาดเล็กควรให้อาหารแต่ละครั้งในปริมาณที่น้อยแต่บ่อยครั้ง โดยปลาที่มีขนาดเล็กมีอัตราการเติบโตและอัตราการแลกเนื้อดีกว่าปลาขนาดใหญ่

ส่วนปัจจัยทางคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลมีดังนี้

1. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ โดยในบ่อเลี้ยงปลาค่าที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโตและถ้ามีปริมาณต่ำกว่า 1 มก./ล. สัตว์น้ำจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมง ซึ่งปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำในช่วง 0 - 0.4 มก./ล. โดยออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 0.3 มก./ล. ปลาจะว่ายขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของอาการเครียดและลดการเติบโต ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ผิวน้ำไม่ควรต่ำกว่า 0.3 มก./ล.

2. อุณหภูมิ ปลานิลสามารถทนอุณหภูมิได้ในช่วงกว้างคือ ที่อุณหภูมิ 11 – 42 °ซ. แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °ซ. หรือสูงกว่า 42 °ซ ปลาจะไม่สามารถอยู่ได้นานและอาจตายได้ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ. ปลาไม่มีการบริโภคอาหารและลดอัตราการเติบโต และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ. จะไม่มีการวางไข่ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโตอยู่ในช่วง 19 – 28 °ซ.

3. พีเอช ปลานิลสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ แต่ปลานิลเริ่มตายเมื่อน้ำมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.5 - 5.0 เฉลี่ยร้อยละ 70 และปลานิลสามารถตายจนหมดเมื่อมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3.5 - 4.5 ซึ่งปลานิลสามารถเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5 - 8.5

4. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากในสภาวะไร้อากาศ แบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆ ในรูปออกซิไดซ์ ซึ่งเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟอร์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ทั้งสามรูปแบบ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรซัลไฟด์อิออน (HS^-) และไบซัลไฟด์อิออน (S^{2-}) ซึ่งสัดส่วนแต่ละชนิดที่พบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ โดยน้ำที่มีค่าพีเอชสูงโอกาสการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำและความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะลดลง ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์คล้ายกับการขาดออกซิเจนแต่รุนแรงมากกว่า (ชลอ ลิ้มสุวรรณ, 2535) จากรายงานการวิจัยของสถาบันวิจัยการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (2533) และสถาบันวิจัยการเลี้ยงสัตว์น้ำจืด (2536) ที่อ้างถึงในพรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล (2538) กล่าวว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไปสกัดกั้นการแพร่ของออกซิเจนในเซลล์ โดยระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่ทำให้สัตว์น้ำตายอยู่ในช่วง 0.01 - 0.05 ส่วนในล้านส่วน และผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการของไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ (2528) พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ปลาตายได้ภายในเวลา 48 ชม. และระบุว่าในบ่อเลี้ยงปลาไม่ควรมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิน 0.002 มก./ล.

5. สภาพด่าง น้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลาควรมีสภาพด่างมากกว่า 20 - 40 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต /ล. (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) หรือควรอยู่ในช่วง 200 - 300 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต /ล. ในกรณีเติมปุ๋ยในบ่อเลี้ยงปลา (Wetzel, 2001 อ้างถึงใน Camargo และคณะ, 2005)

2.9 **ชีววิทยาผักกวางตุ้ง** (ธัญฐิติ มาแสง, 2553)

ผักกวางตุ้งเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Cruciferae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica pekinensis* และชื่อสามัญคือ Chinese cabbage โดยรูปที่ 2.13 แสดงลักษณะส่วนประกอบของผักกวางตุ้ง ซึ่งผักกวางตุ้งเป็นผักที่นิยมบริโภคกันมาก โดยบริโภคส่วนของใบและก้านใบ ปลูกง่ายและเติบโตรวดเร็ว อายุการเก็บเกี่ยวสั้น สามารถปลูกได้ทุกฤดูกาลและทุกพื้นที่ ผักกวางตุ้งเป็นผักที่ต้องการน้ำมากจึงควรมีการให้ปริมาณน้ำที่เพียงพอในแต่ละวัน และเร่งการเติบโตด้วยปุ๋ยยูเรีย หรือแอมโมเนียมซัลเฟต อัตราส่วน 5 กก./ไร่ หรือใส่ปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราส่วน 10 - 20 ก./ตร.ม. ผักกวางตุ้งสามารถเจริญได้ดีที่สุดในสภาพดินร่วนปนทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ด้วยสารอินทรีย์ ความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ระหว่าง 6 - 6.8 มีความชื้นเพียงพอและได้รับแสงแดดตลอดวัน สำหรับอุณหภูมิที่

เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 25 °ซ. ในการเตรียมดินเพาะปลูกควรขุดไถดินให้ลึกประมาณ 15 - 20 ซม. แล้วทำการตากดินทิ้งไว้ประมาณ 5 - 7 วัน ร่วมกับการผสมปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายได้ง่าย

รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะส่วนประกอบของผักกวางตุ้ง (*Brassica pekinensis*)

2.9.1 ส่วนประกอบของผักกวางตุ้ง

1. ราก เป็นระบบรากแก้วอยู่ในระดับตื้น มีรากแขนงแตกออกจากรากแก้วโดยแผ่อยู่ตามบริเวณผิวดิน

2. ลำต้น ตั้งตรงสีเขียวขนาดโตเต็มที่ใช้รับประทานได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.4 - 1.8 ซม. มีความสูงประมาณ 43 - 54 ซม.

3. ใบ ระยะเริ่มแรกประกอบด้วยใบเลี้ยงจำนวนสองใบสีเขียวปลายใบตรงกลางจะเว้าเข้า ส่วนใบจริงจะแตกเป็นกระจุกที่บริเวณโคนต้นเป็นใบเดี่ยว ใบเรียบไม่ห่อหัวสีเขียว ใบอ่อนมีสีเขียวอ่อน ขอบใบเป็นรอยฟันเลื่อย ใบแก่ผิวใบเรียบหรือเป็นคลื่นเล็กน้อยไม่มีขน ขอบใบเรียบหรืออาจมีรอยเว้าตื้นๆ ขนาดเล็ก โคนใบหยักเป็นคลื่นเล็กน้อย ปลายใบมน ก้านใบที่ติดกับลำต้นมีสีเขียวอ่อนเป็นร่องและเรียวกลมขึ้นไปหาแผ่นใบ ก้านใบหนาและมีสีขาวอมเขียว

4. เมล็ด ค่อนข้างกลมมีทั้งสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ ผิวเมล็ดมีลายแบบร่างแห น้ำหนักเมล็ด 1,000 เมล็ดหนักประมาณ 2.5 ก.

2.9.2 โรคและศัตรูพืชที่สำคัญของผักกวางตุ้ง (จิระเดช แจ่มสว่าง, 2547)

1. โรคกล้าเน่า ลักษณะอาการแบ่งได้เป็นสองระยะคือ อาการเน่าระยะก่อนงอกเมล็ดหรืองอกออกมาเล็กน้อยแล้วเน่าตายไปก่อนที่จะโผล่พ้นดินขึ้นมา ส่วนอาการเน่าระยะหลังงอกต้นกล้าที่งอกพ้นดินขึ้นมาแล้วมีแผลที่โคนต้นหักพับที่ระดับผิวดิน หรือเกิดการเหี่ยวเฉาตาย เชื้อโรคที่

เป็นสาเหตุของโรคนี้อาจปนเปื้อนมากับเมล็ดพันธุ์ หรืออาศัยอยู่ในดินและสามารถเจริญได้ดีที่มีความชื้นสูง

2. โรคราน้ำค้าง ลักษณะอาการคือ บริเวณใบเลี้ยงของต้นกล้าเกิดเป็นจุดช้ำ และต้นกล้าเน่ายุบ บนใบมีลักษณะเป็นแถบสีเหลืองและด้านหลังใบมีเส้นใยสีขาวเป็นกระจุก เมื่อมีการระบาดมากขึ้นแผลจะขยายออก เนื้อเยื่อจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและแห้งกรอบ สภาวะที่เหมาะสมต่อการระบาดของโรคนี้คือ อุณหภูมิและความชื้นสูง การเกิดโรคมีสาเหตุมาจากเมล็ดพันธุ์

3. โรคใบจุด ลักษณะอาการคือ เกิดจุดเล็กๆ บนต้นกล้าที่งอกใหม่และเน่าตาย ในระยะต้นโตใบจะเกิดเป็นจุดเล็กๆ ต่อมาแผลขยายออกเป็นวงกลมสีน้ำตาลหรือดำซ้อนกันหลายๆ ชั้นเนื้อเยื่อรอบๆ แผลเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เมื่อการระบาดมากขึ้นแผลจะเกิดการขยายติดกันทำให้เนื้อใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและใบแห้งกรอบ

4. หนอนใยผัก ลักษณะการทำลายเกิดจากผีเสื้อกลางคืนขนาดเล็กวางไข่บนใบและใต้ใบเกิดเป็นหนอนมีลำตัวยาวเรียวหัวท้ายแหลม ส่วนท้ายมีปุ่มยื่นออกเป็น 2 แฉก หนอนใยผักจะกัดกินใบและยอดผักกวางตุ้งตั้งแต่เริ่มงอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว สามารถพบการทำลายตามแหล่งปลูกผักกวางตุ้งและจะระบาดรุนแรงในช่วงฤดูร้อน

5. หนอนกระทู้ผัก ลักษณะการทำลายเกิดจากตัวเต็มวัยวางไข่เป็นกลุ่มสีน้ำตาลคล้ายฟางข้าวจำนวนมากตามใต้ใบผัก ระยะเริ่มแรกหนอนจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มกัดกินผิวใบ สำหรับระยะต่อมาจะเคลื่อนย้ายไปกัดกินที่ยอดใบและทุกส่วนของพืช โดยสร้างความเสียหายต่อพืชผักมาก เนื่องจากเป็นหนอนขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก

6. ด้วงหมัดผัก ลักษณะการทำลายเกิดจากตัวเต็มวัยของด้วงขนาดเล็กยาวประมาณ 2 มม. โดยจะกัดกินบริเวณโคนต้นหรือซากของผักทำให้ผักเกิดการเหี่ยวเฉาไม่สามารถเจริญเติบโตและตายในที่สุด เมื่อถูกรบกวนจะสามารถกระโดดและบินได้ไกลๆ ซึ่งมักพบการระบาดอยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือแหล่งปลูกผักเก่า

2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

มลวิภา ลือชัย (2540) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลด้วยระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง เพื่อการกำจัดแพลงก์ตอนพืชโดยแปรค่าอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 5 10 และ 20 ที่ผ่านการทดลองเลี้ยงปลานิลในระบบปิดจำนวน 4 บ่อ โดยแต่ละบ่อเลี้ยงปลานิลจำนวน 50 ตัว สำหรับบ่อแรกเป็นบ่อควบคุมที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำ ส่วนบ่อที่ 2 3 และ 4

ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการหมุนเวียนน้ำออกจากบ่อ และผันน้ำไปบำบัดต่อในถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่องในอัตราร้อยละ 5 10 และ 20 หรือเท่ากับ 21 42 และ 84 ล./วัน ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 25.6 - 33.4 °ซ. ส่วนค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 5 มก./ล. โดยในบ่อที่ 1 มีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุด นั่นคือการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลด้วยการกำจัดแพลงก์ตอนออกที่อัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 5 10 และ 20 ช่วยลดการสะสมของสารอินทรีย์และของเสียต่างๆ รวมทั้งสารที่เป็นพิษต่อปลา ซึ่งอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 20 มีประสิทธิภาพในการควบคุมระดับของสารอินทรีย์และของเสียให้เหลือสะสมอยู่ภายในบ่อน้อยที่สุดและมีผลผลิตของปลานิลสูงสุด ส่วนอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 10 และ 5 มีประสิทธิภาพรองลงมา

ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์ (2544) ศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในตู้เลี้ยงปลาน้ำจืดระบบปิดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน โดยใช้เชื้อแบคทีเรียที่ตรึงอยู่บนแผ่นตรึงเซลล์โพลิเอสเทอร์ ผลการทดลองพบว่าควรใช้ปริมาณแผ่นตรึงเซลล์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 3 ของปริมาณน้ำในถังที่บำบัดจึงจะสามารถลดปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ในถังบำบัดได้เกือบร้อยละ 100 ภายในระยะเวลา 1 วัน จากระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้น 5 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อทดลองนำแผ่นตรึงเซลล์มาใช้ในการบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ในตู้ปลา พบว่าสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับ 0.10±0.02 และ 0.07±0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งหลังจากการบำบัดพบว่าในตู้ปลามีปริมาณไนเทรตสะสมอยู่มาก จึงต้องบำบัดต่อด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน โดยระบบหมุนเวียนน้ำที่มีอัตราการไหล 12 ล./วัน มีระยะเวลากักเก็บน้ำ 0.4 วัน และเมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเทรตที่เหมาะสมในการทดลองคือ 33.76 มก.-ซีโอดี/มก.-ไนเทรต-ไนโตรเจน ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตมากกว่าร้อยละ 98 และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกลูโคสจะสามารถบำบัดไนเทรตได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีปริมาณคาร์บอนส่วนเกินเหลืออยู่ในถังบำบัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเลี้ยงปลา

2.10.2 อิทธิพลของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์ (2554) ศึกษาการพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยทำการเลี้ยงปลานิลในโรงเรือนที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. และให้อาหารในอัตราร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลาต่อวัน การศึกษาผลของตะกอนแขวนลอยต่อคุณภาพน้ำเลี้ยงปลานิล พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนไทรต์เพิ่มสูงขึ้นในระดับที่เป็นอันตรายต่อปลานิล โดยอัตราการรอดตายของปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับร้อยละ 85.9 สำหรับปริมาณตะกอนแขวนลอยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 956±1.2 มก./ล. หลังจากนั้นจึงได้ออกแบบหน่วย

แยกตะกอนจำนวน 5 รูปแบบ คือ ตัวแยกตะกอนแบบถังที่ไม่มีวัสดุบรรจุภายใน ตัวแยกตะกอนแบบตัวกรองพลาสติก BCN-009 ตัวแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นแบบแผ่นกลม ตัวแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นรูปกรวยคว่ำ และตัวแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นรูปกรวยหงาย พบว่าหน่วยแยกตะกอนที่บรรจุแผ่นกั้นภายในรูปวงกลม 8 ชั้น มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยได้ดีที่สุดที่อัตราการไหล 180 ล./ชม. โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 71.3±2.4 นอกจากนี้เมื่อนำหน่วยแยกตะกอนดังกล่าวไปใช้งานร่วมกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน พบว่าเมื่อมีการเปิดใช้งานหน่วยแยกตะกอนและเติมเมทานอลสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรตให้มีค่าต่ำกว่า 0.4 0.6 และ 15.9 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ รวมทั้งปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำตลอดการทดลองเท่ากับ 35 มก./ล. นอกจากนี้การควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำให้อยู่ในช่วง 300 – 500 มก./ล. สามารถช่วยบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

Rafiee และ Saad (2005) ศึกษาปริมาณสารอาหารและการสร้างตะกอนแขวนลอยในช่วงการเติบโตที่แตกต่างกันของปลาทับทิม (*Oreochromis* sp.) ภายในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน โดยการเริ่มทดลองเลี้ยงปลาทับทิมจำนวน 75 ตัว เป็นเวลา 3 สัปดาห์ จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มน้ำหนักปลาทับทิมออกเป็น 5 ช่วงได้แก่ 20 40 80 120 และ 180 ก. จากผลการทดลองพบว่า ตลอดช่วงระยะเวลาการเลี้ยงธาตุอาหารต่างๆ ที่สะสมในตัวปลาทับทิมของทั้ง 5 กลุ่มน้ำหนักเกิดจากอาหารที่ให้ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดังนี้ เหล็กร้อยละ 11.46 สังกะสีร้อยละ 13.43 แมงกานีสร้อยละ 6.81 ทองแดงร้อยละ 3.55 แคลเซียมร้อยละ 26.81 แมกนีเซียมร้อยละ 20.29 ไนโตรเจนร้อยละ 32.53 โพแทสเซียมร้อยละ 7.16 และฟอสฟอรัสร้อยละ 15.98 สำหรับร้อยละการกำจัดธาตุอาหารในตะกอนแขวนลอยด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์มีค่าเฉลี่ยคือ เหล็กร้อยละ 23.93 แมงกานีสร้อยละ 86.05 สังกะสีร้อยละ 46.17 ทองแดงร้อยละ 21.49 แคลเซียมร้อยละ 15.71 แมกนีเซียมร้อยละ 88.87 ไนโตรเจนร้อยละ 5.55 โพแทสเซียมร้อยละ 5.85 และฟอสฟอรัสร้อยละ 17.90 นั่นคืออาหารปลาที่ให้ส่งผลต่อการสะสมของตะกอนแขวนลอยที่มีธาตุอาหารต่างๆ อยู่ภายใน สำหรับความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียมในน้ำของกลุ่มน้ำหนักปลาทั้ง 5 ช่วงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่มวลน้ำหนักแห้งของตะกอนแขวนลอยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าพีเอชทั้ง 5 ช่วงน้ำหนักปลามีค่าลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

Azim และ Little (2008) ศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงสัตว์น้ำภายใต้โรงเรือนที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำ ส่วนประกอบของตะกอนแขวนลอย และสุขภาพของปลานิล โดยมีแสงเป็นปัจจัยจำกัด ทำการทดลองในถังขนาด 250 ล. และศึกษาเปรียบเทียบสามรูปแบบ คือ ถังที่มีตะกอนแขวนลอยให้อาหารโปรตีนร้อยละ 35 ถังที่มีตะกอนแขวนลอยให้อาหารโปรตีน

ร้อยละ 24 และถังควบคุมไม่มีตะกอนแขวนลอยให้อาหารโปรตีนร้อยละ 35 ซึ่งในแต่ละถังเลี้ยงปลานิลมีน้ำหนักรวม 3 กก. และมีการควบคุมของแข็งแขวนลอยทั้งหมดให้อยู่ในช่วง 500 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า ถังที่มีตะกอนแขวนลอยผลผลิตของปลาสูงกว่าร้อยละ 45 โดยปลาสามารถใช้ตะกอนภายในถังเป็นอาหาร ซึ่งการให้อาหารโปรตีนร้อยละ 35 และ 24 การเติบโตของปลาไม่แตกต่างกัน สำหรับดัชนีบ่งชี้สุขภาพของปลาได้แก่ ปัจจัยเกี่ยวกับครีบปลา เนื้อเยื่อเหงือก และค่าเม็ดเลือดแดงอัดแน่น (Haematocrit) ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างถังที่มีตะกอนแขวนลอยและถังควบคุม ดังนั้นการเกิดตะกอนแขวนลอยภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถประยุกต์ใช้เป็นแหล่งอาหารสำหรับพืชผักเนื่องจากมีธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเติบโต

Vanitchanai และคณะ (2009) ศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในการควบคุมปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจน และลักษณะของตะกอนแขวนลอยในระหว่างการเลี้ยงปลานิลระบบปิดในระบบแขวนลอย โดยศึกษาผลของการเติมแป้งมันสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนและอาหารปลานิลเป็นแหล่งไนโตรเจนลงในถังเลี้ยงทุกวันที่อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 พบว่าสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ได้ดีกว่าชุดควบคุมที่เติมอาหารปลาเพียงอย่างเดียว แต่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 1,118 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยน้ำภายในระบบต้องปรับสภาพให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและเกิดตะกอนแขวนลอยที่สมบูรณ์ ซึ่งลักษณะของตะกอนแขวนลอยที่พบในชุดควบคุมและชุดทดลองมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นเส้นใย โรติเฟอร์ หนอนตัวกลมและสาหร่าย สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกอนแขวนลอยจากชุดทดลองพบว่า มีสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนร้อยละ 34.5 และ 4.2 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ในขณะที่ตะกอนแขวนลอยของชุดควบคุมมีสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนร้อยละ 21.7 และ 2.19 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

Nootong และคณะ (2011) ศึกษาผลของการเพิ่มอินทรีย์คาร์บอนในการควบคุมความเข้มข้นของอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบไบโอฟล็อก ด้วยการเติมแป้งมันสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอน และเติมอาหารปลานิลเป็นแหล่งไนโตรเจนลงในถังเลี้ยงทุกวันที่อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ให้อาหารปลาเพียงอย่างเดียวทุกวัน พบว่าชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการควบคุมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของระบบเลี้ยงปลานิลได้ดีกว่าชุดควบคุม โดยถังชุดควบคุมปลาเริ่มตายเมื่อทำการทดลองได้ 5 สัปดาห์ กระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นผลจากกระบวนการดูดซึมและไนทริฟิเคชันของตะกอน สำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ใช้เวลา 6 - 7 สัปดาห์ เมื่อจัดทำสมดุลไนโตรเจนของชุดทดลองพบว่า ไนโตรเจนที่เข้าระบบทั้งหมดมาจากอาหารปลาร้อยละ 99 ไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นเนื้อ

ปลาร้อยละ 33 ละลายน้ำในรูปไนเทรตร้อยละ 22 ตะกอนแขวนลอยร้อยละ 13 และส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ร้อยละ 32 ซึ่งเป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญหายจากระบบ โดยระบบนี้มีข้อจำกัดคือต้องมีการควบคุมของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 500 มก./ล.

2.10.3 สมดุลของสารอาหารและสภาวะที่เหมาะสมในระบบอะควาโปนิกส์

Johnson และ Wardlow (1997) ศึกษาต้นแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำร่วมกับระบบการปลูกผักโดยไม่ใช้ดิน โดยพบว่าผลผลิตของปลาและพืชมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นมาจากโปรตีนในอาหารเลี้ยงปลาและสิ่งขับถ่ายจากปลาที่มีความเข้มข้นสูงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปลา แต่สารอาหารที่เกิดขึ้นภายในระบบเลี้ยงปลาสามารถใช้เป็นอาหารของพืชในการเติบโตได้ และการออกแบบระบบอะควาโปนิกส์ควรมีการควบคุมปริมาณความเข้มแสง อุณหภูมิ ความชื้น และปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ให้เหมาะสม ซึ่งจะทำให้พืชสามารถใช้ประโยชน์จากสารละลายอาหารและตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการเติบโตได้อย่างสมบูรณ์

Seawright และคณะ (1998) ทำการศึกษาจนพลศาสตร์ของธาตุอาหารในระบบการเกษตรแบบผสมผสานระหว่างเลี้ยงสัตว์น้ำและระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยเลี้ยงปลานิลในน้ำปริมาตร 320 ล. สำหรับชุดควบคุมไม่มีการเลี้ยงปลานิล ส่วนชุดทดลองทำการเลี้ยงปลานิลที่มีน้ำหนักรวมดังนี้ 151 377 902 และ 1,804 ก. โดยให้อาหารอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลา/วัน เป็นระยะเวลา 28 วัน และในช่วงระหว่างการทดลองทำการเติมสารละลายธาตุอาหารสำเร็จรูป เช่น แคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส ไนเทรต โซเดียม ฟอสฟอรัส และสังกะสี ที่สัมพันธ์กับชีวมวลของปลานิล ทำการเดินระบบด้วยอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 100 สำหรับระบบไฮโดรโปนิกส์ทำการปลูกผักกาดหอม (*Lactuca satiła longifolia* cv. Jericho) เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า มีไนโตรเจนสะสมในตัวปลาร้อยละ 37 ผักกาดหอมมีไนโตรเจนสะสมร้อยละ 4.5 และมีค่าความชื้นร้อยละ 90 ซึ่งจากการทดลองจะต้องมีการปรับความเข้มข้นของแคลเซียม ทองแดง เหล็ก และสังกะสี เนื่องจากในอาหารปลาและสิ่งขับถ่ายของปลามีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเติบโตของผักกาดหอม นั่นคือความเข้มข้นของสารอาหารที่เกิดขึ้นในระบบแตกต่างกันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสารอาหารที่สร้างขึ้นโดยปลาและการดูดซึมด้วยพืช โดยปริมาตรของถังเลี้ยงสัตว์น้ำต่อระบบไฮโดรโปนิกส์ที่เหมาะสมคือ 3:1 ซึ่งชุดการทดลองเลี้ยงปลาน้ำหนักรวม 902 ก. ให้ผลผลิตของปลาและพืชสูงสุด

Gross และคณะ (2000) ศึกษาการเปลี่ยนรูปและสมดุลไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงปลานิล โดยทดลองเลี้ยงลูกปลานิลในบ่อเลี้ยงขนาด 440 ตร.ม. จำนวน 550 ตัว และให้อาหารเข้าระบบซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25.5 - 35.2 ผลการทดลองพบว่า เมื่อให้อาหารร้อยละ 93.4 จะมีไนโตรเจนสะสมในตัวปลาร้อยละ 31.5 โดยไนโตรเจนในตะกอนและน้ำเลี้ยงปลาสูญเสียไปกับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันร้อยละ 17.4 การระเหยของแอมโมเนียร้อยละ 12.5 และเหลือสะสมในตะกอนร้อยละ 22.6 ซึ่งระบบทั่วไปการให้อาหารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสามารถเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้เฉลี่ย 59 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ย 70 และ 38 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน ตามลำดับ โดยแพลงก์ตอนพืชสามารถช่วยกำจัดไนเทรตได้เฉลี่ย 24 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม.-วัน

Endut และคณะ (2010) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราการรับภาระทางชลศาสตร์และอัตราส่วนของพืชในระบบการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่แบบอะควาโปนิกส์ ซึ่งทำการทดลองเลี้ยงปลาดุกแอฟริกา (*Clarias gariepinus*) ให้อาหารเม็ดร้อยละ 2 - 4 วันละ 2 ครั้ง ร่วมกับการปลูกผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) โดยการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Recirculation aquaculture system : RAS) ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้อยู่ในช่วง 27.5 - 28.8 °ซ. และพีเอช 5.6 - 7.3 โดยทำการศึกษาอัตราการรับภาระทางชลศาสตร์ (HLR) ที่ 0.64 1.28 1.92 2.56 และ 3.20 ม./วัน จากผลการทดลองพบว่า ผลผลิตของปลาไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่อัตราการรับภาระทางชลศาสตร์ต่างกัน แต่ที่อัตราการรับภาระทางชลศาสตร์สูงผลผลิตของผักบุ้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการรับภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.28 ม./วัน สำหรับอัตราส่วนของปริมาณอาหารปลาต่อพื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสมคือ 15 - 42 ก./ตร.ม. หรือจำนวนปลาต่อจำนวนต้นพืชที่ปลูกเป็น 1 : 8

2.10.4 การใช้ตัวกรองในการรองรับสารอาหารของระบบปลูกพืช

พิมล เกษสยม (2534) ศึกษาอิทธิพลของสารละลายธาตุอาหารและปุ๋ยต่อการเติบโต ผลผลิต และความเข้มข้นของธาตุอาหารในพริกชี้ฟ้า คะน้า และผักกาดหัวที่ปลูกในวัสดุปลูกชนิดตั้งและถุงนอนโดยบรรจุวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขุยมะพร้าว ขุยมะพร้าวผสมทราย แกลบผสมขุยมะพร้าว และแกลบ ผลการทดลองพบว่า พริกชี้ฟ้าที่ปลูกในถุงนอนสามารถเติบโตได้ดีทางด้านความสูง การปลูกในแกลบผสมทรายจะให้การเติบโตและผลผลิตต่ำกว่าวัสดุอื่นๆ ซึ่งการผสมปุ๋ยในอัตรา 40 ก./วัสดุ 15 กก. ช่วยเร่งการเติบโตและเพิ่มผลผลิตพืชได้ สำหรับการทดลองปลูกผักกาดหัวและผักคะน้าโดยให้สารละลายธาตุอาหาร พบว่าการปลูกในขุยมะพร้าวผสมทรายและขุยมะพร้าวให้ผลผลิตมากที่สุด แต่การปลูกในแกลบให้ผลผลิตต่ำที่สุด เมื่อ

เปรียบเทียบการคลุกปุ๋ยเม็ดกับการให้สารละลายธาตุอาหาร พบว่าการให้สารละลายธาตุอาหารจะมีผลผลิตของผักกาดหัวและผักคะน้าในปริมาณสูงกว่า

ศิริอร แก้วโบราณ (2544) ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์แบบไม่หมุนเวียนน้ำโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลทราย ด้วยการศึกษาอัตราส่วนน้ำทิ้งต่อน้ำประปาดังนี้ 0:100 25:75 50:50 75:25 และ 100:0 รวมทั้งหาปริมาณการสะสมของปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล ร่วมกับธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม สำหรับวัสดุปลูกในการทดลอง ได้แก่ ทราย ขุยมะพร้าว ขี้เลื่อย และขี้เถ้าแกลบ ซึ่งผลการทดลองพบว่าน้ำทิ้งร้อยละ 100 มีการสะสมของโครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว รวมทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากที่สุด ส่วนทองแดง นิกเกิล แคลเซียม และแมกนีเซียมพบในผักกาดหอมที่ปลูกในน้ำประปามากที่สุด สำหรับการสะสมโครเมียมพบในวัสดุปลูกขุยมะพร้าว ส่วนตะกั่วและทองแดงพบในวัสดุปลูกขี้เถ้าแกลบ วัสดุปลูกทรายและขี้เลื่อยพบนิกเกิลที่สะสมในผักกาดหอม โดยผักกาดหอมที่ปลูกในขุยมะพร้าวมีการสะสมของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสูงสุด ดังนั้นการปลูกในขุยมะพร้าวจึงเหมาะสมกว่าการปลูกในวัสดุปลูกอื่นๆ ส่วนการสะสมธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียมพบในวัสดุปลูกขี้เลื่อย ส่วนผลการทดลองการตอบสนองทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมพบว่าการปลูกในน้ำทิ้ง/น้ำประปาที่อัตรา 50:50 การเติบโตส่วนยอด อัตราการเติบโต ความกว้างใบ พื้นที่ทรงพุ่ม ดัชนีพื้นที่ใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด แต่ไม่พบความแตกต่างของศักย์ของน้ำและการเปิดของปากใบในน้ำทิ้งทุกอัตรา

สุฤทธิ์ สมบูรณ์ชัย และคณะ (2551) ศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพเพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ โดยการหมุนเวียนน้ำเข้าสู่ระบบกำจัดตะกอนและระบบกรองชีวภาพที่เปรียบเทียบโดยใช้วัสดุกรองอิฐ วัสดุกรองถ่าน วัสดุกรองโฟม และวัสดุกรองไม้ไผ่ ซึ่งปล่อยปลาน้ำหนักเฉลี่ย 25.60±0.10 25.55±0.45 20.55±0.40 และ 22.60±0.07 ก. ตามลำดับ ร่วมกับการปลูกผักสลัดแก้ว 25 ต้น/บ่อ ผลการทดลองพบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองน้ำหนักของปลารวมในแต่ละบ่อเพิ่มขึ้น 9.13 7.58±0.12 5.59±0.87 และ 8.52±0.34 กก. ตามลำดับ ส่วนผลผลิตรวมของผักสลัดแก้วคือ 9.71±0.40 6.44±0.12 7.35±0.87 และ 7.20±0.34 กก. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไทรต์-ไนโตรเจน ไนเทรต-ไนโตรเจน บีโอดี การนำไฟฟ้าจำเพาะ และคลอโรฟิล-เอ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นคือวัสดุกรองอิฐมีประสิทธิภาพในการกรองมากกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ

McMurtry และคณะ (1993) ศึกษาการปลูกมะเขือเทศโดยใช้น้ำทิ้งจากระบบหมุนเวียนของบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งทำการปลูกมะเขือเทศในวัสดุปลูกจำนวน 4 ต้น/ตร.ม. ทำการหมุนเวียนน้ำจากระบบเลี้ยงปลาเข้าสู่ถังปลูกพืชวันละ 8 ครั้ง และมีการเติมธาตุอาหารเล็กน้อยโดยวัสดุปลูกและต้นพืชจะทำหน้าที่กรองสารอินทรีย์และหมุนเวียนน้ำส่วนที่เหลือกลับสู่ระบบเลี้ยงปลา จากผลการทดลองพบว่า เนื้อเยื่อพืชสามารถสะสมความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียมอย่างสม่ำเสมอ ส่วนแคลเซียมพบว่ามีปริมาณสูง แต่ซัลเฟอร์จะพบในปริมาณต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่สูงเกินไปจะส่งผลให้การเติบโตของพืชลดลง

Adams (1994) ศึกษาธาตุอาหารของแตงกวา และมะเขือเทศที่ปลูกบน Rockwool ในโรงเรือนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน โดยทำการฉีดละอองน้ำเพื่อเพิ่มความชื้น และเติมโซเดียมคลอไรด์ในสารละลายธาตุอาหารที่มีส่วนประกอบดังนี้ ไนโตรเจน 175 - 200 มก./ล. ฟอสฟอรัส 30 - 40 มก./ล. โพแทสเซียม 350 - 400 มก./ล. แคลเซียม 175 - 200 มก./ล. แมกนีเซียม 70 - 80 มก./ล. เหล็ก 10 - 12 มก./ล. แมงกานีส 0.7 - 1.0 มก./ล. โบรอน 0.4 - 0.5 มก./ล. สังกะสี 0.4 - 1.0 มก./ล. ทองแดง 0.2 - 0.3 มก./ล. และโมลิดินัม 0.05 - 0.1 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า การดูดซับสารอาหารของแตงกวาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมส่งผลต่อการสุกของมะเขือเทศอย่างสม่ำเสมอขึ้น โดยความเข้มแสงและอุณภูมิที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์ต่อการดูดซับน้ำและสารอาหารไนโตรเจนและโพแทสเซียมของพืช

Yoshida และคณะ (1996) ทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีปริมาณออกซิเจนเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.01 0.10 และ 0.20 มิลลิโมล โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25°ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และระยะเวลารับแสง 12 ชม./วัน ผลการทดลองพบว่า การปลูกพืชในสภาวะที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำรากและใบจะถูกจำกัดการเจริญ โดยออกซิเจนที่ระดับความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมล จะจำกัดการเปิดของใบและลดปริมาณน้ำในใบ

Wilson และ Brian (2006) ทำการเปรียบเทียบระบบกึ่งไฮโดรโปนิกส์แบบชั้นกรวด แพลอยน้ำ และการปลูกพืชบนสารละลาย (NFT) ในระบบอะควาโปนิกส์ โดยการทดลองใช้ปลาเมอร์เลย์คอด (*Maccullochella peelii*) และผักสลัด (*Lactuca sativa*) ผลการทดลองพบว่า ปลามีค่าเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) อัตราการเติบโตจำเพาะ (SGR) และชีวมวลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกการทดลอง และผลผลิตของผักสลัดเฉลี่ยเท่ากับ 5.05 4.47 และ 4.13 กก./ตร.ม. ตามลำดับ นอกจากนี้การบำบัดด้วยการปลูกพืชบนสารละลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเทรตอย่างมีนัยสำคัญน้อยกว่าการบำบัดอีกสองรูปแบบ ขณะที่การกำจัดฟอสฟอรัส

ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือระบบกึ่งไฮโดรโปนิกส์แบบการปลูกพืชบนสารละลายมีประสิทธิภาพน้อยกว่าอีกสองรูปแบบในการกำจัดสารอาหารจากน้ำเลี้ยงปลา โดยระบบกึ่งไฮโดรโปนิกส์แบบชั้นกรวดและแพลอยน้ำให้ผลผลิตที่สูงในสภาพแวดล้อมแบบอะควาโปนิกส์

Graber และ Junge (2009) ศึกษาระบบอะควาโปนิกส์ด้วยการหมุนเวียนสารอาหารจากบ่อเลี้ยงปลา และศึกษาอัตราการเติบโตของพืชที่ปลูกได้แก่ มะเขือยาว มะเขือเทศ และแตงกวา โดยปลูกบนวัสดุตัวกลางชนิด Light-expanded clay aggregate (LECA) ที่มีความหนาของชั้น 30 ซม. ร่วมกับการหมุนเวียนสารอาหารจากบ่อปลาที่มีการให้อาหารร้อยละ 4 ของน้ำหนักปลาต่อวัน โดยทำการเปรียบเทียบกับระบบไฮโดรโปนิกส์ที่ให้สารละลายอาหารสำเร็จรูปที่มีอัตราการไหล 5 ลบ.ม./ชม. ผลการทดลองพบว่า มะเขือเทศที่ปลูกในระบบอะควาโปนิกส์มีอัตราการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมได้ 0.43 0.07 และ 0.4 ก./ตร.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 69 สำหรับฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสามารถกำจัดได้ร้อยละ 100 ส่วนระบบไฮโดรโปนิกส์มีอัตราการกำจัดสารอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมได้ 0.52 0.11 และ 0.8 ก./ตร.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งการทดลองอยู่ในช่วงสภาพอากาศที่ร้อนจึงส่งผลให้ผลการทดลองของมะเขือยาวและแตงกวามีความผันผวน

2.11 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า

2.11.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำต้องมีการกำจัดแพลงก์ตอนพืชออกจากน้ำหมุนเวียนก่อนทำการบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถช่วยลดการสะสมของสารอินทรีย์และของเสียต่างๆ รวมทั้งสารที่เป็นพิษต่อปลา และพบว่าอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 20 มีประสิทธิภาพในการควบคุมระดับของสารอินทรีย์และของเสียให้เหลือสะสมอยู่ภายในบ่อน้อยที่สุดและให้ผลผลิตของสัตว์น้ำสูงสุด สำหรับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้แผ่นตรึงเซลล์ทำให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันที่เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ตามลำดับ จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนไนเทรตให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจน โดยต้องมีแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมจึงจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนอย่างสมบูรณ์และลดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

2.11.2 อิทธิพลของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

สำหรับการควบคุมปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน ควรให้มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 จะสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับการดูดซึมของตะกอนภายในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะส่งผลให้เกิดตะกอนแขวนลอยในปริมาณที่สูง และมีปริมาณจุลชีพในระบบหลากหลายชนิด นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตะกอนแขวนลอยยังมีผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ รวมทั้งปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่มากเกินไปส่งผลต่อการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ระดับ 300 – 500 มก./ล. มีส่วนช่วยในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน โดยการให้อาหารปลาเข้าระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในแต่ละวันจะส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุอาหารหลักและอาหารรองภายในตัวปลา น้ำเลี้ยงปลา และตะกอนแขวนลอยตลอดช่วงการเลี้ยง จึงสามารถประยุกต์ใช้น้ำและตะกอนแขวนลอยเพื่อเป็นแหล่งอาหารสำหรับการปลูกพืชเนื่องจากมีธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเติบโตของพืชผัก

2.11.3 สมดุลของสารอาหารและสภาวะที่เหมาะสมในระบบอะควาโปนิกส์

โดยทั่วไปอัตราการให้อาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน เมื่อคิดอาหารที่เข้าสู่ระบบในรูปไนโตรเจนเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์พบว่า ไนโตรเจนจะสะสมในตะกอนมากที่สุด รองลงมาคือ สะสมในตัวปลา ที่เหลือจะสูญเสียไปกับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และระเหยไปในรูปแอมโมเนีย ตามลำดับ สำหรับระบบโดยทั่วไปที่ทำการให้อาหารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ พบว่าไนโตรเจนเหล่านั้นสามารถเปลี่ยนรูปผ่านกระบวนการต่างๆ ทางชีวภาพได้ เช่น กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชัน ทำให้พบสารประกอบไนโตรเจนรูปต่างๆ ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำคือ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ดังนั้นเมื่อทำการหมุนเวียนน้ำเข้าสู่ระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินจึงเกิดการดึงไนโตรเจนเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์โดยกระบวนการดูดซึมของรากพืช ในบางครั้งถ้าหากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณสารอาหารที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช อาจจำเป็นต้องเติมสารอาหารสำเร็จรูปเพิ่มเติม นั่นคือระบบอะควาโปนิกส์เป็นความสัมพันธ์ของสารอาหารที่สร้างขึ้นจากปลาและการดูดซึมสารอาหารด้วยพืชร่วมกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยอัตราการรับภาระทางชลศาสตร์มีความสำคัญต่อระบบอะควาโปนิกส์ ดังนั้นในการเดินระบบจะต้องควบคุมพารามิเตอร์ดังกล่าวให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลในการหมุนเวียนธาตุอาหารไนโตรเจนระหว่างการปลูกพืชและการเลี้ยงสัตว์น้ำ

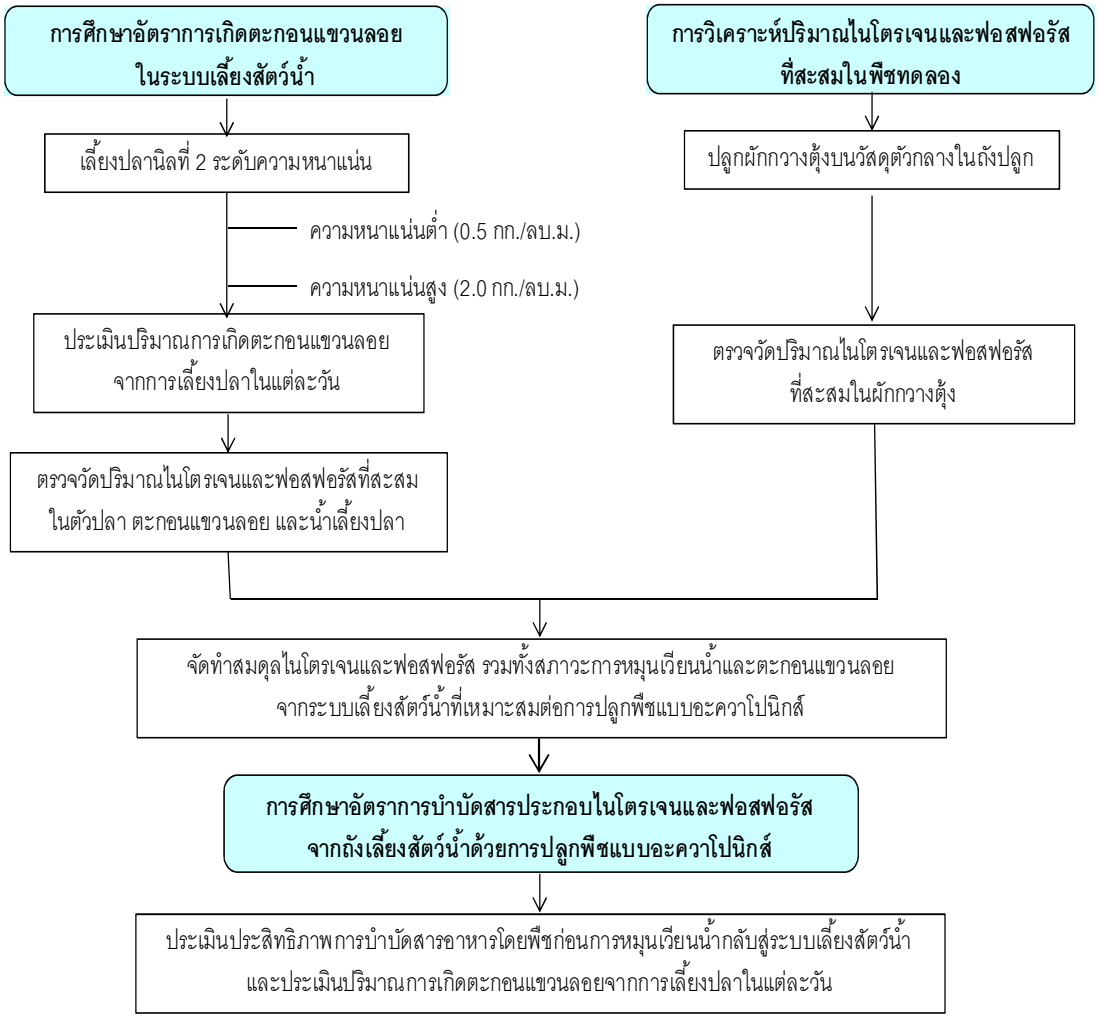
2.11.4 การใช้ตัวกรองในการรองรับสารอาหารของระบบปลูกพืช

จากรายงานวิจัยพบว่ามีการใช้วัสดุปลูกหลายชนิดในการรองรับรากพืชและเป็นวัสดุตัวกลาง โดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุอินทรีย์ เช่น ทราย ขุยมะพร้าว ขี้เลื่อย ขี้เถ้าแกลบ อิฐ ถ่าน โฟม และไม้ไผ่ เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่แตกต่างกันจะให้ผลผลิตพืชแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพในการกรองต่างกัน โดยอาจพบการสะสมของโลหะหนักได้ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุปลูกบางชนิดที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการความร้อนสูงสามารถใช้เป็นวัสดุปลูกได้ดีกว่าวัสดุสารอินทรีย์ เนื่องจากมีการสะสมของโลหะหนักในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ มีความพรุนที่สูง และสามารถกำจัดธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งให้ผลผลิตของพืชในปริมาณที่สูง ดังนั้นวัสดุปลูกที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการความร้อนสูงจึงเหมาะสมต่อการปลูกพืชในระบบอะควาโปนิกส์ ซึ่งเป็นระบบผสมผสานระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำและการปลูกพืช สำหรับการเลือกใช้วัสดุตัวกลางและรูปแบบการปลูกพืชที่แตกต่างกันจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณผลผลิตปลาและพืชผักที่ได้

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ด้วยการผันน้ำและตะกอนอินทรีย์แขวนลอยจากการขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำและอาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำเข้าสู่ระบบการปลูกพืชในสัดส่วนที่พอเหมาะ เพื่อให้พืชสามารถนำสารอาหารต่างๆ เหล่านั้นไปใช้ในการเติบโตได้อย่างสมดุล โดยในงานวิจัยได้ทำการตรวจวัดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวสัตว์น้ำ เนื้อเยื่อพืช และในน้ำเลี้ยงสัตว์น้ำ รวมทั้งอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์ และประเมินประสิทธิภาพการบำบัดคุณภาพน้ำของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำระบบปิด ซึ่งแนวทางการวิจัยทั้งหมดที่ทำการทดลองสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



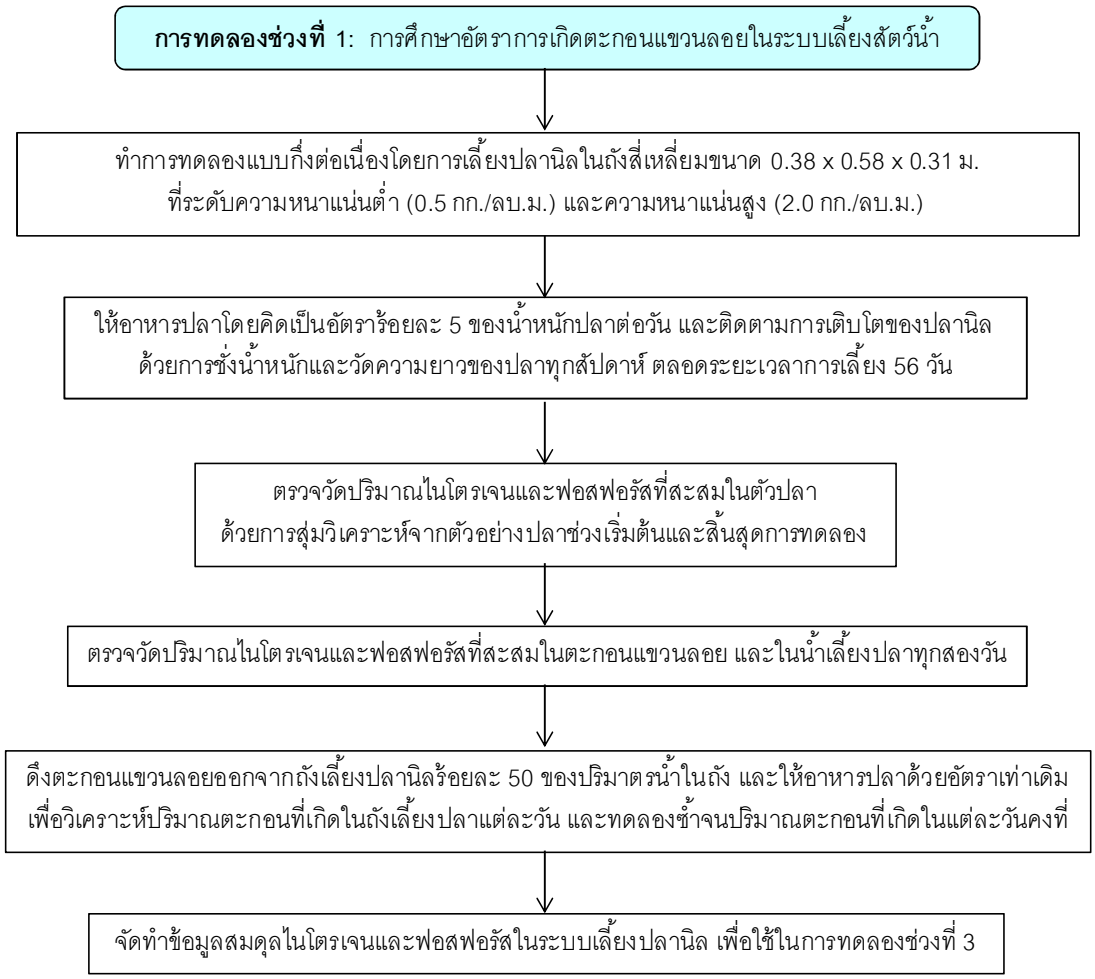
รูปที่ 3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

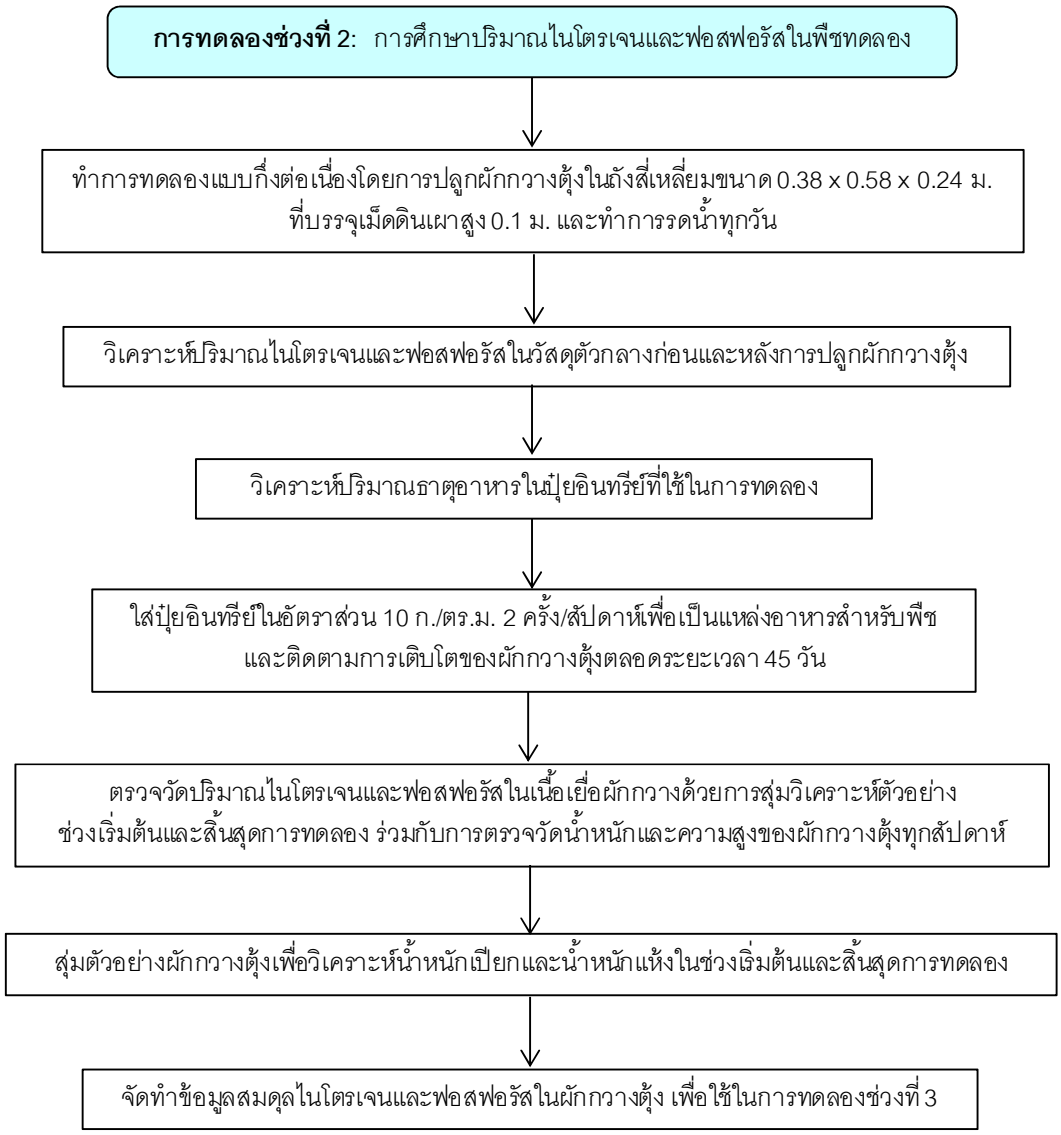
การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ในถังสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 45 ล. และตั้งอยู่ในโรงเรือน เพื่อใช้ประเมินปริมาณการเกิดตะกอนแขวนลอยของการเลี้ยงปลานิลในแต่ละวัน รวมทั้งปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมภายในตัวปลา ตะกอนแขวนลอย และน้ำเลี้ยงปลาที่มีความเหมาะสมต่อการเติบโตของพืชสำหรับการทดลองต่อไป ดังรายละเอียดแสดงในแผนผังรูปที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในพืชทดลอง โดยการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุปลูกในถังสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.24 ม. ที่บรรจุเม็ดดินเผาสูงประมาณ 0.10 ม. และตั้งอยู่ในโรงเพาะชำที่แสงส่องผ่านได้ รวมทั้งมีอากาศถ่ายเทได้อย่างสะดวก เพื่อใช้เป็นข้อมูลการสะสมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของผักกวางตุ้งสำหรับการทดลองต่อไป ดังรายละเอียดแสดงในแผนผังรูปที่ 3.3

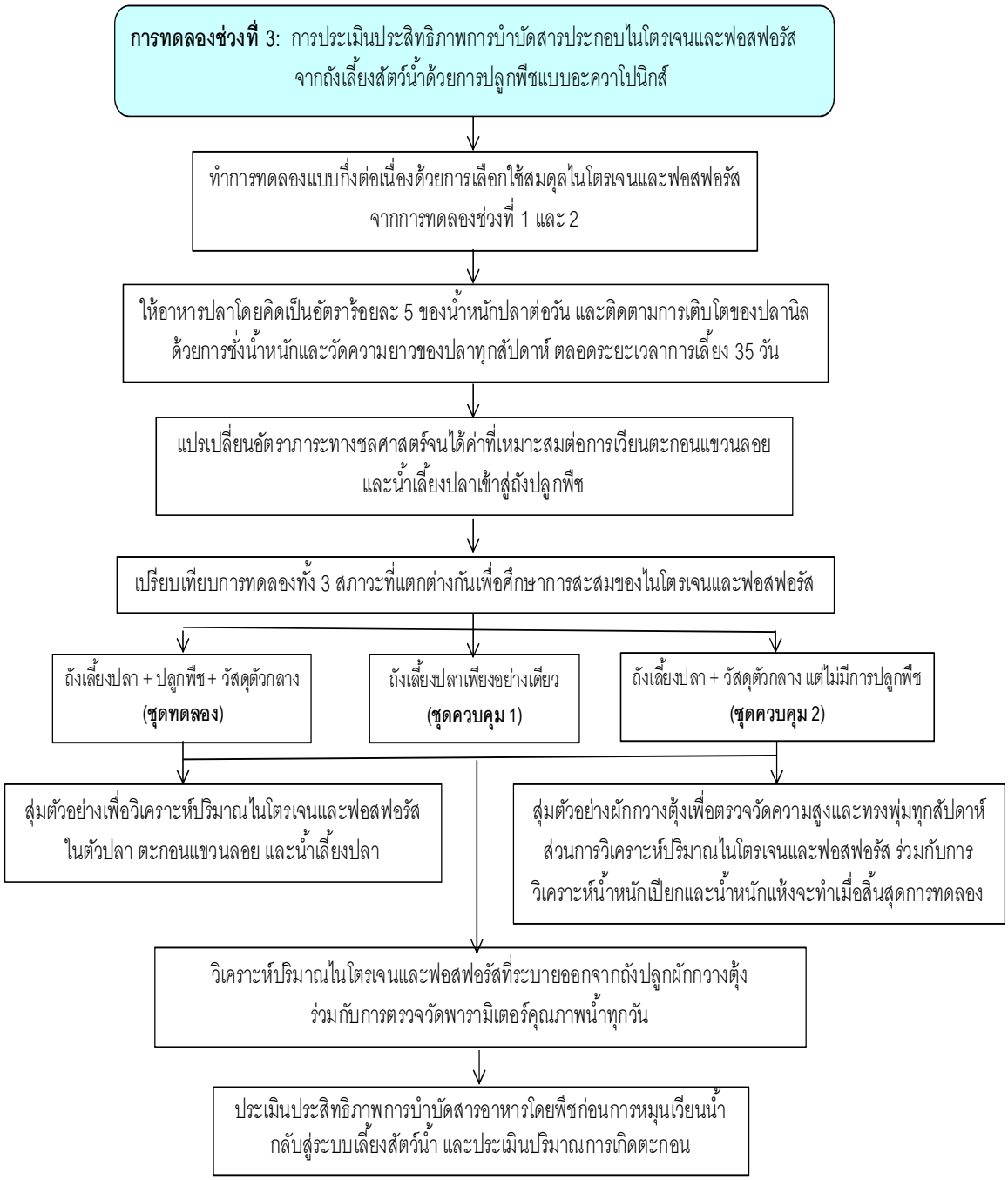
การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาแบบอะควาโปนิกส์ ซึ่งดำเนินการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยนำข้อมูลอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมภายในตัวปลา ตะกอนแขวนลอย และน้ำเลี้ยงปลาจากการทดลองช่วงที่ 1 และปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่พืชใช้ในการสังเคราะห์เซลล์จากการทดลองช่วงที่ 2 มาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารอาหารโดยพืชก่อนการหมุนเวียนน้ำกลับสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังรายละเอียดแสดงในแผนผังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปรายละเอียดการทดลองช่วงที่ 3

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ถังพลาสติก ปริมาตร 52 ลิตร (ใช้ในการเลี้ยงปลา)
- ถังพลาสติก ปริมาตร 38 ลิตร (ใช้ในการปลูกพืช)
- ปั๊มวนน้ำขนาดเล็ก ยี่ห้อ RESUN รุ่น SP-6600
- เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ RESUN รุ่น LP-100
- เครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ (Timer)
- หัวทรายพ่นอากาศ
- สายออกซิเจน
- ท่อพีวีซี ข้อต่อ และอุปกรณ์ต่อท่อ
- ลูกปลานิล
- อาหารปลาที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 25
- เม็ดดินเผาเบอร์แอล ชนิดธรรมชาติ
- ตะแกรงเหล็ก
- ตาข่ายกรองแสง
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100S BSA224S-CW
- เครื่องชั่งน้ำหนักปลา ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PT1200
- เครื่องวัดความยาว
- ตลับเมตร

3.1.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Milton Roy รุ่น Spectronic Genesys 5 และ 10 uv scanning
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HICLAVE (HV-50)
- เครื่องวัดความเข้มแสง
- เครื่องอบ (oven)
- เครื่องปั่นเหวี่ยง ยี่ห้อ Vortex Grinie II Mixer รุ่น G-560E

- กระดาษกรอง (Whatman GF/C)
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไทรต์ อัลคาไลน์ และพีเอช ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เครื่องแก้วต่างๆ เช่น หลอดทดลอง บีกเกอร์ กระบอกตวง ฯลฯ
- ไมโครปิเปตขนาดต่างๆ

3.1.3 สารเคมี

- Phenol solution (Phenol 20 ก. ใน 95% V/V ethyl alcohol)
- Sodium nitropusside solution ($Na_2[Fe(CN)_5NO].2H_2O$)
- Alkaline reagent (Sodium citrate 100 ก. และ NaOH 5 ก. ในน้ำ D.I. 500 มล.)
- Oxidizing reagent (Alkaline reagent และ Sodium hypochlorite อัตราส่วน 4:1)
- Ammonium chloride (NH_4Cl)
- Sodium nitrite ($NaNO_2$)
- Potassium nitrate (KNO_3)
- Sulfuric acid (H_2SO_4)
- Sulphanilamide (Sulphanilamide 5 ก. และ Conc. HCl 50 มล.)
- NNED solution (N-(1-Naphthy)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- purified potassium peroxidisulphate ($K_2S_2O_8$)
- Boric acid solution (H_3BO_3)
- Ammonium molybdate solution ($[NH_4]_6Mo_7O_{24}.4H_2O$)
- Ascorbic acid solution ($C_6H_8O_6$)
- Potassium Antimonyl tartrate ($K[SbO]C_4H_4O_6.1/2H_2O$)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium bicarbonate (Na_2CO_3)
- Anhydrous potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4)

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมถังเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. บรรจุน้ำจืดปริมาตร 45 ล. ภายใต้สภาวะเหมือนจริงของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

กลางแจ้งที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา เพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อปลานิลและจุลินทรีย์ภายในระบบ โดยบริเวณก้นถังติดตั้งปั๊มน้ำต่อกับท่อพีวีซีสำหรับหมุนเวียนน้ำและอากาศภายในระบบ รวมทั้งใช้เวียนน้ำจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำไปยังถังปลูกพืช ทำการคัดเลือกปลานิลที่มีน้ำหนักและความยาวใกล้เคียงกันเพื่อเลี้ยงในถังพลาสติก โดยมีน้ำหนักในช่วง 1.81 – 2.56 ก.-นน. เปียก และความยาวในช่วง 4.62 – 5.45 ซม. ให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาดทุกวันในอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน

ก่อนการทดลองทำการปรับสภาพปลานิลให้มีความคุ้นชินกับสภาพแวดล้อมภายในระบบการเลี้ยงและอาหารเม็ดเป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์ โดยเมื่อสังเกตว่าปลานิลสามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้แล้วจึงเริ่มทำการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิล เพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟต ตรวจสอบและควบคุมค่าสภาพด่างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 120 - 160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตรวจวัดค่าสภาพด่าง ค่าพีเอช อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง

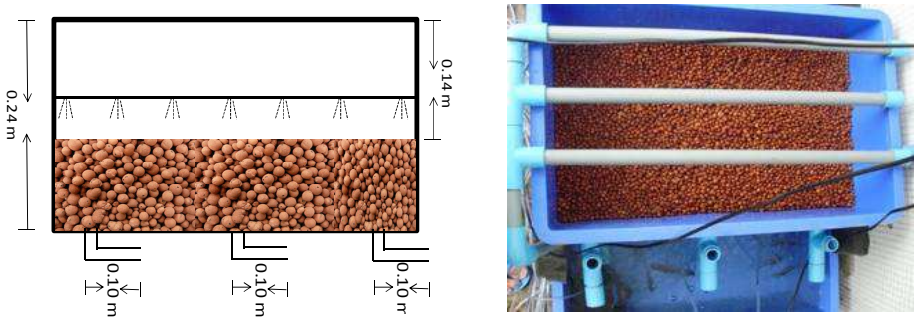
3.2.2 การเตรียมวัสดุกรองชีวภาพ

วัสดุตัวกลางสำหรับเป็นตัวกรองชีวภาพและวัสดุปลูกพืชที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเม็ดดินเผา ผลิตมาจากดินเหนียวผสมถ่านหินแล้วเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 °ซ ซึ่งทำให้น้ำในเม็ดดินถูกขับออกมาอย่างรุนแรงจึงเกิดช่องว่างของเม็ดดินเป็นรูพรุน ดังนั้นเม็ดดินเผาที่มีช่องว่างเกิดขึ้นมากจะทำให้มีการถ่ายเทอากาศที่ดี นอกจากนั้นรากพืชสามารถเติบโตได้อย่างแข็งแรง สามารถดูดน้ำและสารอาหารได้มาก โดยเม็ดดินเผาที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 8 - 16 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งก่อนการนำไปปลูกพืชต้องทำการแช่น้ำและล้างเพื่อทำความสะอาด

รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวกลางเม็ดดินเผาที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 การเตรียมถังปลูกพืช

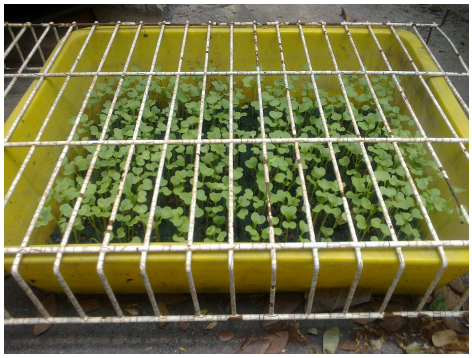
ถังปลูกพืชที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.24 ม. ทำการบรรจุเม็ดดินเผาที่เตรียมไว้สูงประมาณ 0.10 ม. โดยทำการปลูกพืชในชั้นเม็ดดินเผาที่ระดับความสูง 0.08 ม. และเจาะท่อระบายน้ำด้านข้างของถังจำนวน 3 จุด หลังจากนั้นสวมท่อข้อต่อสูง 0.10 ม. เพื่อรักษาระดับน้ำให้ขังอยู่ภายในถังปลูกพืช ทำการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลาเข้าสู่ถังปลูกพืชโดยปล่อยให้ไหลผ่านชั้นวัสดุตัวกลาง สำหรับน้ำส่วนเกินจะไหลล้นผ่านท่อข้อต่อที่ติดตั้งไว้ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมและภาพถ่ายแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในถังปลูกพืช

3.2.4 การเตรียมต้นกล้าผักกวางตุ้ง

ผักกวางตุ้งที่เลือกใช้ในการทดลองเป็นสายพันธุ์เนเธอร์แลนด์ ซึ่งเติบโตเร็วและมีอายุการเก็บเกี่ยวที่สั้น โดยก่อนการทดลองทำการเพาะและอนุบาลต้นกล้าผักกวางตุ้งเป็นเวลา 7 วัน ทำการรดน้ำวันละ 2 ครั้ง ภายใต้โรงเรือนกลางแจ้ง จากนั้นทำการคัดเลือกต้นกล้าที่มีความสมบูรณ์แข็งแรงและความสูงอยู่ในช่วง 4 - 6 ซม. เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ต้นกล้าผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน ที่ใช้สำหรับการทดลอง

<u>การทดลองช่วงที่ 1</u> การศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองส่วนนี้เป็นการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและสูง คือ 0.5 และ 2.0 กก./ลบ.ม. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตลอดการทดลอง รวมทั้งปริมาณสารอาหารที่เกิดจากอาหารเลี้ยงปลาที่ตกค้างบริเวณก้นถังและสิ่งขับถ่ายของปลานิลที่เลี้ยง โดยตรวจสอบประสิทธิภาพของการสร้างตะกอนแขวนลอยภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำตลอดระยะเวลาการศึกษา 56 วัน เพื่อจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ดังมีรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการทดลองตามตารางที่ 3.1

การทดสอบอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

1. ศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) โดยการให้อาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน (ชุดการทดลองละ 3 ถัง)

2. ตรวจวัดปริมาณอนุภาคสารแขวนลอยในน้ำด้วยการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย รวมทั้งตรวจวัดปริมาตรตะกอนแขวนลอยที่ตกตะกอนในกรวยอิมฮอฟฟ์ภายในเวลา 30 นาที (SV_{30}) ตลอดช่วงเวลาการทดลอง

3. ศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงในแต่ละวันจนกระทั่งมีค่าคงที่ จากนั้นดึงตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงการเลี้ยงครั้งแรกออกร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง ในสภาวะที่ทำการให้อาหารปลาในอัตราเดิม รวมทั้งบันทึกปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และทำการทดลองซ้ำจำนวน 6 รอบ จนปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นคงที่

4. ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บ่งชี้ถึงปริมาณสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตจากถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ดำเนินการด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีมาตรฐานที่ดัดแปลงจากวิธีของ Strickland และ Parsons (1977) และวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (APHA, 2005) ร่วมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ สภาพด่าง และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

5. ติดตามการเติบโตของปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วัน ด้วยการวัดขนาดความยาวและชั่งน้ำหนักปลาทุกสัปดาห์ ร่วมกับการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในตัวปลา ตะกอนแขวนลอย และน้ำเลี้ยงปลาในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

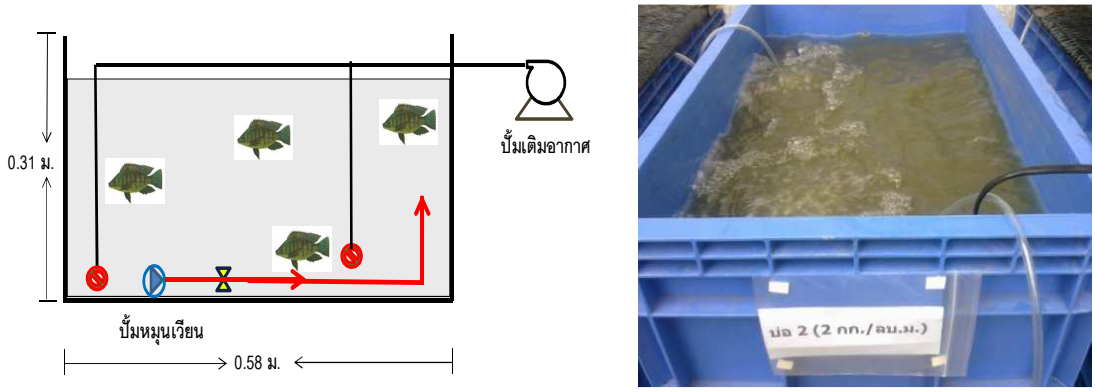
6. นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 3

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความหนาแน่นของปลานิลเริ่มต้น	- 0.5 และ 2.0 กก./ลบ.ม.
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ระยะเวลาในการศึกษา	- 56 วัน
2. ปริมาณการให้อาหาร	- ร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน
3. แหล่งตัวอย่างปลานิล	- ฟาร์มเพาะเลี้ยงและขยายพันธุ์ปลา
4. แหล่งสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	- อาหารปลาสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาด
5. น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิลเริ่มต้น	- 2.28±0.34 ก.-นน. เปียก และ 5.08±0.33 ซม. ตามลำดับ
6. ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิล	- 45 ล.
7. ขนาดถังเลี้ยงปลานิล	- 0.31 x 0.58 x 0.38 ม.
8. น้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิล	- น้ำประปาที่ผ่านการไล่คลอรีน
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. อัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล	- ปริมาณของแข็งแขวนลอย
2. ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังเลี้ยงปลานิล	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟต
3. คุณภาพน้ำอื่นๆ	- ค่าพีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ สภาพด่าง และอุณหภูมิ
4. อัตราการเติบโตของปลานิล	- ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาวของลำตัวปลา

สภาวะในการเลี้ยงปลานิล

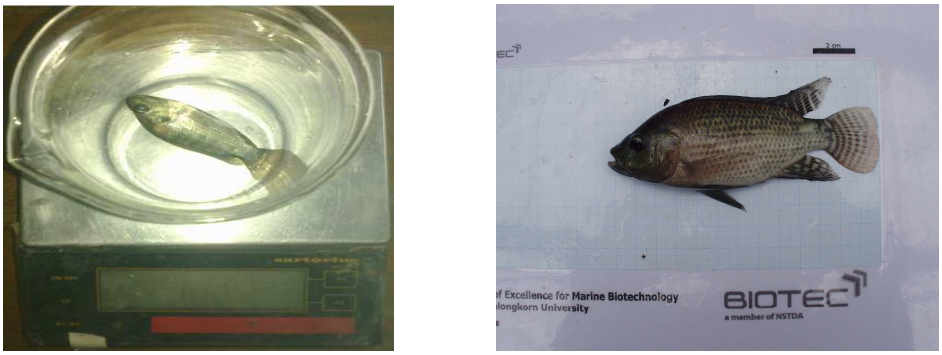
ทำการเลี้ยงปลานิลที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 2.28±0.34 ก.-นน. เปียก และความยาวเฉลี่ย 5.08±0.33 ซม. โดยการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) ใช้จำนวนปลา 11 ตัว/ถัง และการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ใช้จำนวนปลา 32 ตัว/ถัง จัดวางถังเลี้ยงปลานิลทุกถังในโรงเรือนที่ได้รับแสงธรรมชาติ รวมทั้งมีฉากกั้นเพื่อป้องกันการกระโดดของปลาและน้ำฝนไหลลงสู่ระบบการทดลอง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.8 สำหรับปริมาณการให้อาหารปลาคำนวณจากร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ทำการเลี้ยงปลานิลต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 56 วัน ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ยกเว้นการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยการระเหยของน้ำจากถังเลี้ยงปลานิล โดยวันเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 0) เป็นวันที่เริ่มปล่อยปลานิลลงในถังเลี้ยง



รูปที่ 3.8 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงปลานิลระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนกลางแจ้ง (แสดงรายละเอียดต่อ 1 ถังการทดลอง)

การประเมินอัตราการเติบโตของปลานิล

ตรวจวัดการเติบโตของปลานิลตลอดช่วงเวลาการทดลองด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลานิลทุกตัว ในวันที่ 7 14 21 28 35 42 49 และ 56 ของการทดลอง (รูปที่ 3.9) ซึ่งการวัดความยาวของตัวปลาในรูปความยาวทั้งหมด (Total length) โดยวัดจากปากถึงปลายหางของปลา



(การชั่งน้ำหนักปลานิล) (การวัดความยาวของตัวปลานิล)

รูปที่ 3.9 แสดงการตรวจวัดการเติบโตของปลานิลด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว

<u>การทดลองช่วงที่ 2</u> การศึกษาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในพืชทดลอง

การทดลองส่วนนี้เป็นการนำต้นกล้าผักกวางตุ้งที่มีอายุ 7 วัน ปลูกลงในถังปลูกพืชที่เตรียมไว้ โดยในระหว่างการทดลองจะมีการให้ปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งสารอาหารสำหรับการเติบโตสัปดาห์ละ 2 ครั้ง จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างผักกวางตุ้งเพื่อชั่งน้ำหนักและตรวจวัดความสูง รวมทั้งวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหารในเม็ดดินเผาช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองปลูกพืช ทำการคำนวณปริมาณปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง ร่วมกับอัตราการเติบโตและปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสม

ในพืชตลอดระยะเวลา 45 วัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในผักกวางตุ้ง ดังมีรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการทดลองตามตารางที่ 3.2

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในผักกวางตุ้ง

1. ทำการปลูกผักกวางตุ้งจากต้นกล้าที่มีอายุ 7 วัน ลงในถังปลูกพืชที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นทำการรดน้ำทุกวัน วันละ 2 ครั้ง ร่วมกับการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราส่วน 10 ก./ตร.ม. สัปดาห์ละ 2 ครั้ง

2. ทำการวิเคราะห์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในเม็ดดินเผาช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการปลูกผักกวางตุ้ง ร่วมกับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

3. ติดตามการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดระยะเวลา 45 วัน ด้วยการชั่งน้ำหนักและตรวจวัดความสูง ร่วมกับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง และสุ่มตัวอย่างผักกวางตุ้งเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

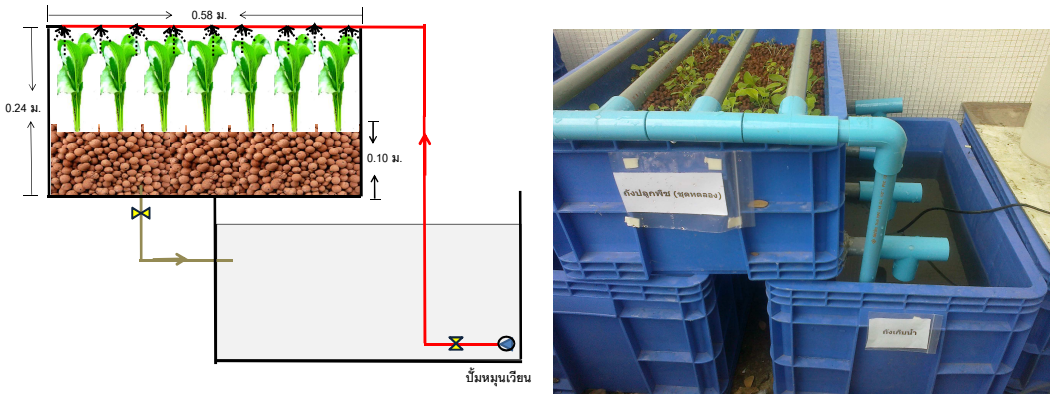
4. จัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมในผักกวางตุ้งสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการทดลองช่วงที่ 3

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. อายุต้นกล้าผักกวางตุ้ง	- อายุในช่วง 7 วัน
2. น้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้ง	- ในช่วง 0.04±0.01 ก.-น.น. เปียก และ 3.95±0.27 ซม. ตามลำดับ
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ระยะเวลาในการศึกษา	- 45 วัน
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินเผา	- 8 - 16 มม.
3. เมล็ดพันธุ์ผักกวางตุ้ง	- ร้านค้าเคมีภัณฑ์
4. แหล่งสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	- ปุ๋ยอินทรีย์จากร้านเคมีภัณฑ์
5. น้ำที่ใช้ในการรดผักกวางตุ้ง	- น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการฯ
6. ขนาดถังปลูกผักกวางตุ้ง	- 0.31 x 0.58 x 0.24 ม.
7. ปริมาณการให้ปุ๋ยอินทรีย์	- อัตราส่วน 10 ก./ตร.ม. สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
8. ความหนาแน่นของต้นกล้าเริ่มต้น	- 334 ต้น/ตร.ม.
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในผักกวางตุ้ง	- คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด
2. อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง	- วัดความสูง ชั่งน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง

สภาวะในการปลูกผักกวางตุ้ง

ทำการทดลองโดยเพาะเมล็ดผักกวางตุ้งจนได้ต้นกล้าที่มีอายุ 7 วัน จากนั้นจึงย้ายไปปลูกบนชั้นเม็ดดินเผาที่บรรจุในถังปลูกพืชที่ใช้สำหรับเป็นถังทดลอง ซึ่งต้นกล้ามีน้ำหนักเฉลี่ย 0.04±0.01 ก.-นน. เปียก และความสูงเฉลี่ย 3.95±0.27 ซม. โดยใช้จำนวนต้นกล้าเริ่มต้น 140 ต้น/ถังปลูก หรือคิดเป็นความหนาแน่น 25.41 ก.-นน. เปียก/ตร.ม. โดยหลังจากวันที่ 21 ทำการคัดผักกวางตุ้งให้เหลือเฉพาะต้นที่สมบูรณ์แข็งแรงจำนวน 90 ต้น/ถังปลูก หรือคิดเป็นความหนาแน่น 61.25 ก.-นน. เปียก/ตรม. สำหรับถังบรรจุน้ำจืดที่ใช้ในการรดน้ำผักกวางตุ้งทำการติดตั้งปั๊มน้ำเพื่อใช้ในการหมุนเวียนน้ำภายในระบบ โดยจัดวางถังปลูกผักกวางตุ้งดังรูปที่ 3.10 ทำการทดลองปลูกผักกวางตุ้งต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 45 วัน โดยวันเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 7) เป็นวันที่เริ่มปลูกผักกวางตุ้งลงในถังปลูก



รูปที่ 3.10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการปลูกผักกวางตุ้งบนชั้นเม็ดดินเผาในโรงเรือน

การประเมินอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง

ตรวจวัดอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดช่วงการทดลองเป็นเวลา 45 วัน ด้วยการสุ่มตัวอย่างผักกวางตุ้งมาชั่งน้ำหนักและวัดความสูงในวันที่ 7 14 21 28 35 และ 45 ของการทดลอง (รูปที่ 3.11) ซึ่งการวัดความสูงของผักกวางตุ้งจะวัดจากโคนต้นถึงยอด

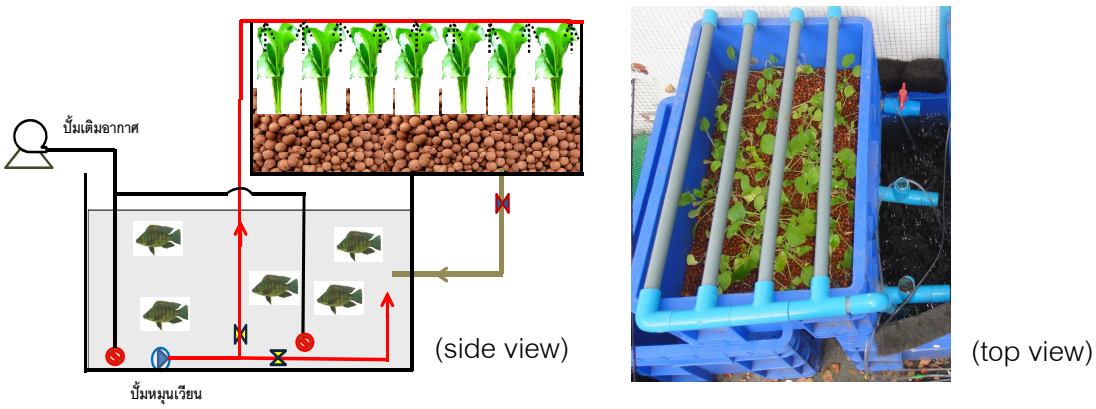
(การชั่งน้ำหนักผักกวางตุ้ง)

(การวัดความสูงของผักกวางตุ้ง)

รูปที่ 3.11 แสดงการตรวจวัดการเติบโตของผักกวางตุ้งด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความ

<u>การทดลองช่วงที่ 3</u> **การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์**

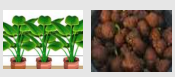
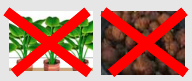
การทดลองนี้เป็นการเลือกใช้สมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณหาอัตราภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมต่อการหมุนเวียนตะกอนแขวนลอยและน้ำเลี้ยงปลานิลเข้าสู่ถังปลูกผักกวางตุ้ง โดยกำหนดวงจรการหมุนเวียนน้ำเลี้ยงปลาและตะกอนแขวนลอยด้วยเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ (Timer) ที่มีระยะเวลาการจ่าย 10 นาที หยุดพัก 60 นาที จากนั้นทำการประเมินปริมาณการเกิดตะกอนแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดสารอาหารโดยพืชก่อนการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ รูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแต่ละชุดการทดลองในการทดลองช่วงที่ 3 (แสดงรายละเอียดต่อ 1 ชุดการทดลอง)

สำหรับชุดการทดลองแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ (1) ชุดการทดลองที่ทำการเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชบนวัสดุตัวกลาง (2) ชุดควบคุม-1 ที่ทำการเลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว และ (3) ชุดควบคุม-2 ที่ทำการเลี้ยงปลาและใช้วัสดุตัวกลางแต่ไม่มีการปลูกพืช ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3 รวมทั้งสามารถสรุปตัวแปรต่างๆ ในการทดลองได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 รูปแบบของชุดการทดลองช่วงที่ 3

ถังปลูกพืช	ปลูกพืช + วัสดุตัวกลาง 	ไม่ปลูกพืช + ไม่มีวัสดุตัวกลาง 	ไม่ปลูกพืช + วัสดุตัวกลาง
ถังเลี้ยงปลา	มีปลานิล	มีปลานิล	มีปลานิล
ชุดการทดลอง	**ชุดทดลอง**	**ชุดควบคุม-1**	**ชุดควบคุม-2**

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. สภาวะการทดลอง 3 รูปแบบ	- ชุดทดลอง ที่มีการเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชบนวัสดุตัวกลาง - ชุดควบคุม-1 ที่มีการเลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว -ชุดควบคุม-2ที่มีการเลี้ยงปลาและใช้วัสดุตัวกลางแต่ไม่มีการปลูกพืช
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ระยะเวลาในการศึกษา	- 35 วัน
2. ปริมาณการให้อาหารปลานิล	- ร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน
3. ความหนาแน่นของปลานิลเริ่มต้น	- 2.0 กก./ลบ.ม.
4. น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลาเริ่มต้น	- 14.27±1.42 ก.-นน. เปียก และ 9.44±0.27 ซม. ตามลำดับ
5. ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิล	- 45 ล.
6. ขนาดถังเลี้ยงปลานิล	- 0.31 x 0.58 x 0.38 ม.
7. น้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิล	- น้ำประปาที่ผ่านการไล่คลอรีน
8. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินเผา	- 8 - 16 มม.
9. ความหนาแน่นของต้นกล้าเริ่มต้น	- 334 ต้น/ตร.ม.
10. ขนาดถังปลูกผักกวางตุ้ง	- 0.31 x 0.58 x 0.24 ม.
11. น้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้ง	- 0.15±0.02 ก.-นน. เปียก และ 3.95±0.27 ซม. ตามลำดับ
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งพารามิเตอร์อื่นๆ ในระบบเลี้ยงปลานิล	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต ฟอสเฟต ค่าพีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ สภาพด่าง และของแข็งแขวนลอย
2. อัตราการเติบโตของปลานิล	-น้ำหนัก และความยาวของลำตัวปลา
3. ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งพารามิเตอร์อื่นๆ ในถังปลูกผักกวางตุ้ง	-คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมด โออาร์พี และของแข็งแขวนลอย
4. อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง	- ความสูง ความกว้างของใบ ขนาดทรงพุ่ม น้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง

การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

1. ถังเลี้ยงปลานิลเป็นถังสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 45 ล. โดยไม่มีดินก้นถัง และตั้งอยู่ภายในโรงเรือน

2. ถังปลูกพืชเป็นถังสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.24 ม. ที่บรรจุเม็ดดินเผาจนเต็มห่างจากขอบด้านบน 0.14 ม.

3. ปั๊มเติมอากาศและปั๊มดูดจ่ายน้ำ

4. ปลานิลที่ผ่านการปรับสภาพให้มีความคุ้นชินกับสภาพการเลี้ยงและการให้อาหารเม็ด โดยมีขนาดความยาวของตัวปลาและน้ำหนักใกล้เคียงกัน

5. อาหารปลาสำเร็จรูปของบริษัทเจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) ที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 25

6. ต้นกล้าผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน ที่มีลำต้นสมบูรณ์แข็งแรง

สภาวะในการเลี้ยงปลานิล

คัดเลือกปลานิลที่มีน้ำหนักเฉลี่ยในช่วง 11 - 16 ก.-นน. เปียก และความยาวเฉลี่ย 8 - 10 ซม. โดยทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง (2 กก./ลบ.ม.) ในทุกถังทดลอง จัดวางถังเลี้ยงปลานิลในโรงเรือนที่ได้รับแสงธรรมชาติ สำหรับการให้อาหารปลาสามารถคำนวณปริมาณการให้อาหารจากร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ทำการเลี้ยงปลานิลต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 35 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ยกเว้นการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยการระเหยของน้ำในถังเลี้ยงปลานิล โดยวันเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 0) เป็นวันที่เริ่มปล่อยปลานิลลงในถังเลี้ยง

การประเมินอัตราการเติบโตของปลานิล

ตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลตลอดช่วงการทดลองด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลานิลทุกตัวในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 ของการทดลอง

สภาวะในการปลูกผักกวางตุ้ง

ในชุดทดลองที่มีการปลูกผักกวางตุ้งทำการคัดเลือกต้นกล้าอายุ 7 วัน ที่มีความสมบูรณ์แข็งแรงจำนวน 60 ต้น ลงปลูกบนชั้นเม็ดดินเผาที่บรรจุในถังปลูกพืช โดยในแต่ละถังเจาะท่อระบายน้ำด้านข้างของถังปลูกพืชจำนวน 3 จุด หลังจากนั้นสวมท่อข้อต่อสูง 0.10 ม. เพื่อรักษาระดับน้ำให้ขังอยู่ภายในถังปลูกพืช รวมทั้งทำการติดตั้งปั๊มน้ำเพื่อใช้ในการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลาเข้าสู่ถังปลูกพืช โดยปล่อยให้ไหลลงบริเวณเหนือชั้นวัสดุตัวกลาง ซึ่งน้ำส่วนเกินจะไหลล้นผ่านท่อข้อต่อที่ติดตั้งไว้ จัดวางถังปลูกผักกวางตุ้งบนถังเลี้ยงปลานิลภายใต้สภาวะเหมือนจริงในโรงเรือนกลางแจ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ทำการทดลองปลูกพืชต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 35 วัน โดยวันเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 7) เป็นวันที่เริ่มปลูกผักกวางตุ้งลงในถังปลูกที่บรรจุวัสดุเม็ดดินเผา

การประเมินอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง

ตรวจวัดอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดช่วงการทดลอง โดยการสุ่มตัวอย่างผักกวางตุ้งมาชั่งน้ำหนัก วัดความกว้างของใบ ขนาดทรงพุ่ม และวัดความสูงของลำต้น ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 ของการทดลอง

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน

1. ทำการเวียนตะกอนแขวนลอยและน้ำเลี้ยงปลาจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำเข้าสู่ถังปลูกพืชด้วยอัตราภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดวงจรการหมุนเวียนด้วยเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติที่มีระยะเวลาการจ่าย 10 นาที และหยุดพัก 60 นาที

2. เดินระบบการทดลองทั้ง 3 ชุดการทดลองๆ ละ 3 ซ้ำ ได้แก่

- ชุดทดลอง : ทำการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุตัวกลาง
- ชุดควบคุม-1 : ทำการเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียว
- ชุดควบคุม-2 : ทำการเลี้ยงปลานิลและใช้วัสดุตัวกลาง แต่ไม่มีการปลูกผักกวางตุ้ง

3. ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำที่บ่งชี้ปริมาณสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำ เช่น แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลา ร่วมกับการตรวจติดตามการเติบโตและอัตราการรอดตายของปลานิลตลอดการทดลอง รวมทั้งสุ่มตัวอย่างปลาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในตัวปลา ในตะกอนแขวนลอย และน้ำเลี้ยงปลา

4. ประเมินการเติบโตของผักกวางตุ้ง และตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในผักกวางตุ้ง ร่วมกับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง รวมทั้งปริมาณการสะสมของตะกอนแขวนลอยในถังปลูกผักกวางตุ้ง

5. ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารอาหารโดยพืชก่อนการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบอะควาโปนิกส์

3.3.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ

ทำการประเมินอัตราการเติบโตของปลานิลในระบบเลี้ยง โดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของลำตัวปลานิลทุกตัวด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดความยาว สัปดาห์ละครั้งตลอดช่วงเวลาการทดลอง เพื่อใช้คำนวณหาน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิลแต่ละถัง ตลอดจนใช้ในการคำนวณอัตราการเติบโตของปลานิลต่อวัน (Daily weight gain) ร้อยละอัตราการรอดของปลา (Survival rate of fish) อัตราการแลกเนื้อ (Feed conversion ratio) และผลผลิตของปลา (Production of fish) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการเติบโตต่อวัน}(\text{ก.}/\text{วัน}) = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น}\ (\text{ก.})}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง}\ (\text{วัน})}$$

$$\text{อัตราการรอด}\ (\text{ร้อยละ}) = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือ x 100}}{\text{จำนวนปลาที่ปล่อยทั้งหมด}}$$

$$\text{อัตราการแลกเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารปลาที่ให้ทั้งหมด}\ (\text{กก.})}{\text{น้ำหนักรวมของปลาที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด}\ (\text{กก.})}$$

$$\text{ผลผลิต}\ (\text{กก.}/\text{ไร่}) = \frac{\text{น้ำหนักรวมของปลาทั้งหมด}\ (\text{กก.})}{\text{พื้นที่บ่อ}\ (\text{ไร่})}$$

สำหรับการวิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของตัวปลานิลในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง โดยการสุ่มตัวอย่างจากถังเลี้ยงปลานิลในแต่ละถังจำนวน 2 ตัว/ถัง หลังจากนั้นนำไปใส่ภาชนะและตากแดดให้แห้ง ร่วมกับการอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 – 120 °ซ หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในตัวปลาทำการบดให้ละเอียดจนมีขนาดประมาณ 3- 5 ไมโครเมตร และเก็บในไว้ในขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial)

3.3.2 *การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงปลานิล*

การประเมินคุณภาพน้ำดำเนินการโดยการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอย่างน้ำในถังเลี้ยงปลานิลเป็นระยะๆ ตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.5 ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์

ไนเทรต ฟอสเฟต ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด โออาร์พี สภาพด่าง พีเอช ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด น้ำหนักปลา ความยาวปลา อัตราการเติบโตต่อวัน อัตราการแลกเนื้อ และอัตราการรอดของปลานิล

ส่วนการวิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของตะกอนแขวนลอยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยทำการกรองน้ำร่วมกับตะกอนแขวนลอยปริมาตรน้ำ 10 ล. มาผ่านผ้ากรองขนาด 300 ไมโครเมตร ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองนำกลับคืนสู่ถังเลี้ยงปลานิล สำหรับตะกอนแขวนลอยที่กรองได้นำไปภาชนะและตากแดดให้แห้ง ร่วมกับการอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 – 120 °ซ หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยทำการบดให้ละเอียดจนมีขนาดประมาณ 3- 5 ไมโครเมตร และเก็บในไว้ในขวดแก้วขนาดเล็ก

3.3.3 การประเมินอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง

ตรวจวัดอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดช่วงการทดลอง โดยการสุ่มตัวอย่างผักกวางตุ้งชั่งน้ำหนักและวัดความสูงด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดความสูงตลอดช่วงการทดลอง เพื่อใช้คำนวณหาน้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้งตลอดจนอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งต่อวัน (Daily weight gain) และผลผลิตของผักกวางตุ้ง (Production of vegetables) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการเติบโตต่อวัน (ก./วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (ก.)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}}$$

$$\text{ผลผลิต (กก./ไร่)} = \frac{\text{น้ำหนักรวมของผักทั้งหมด (กก.)}}{\text{พื้นที่บ่อ (ไร่)}}$$

สำหรับการวิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้งในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง โดยการสุ่มตัวอย่างจากถังปลูกพืชในแต่ละถังจำนวน 20 ต้น/ถัง หลังจากนั้นนำไปใส่ภาชนะและตากแดดให้แห้ง ร่วมกับการอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 – 120 °ซ หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในผักกวางตุ้งทำการบดให้ละเอียดจนมีขนาดประมาณ 3- 5 ไมโครเมตร และเก็บในไว้ในขวดแก้วขนาดเล็ก

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนความถี่สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิล

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่	แหล่งอ้างอิง
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ			
แอมโมเนีย (NH_4^+-N)*	Spectrophotometric Method (at 640 nm)	วันเว้นวัน	ดัดแปลงจาก Strickland และ Parson (1972)
ไนไทรต์ (NO_2^--N)*	Spectrophotometric Method (at 543 nm)	วันเว้นวัน	ดัดแปลงจาก Strickland และ Parson (1972)
ไนเทรต (NO_3^--N)*	Ultraviolet Spectrophotometric Method (at 220 and 275 nm)	วันเว้นวัน	Standard method (2005)
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	Spectrophotometric Method (at 885 nm)	วันเว้นวัน	ดัดแปลงจาก Strickland และ Parson (1972)
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	Ultraviolet Spectrophotometric Method (at 220 and 275 nm)	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	ดัดแปลงจาก Grassholf และคณะ (1999)
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	Spectrophotometric Method (at 885 nm)	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	ดัดแปลงจาก Grassholf และคณะ (1999)
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux and Titrimetric Method	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	Standard method (2005)
พีเอช (pH)*	pH meter (HANNA,HI 9125)	วันเว้นวัน	Standard method (2005)
อุณหภูมิ (Temperature)*	Thermometer (HANNA,HI 9125)	วันเว้นวัน	Standard method (2005)
สภาพด่างของน้ำ (Alkalinity)*	Test Kit (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	วันเว้นวัน	Standard method (2005)
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)*	DO meter (HANNA,HI 9147)	วันเว้นวัน	Standard method (2005)
โออาร์พี (ORP)	ORP meter (HANNA,HI 9125)	ทุกสามวัน	Standard method (2005)
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS)*	Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C	ทุกสามวัน	Standard method (2005)

หมายเหตุ * พารามิเตอร์ที่ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2547

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนความถี่สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิล (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่	แหล่งอ้างอิง
พารามิเตอร์ด้านสัตว์น้ำ			
น้ำหนักปลานิล	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	ทุกสัปดาห์	-
ความยาวของปลานิล	วัดจากปากถึงปลายหาง (Total length)	ทุกสัปดาห์	-
อัตราการเติบโตต่อวัน	เปรียบเทียบน้ำหนักปลากับระยะเวลาการเลี้ยง	สิ้นสุดการทดลอง	-
อัตราการแลกเนื้อ	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับน้ำหนักผลผลิตปลารวมทั้งหมด	สิ้นสุดการทดลอง	-
อัตราการรอดตายของปลานิล	เปรียบเทียบปริมาณปลาในวันเริ่มต้นและวันสุดท้าย	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	-
พารามิเตอร์ด้านพืช			
น้ำหนักของผักกวางตุ้ง	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	-
ความสูงของผักกวางตุ้ง	วัดจากโคนต้นถึงยอด	ทุกสัปดาห์	-
ความกว้างของใบ	วัดจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง	ทุกสัปดาห์	-
ทรงพุ่มของผักกวางตุ้ง	วัดจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง	ทุกสัปดาห์	-
ความเข้มแสง	อุปกรณ์วัดความเข้มแสง	ทุกสามวัน	-

บทที่ 4

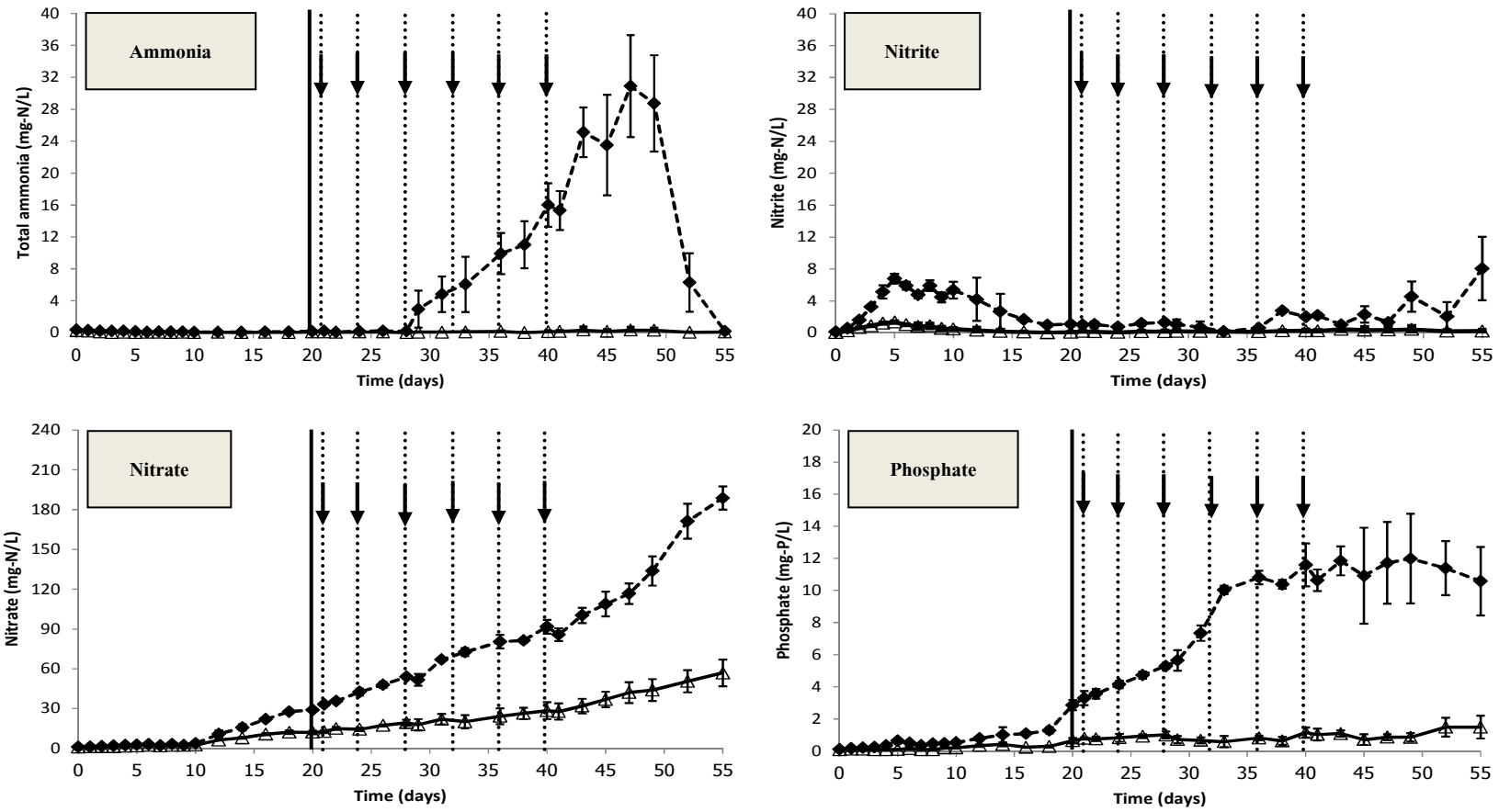
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาระบบเลี้ยงปลานิลและอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำและการเกิดตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีระบบบำบัด โดยทำการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) เพื่อประเมินปริมาณการเกิดตะกอนแขวนลอยและสมดุลไนโตรเจนภายในระบบเลี้ยงปลานิล ภายหลังการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 56 วัน ในระบบปิดที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากระบบ ยกเว้นการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยการระเหยของน้ำในถังเลี้ยงปลา ในการทดลองใช้ปลานิลที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 2.28±0.34 ก. และความยาวเริ่มต้นเฉลี่ย 5.08±0.33 ซม. โดยเลี้ยงในถังพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 45 ล. ภายใต้สภาวะเหมือนจริงของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนที่ได้รับแสงธรรมชาติ ให้อาหารปลาโดยคำนวณปริมาณจากอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลา ด้วยอาหารปลาสำเร็จรูปชนิดเม็ดลอยน้ำที่ขายตามท้องตลาด และแบ่งการให้อาหารในแต่ละวันเป็น 3 ช่วงเวลา ซึ่งปริมาณอาหารที่ให้ในแต่ละถังไม่เท่ากัน เนื่องจากการเติบโตของปลานิลที่ไม่เท่ากัน และในทุกสัปดาห์เมื่อมีการตรวจวัดการเติบโตของปลานิลจะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณอาหารที่ให้ทุกครั้ง

4.1.1 คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิล

ทำการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำในถังเลี้ยงปลานิลเป็นระยะตลอดช่วงเวลา 56 วัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วง 20 วันแรกของการทดลองเป็นการเลี้ยงปลานิลตามปกติ ส่วนช่วงที่ 2 คือ ตั้งแต่วันที่ 21 จนสิ้นสุดการทดลอง เป็นการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยของการเลี้ยงปลานิลที่ 2 ระดับความหนาแน่น โดยจะทำการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากถังเลี้ยงปลานิลทั้งสองระบบในปริมาณร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง จำนวนทั้งสิ้นถังละ 6 รอบ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วัน โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) (Δ) แสดงการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และ (↓) แสดงวันที่ทำการดึงตะกอนออกจากถังเลี้ยงร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง

- *แอมโมเนีย*

ผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียพบว่า ตลอดระยะเวลาการทดลอง 20 วันแรก ถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) มีปริมาณแอมโมเนียสะสมต่ำกว่า 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ส่วนถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) มีการสะสมแอมโมเนียสูงสุดในวันที่ 2 ของการทดลองเท่ากับ 0.3 มก.-ไนโตรเจน/ล. หลังจากนั้นระบบสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยทั้งสองระดับความหนาแน่นพบว่า เกิดการสะสมแอมโมเนียขึ้นในระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นทุกครั้งที่ทำการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ ซึ่งปริมาณแอมโมเนียสะสมสูงสุดในวันที่ 47 ของการทดลองเท่ากับ 30.89±6.38 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ย 10.09±2.48 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่การเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำมีปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ย 0.12±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเกิดการสะสมแอมโมเนียสูงสุด 0.32 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 43 ของการทดลอง จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณแอมโมเนียเท่ากับ 0.07±0.06 และ 0.17±0.08 มก.-ไนโตรเจน/ล. ของการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและสูง ตามลำดับ นั่นคือ ในช่วงก่อนการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง การตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในการเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่นมีปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังเลี้ยงปลานิลเกิดจากอาหารที่เหลือตกค้าง และการขับถ่ายของเสียของปลานิล ซึ่งเป็นผลมาจากในถังเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่นเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ในการเปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไทรต์ และไนเทรตอย่างตลอดเวลา สำหรับหลังการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียในการเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่นมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีความเข้มข้นสูงกว่าความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากการดึงตะกอนแขวนลอยรวมทั้งแบคทีเรียออกจากระบบในปริมาณมากเกินควร จึงส่งผลกระทบต่อสมดุลของกระบวนการดูดซึมและไนทริฟิเคชันโดยตะกอนแขวนลอย อีกทั้งแบคทีเรียในน้ำเลี้ยงปลานิลเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ช้า ดังนั้นความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจึงมีความเข้มข้นสูงขึ้นทุกครั้งที่ดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ จนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อระบบสามารถสร้างตะกอนแขวนลอยให้มีปริมาณและคุณภาพที่เพียงพอต่อการควบคุมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่สะสมภายในระบบ ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นข้อยืนยันเกี่ยวกับความสำคัญของระบบตะกอนแขวนลอยที่ตรงกับงานวิจัยของ Nootong, และคณะ (2011) ที่กล่าวว่าตะกอนแขวนลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซึมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนร่วมกับกระบวนการไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังพบการลดลงของค่าสภาพด่างภายใน

ระบบ จึงต้องมีการปรับสภาพด่างด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โดยในช่วงเวลาที่เกิดการสะสมแอมโมเนียอาจส่งผลต่อสุขภาพและความเครียดของสัตว์น้ำหากเกิดการสะสมเป็นระยะเวลานาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vanitchanai และคณะ (2009) ที่รายงานว่าตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำมีผลต่อการช่วยควบคุมคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ส่วน Timmons และคณะ (2002) กล่าวว่าสัตว์น้ำบางชนิดสามารถทนอยู่ในสภาวะของน้ำที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงถึง 5.6 มก.-ไนโตรเจน/ล. ขึ้นอยู่กับสภาพปัจจัยสิ่งแวดล้อมของการเลี้ยงและอายุของสัตว์น้ำ โดยมีรายงานว่าระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงปลาควรมีความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. (ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล, 2547) หากความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงเกิน 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลให้ปลาอ่อนแอและตายได้ง่าย (Liao และ Mayo, 1972) แต่จากการทดลองพบว่า ภายหลังการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบปลานิลยังคงมีชีวิตอยู่ได้แม้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียจะสูงถึง 30.89 มก.-ไนโตรเจน/ล. อาจเนื่องมาจากปลานิลมีสภาพแข็งแรงและมีการอนุบาลปลาก่อนการทดลองจึงส่งผลให้มีการปรับสภาพของการดำรงชีวิตได้อย่างเหมาะสม รวมทั้งการเกิดแอมโมเนียสะสมเป็นช่วงเวลาที่ไม่นานนัก ซึ่งจากรายงานของ Avnimelech และ Rityo (2003) กล่าวว่าไม่ควรมีแอมโมเนียสะสมภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานเกินหนึ่งสัปดาห์ โดยจะส่งผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีและเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ ซึ่งอาจแก้ปัญหาดังกล่าวได้ด้วยการลดปริมาณอาหารและควบคุมสภาพด่างภายในระบบการเลี้ยง

- *ไนไทรต์*

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของไนไทรต์ในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ในช่วง 20 วันแรกของการทดลอง พบว่าเกิดการสะสมไนไทรต์สูงสุดในวันที่ 5 โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.35±0.11 และ 6.79±0.59 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นปริมาณไนไทรต์ลดลงต่ำกว่า 0.1 และ 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อปริมาณไนไทรต์ลดลงจะพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเทรตขึ้นมาแทนที่ และเมื่อทำการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอย พบว่าการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจะเกิดการสะสมไนไทรต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งความเข้มข้นของไนไทรต์เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นเท่ากับ 8.06±3.98 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยปลานิลยังคงมีชีวิตได้ ในขณะที่การเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำจะเกิดการสะสมไนไทรต์เพียงเล็กน้อย โดยมีความเข้มข้นของไนไทรต์สะสมสูงสุดในวันที่ 49 ของการทดลองเท่ากับ 0.46±0.16 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อคำนวณความเข้มข้นของไนไทรต์เฉลี่ยสำหรับการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและ

ความหนาแน่นต่ำ พบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ 1.90±0.72 และ 0.24±0.15 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงปลานิล โดยเฉพาะที่ระดับความหนาแน่นสูงเป็นจำนวนมากทำให้เสียสมดุลของกระบวนการดูดซึมและไนทริฟิเคชันโดยตะกอนแขวนลอย จึงเป็นสาเหตุให้แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไทรต์ได้เพียงเล็กน้อย จนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อไม่มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบจึงจะพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไนไทรต์ รวมทั้งเกิดการลดค่าสภาพด่างภายในระบบตลอดการทดลอง ดังนั้นจึงเป็นการช่วยยืนยันถึงบทบาทสำคัญของตะกอนแขวนลอยในการช่วยควบคุมคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งจากรายงานของ มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2539) กล่าวว่าปริมาณไนไทรต์ที่สูงเกิน 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะเป็นอันตรายต่อปลา โดยระดับความเข้มข้นของไนไทรต์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำจืด คือ ไม่ควรเกิน 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) โดยรายงานของ Gutierrez-Wing และ Malone (2006) กล่าวว่าสัตว์น้ำจืดบางชนิดสามารถทนอยู่ในสภาพของไนไทรต์สะสมเกิน 20 มก.-ไนโตรเจน/ล. ได้ในช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มตายอย่างต่อเนื่องจากการสะสมพิษของไนไทรต์

- *ไนเทรต*

สำหรับความเข้มข้นของไนเทรตในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) พบว่ามีปริมาณไนเทรตสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สำหรับการทดลองศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอย พบว่าที่ทั้งสองระดับความหนาแน่นมีความเข้มข้นของไนเทรตเพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของไนเทรตในระบบการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำและที่ระดับความหนาแน่นสูงมีความเข้มข้นเท่ากับ 56.87±10.08 และ 188.81±8.84 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ แต่ปลานิลยังคงมีชีวิตอยู่ได้ ซึ่งจากรายงานของ Whiston และคณะ (1994) กล่าวว่าระดับความเข้มข้นของไนเทรตที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงปลาไม่ควรสูงเกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยควรทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากระบบเลี้ยงเพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้ ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์ (2544) ยังรายงานถึงปริมาณไนเทรตที่เป็นพิษต่อปลานิลว่ามีค่าสูงกว่า 181 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ที่ระดับความเข้มข้นของไนเทรต 69 มก.-ไนโตรเจน/ล. เป็นสาเหตุทำให้ปลาติดโรคได้ง่าย ดังนั้นจากการทดลองนี้การที่ปลานิลยังคงมีชีวิตอยู่ได้ อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพการดำรงชีวิต สภาพของตัวปลาและขนาดอายุ จึงทำให้สามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติ

สำหรับการสะสมของไนเทรตในถังเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่นจะพบว่าเกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างตลอดเวลา โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไทรต์และถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นไนเทรตตามช่วงเวลาของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งเป็นลักษณะ

ของรูปแบบการเลี้ยงแบบตะกอนแขวนลอย (Active suspension pond system) หรือแบบตะกอนแขวนลอยที่เกิดการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic suspended-growth system) (Hellinga และคณะ, 1998) โดยตะกอนภายในระบบเลี้ยงเกิดจากเซลล์ของแพลงก์ตอนที่มีลักษณะเป็นกลุ่มฟล็อกที่เกิดการรวมตัวกันของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในน้ำ (Hargreaves, 2006 ; Schryver และคณะ, 2008) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการเติมอากาศแบบมากเกินพอ ทำให้น้ำเกิดการหมุนเวียนและมีปริมาณออกซิเจนที่สูง ตะกอนเกิดการฟุ้งกระจายในมวลน้ำตลอดเวลา โดยที่จะพบการสะสมของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตภายในระบบเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำมาก ดังนั้นจึงควรมีวิธีในการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดการสะสมภายในระบบเลี้ยงเพื่อส่งเสริมให้มีประสิทธิภาพผลผลิตที่สูงรวมทั้งลดมลพิษจากสารประกอบอนินทรีย์ภายในระบบเลี้ยงก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

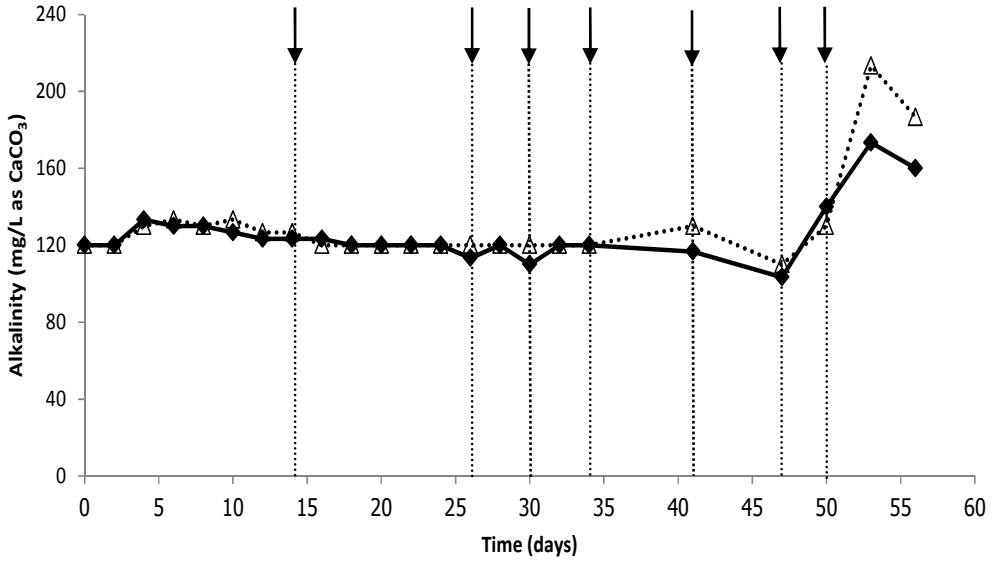
- *ฟอสเฟต*

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟตพบว่า ถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) มีปริมาณฟอสเฟตสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สำหรับการทดลองศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอย พบว่าความเข้มข้นของฟอสเฟตยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยหลังจากวันที่ 36 ของการทดลอง ปริมาณการสะสมของฟอสเฟตเกิดการเปลี่ยนแปลง อาจเนื่องมาจากมีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบการเลี้ยงปลานิลในปริมาณที่สูง จึงส่งผลให้ฟอสเฟตไม่ถูกดูดซึมไว้โดยตะกอนแขวนลอยและไม่ถูกใช้ในการเติบโตของแพลงก์ตอนพืช จนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อระบบสามารถสร้างตะกอนแขวนลอยให้มีปริมาณและคุณภาพอย่างเหมาะสม โดยพบปริมาณฟอสเฟตสูงสุดในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงในวันที่ 49 ของการทดลอง คือมีความเข้มข้นเท่ากับ 11.98±2.79 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. ส่วนถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำมีปริมาณฟอสเฟตสูงสุดในวันที่ 55 ของการทดลองคือ 1.48±0.71 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. ซึ่งจากรายงานของ Rafiee และ Saad (2005) กล่าวว่าฟอสเฟตที่พบในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะสะสมในน้ำอยู่ในช่วง 5.9 - 14.5 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. และสะสมในตะกอนแขวนลอยร้อยละ 2.95-3.89 ซึ่งปลาและกุ้งมีการสะสมฟอสฟอรัสและไนโตรเจนภายในร่างกายเฉลี่ยร้อยละ 16 และ 32 ตามลำดับ (Avnimelech และ Rityo, 2003)

- *ค่าสภาพด่างของน้ำ*

ก่อนเริ่มการทดลองได้มีการตรวจวัดและปรับค่าสภาพด่างโดยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงปลานิลให้มีความเข้มข้นประมาณ 140 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.

โดยจากการทดลองพบว่าถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองมีสภาพด่างอยู่ในช่วง 120 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งเมื่อมีการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง พบว่าสภาพด่างลดลงอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.2) จึงต้องทำการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงทุกชุดการทดลองเพื่อเพิ่มสภาพด่างในน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 120 - 160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เนื่องจากสภาพด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) หลังจากนั้นสภาพด่างในน้ำลดลงเรื่อยๆ จึงต้องมีการปรับค่าสภาพด่างตลอดเวลา โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าสภาพด่างอยู่ในช่วง 110 - 160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งแสดงว่าเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันภายในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลอง เนื่องจากสภาพด่างที่ลดลงส่วนหนึ่งเกิดจากไนทริไฟอิงแบคทีเรียนำคาร์บอนจากโซเดียมไบคาร์บอเนตไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเติบโต ซึ่งโดยทั่วไปไนทริไฟอิงแบคทีเรียต้องการสภาพด่างในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ปริมาณ 7.14 ก./ล. ในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 ก.-ไนโตรเจน/ล. ให้กลายเป็นไนเทรต (Tchobanoglous และคณะ, 2004) นอกจากนี้การเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันยังทำให้น้ำมีไฮโดรเจนอิสระเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้พีเอชของน้ำลดลง (Wheaton, 1977) ดังนั้นในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดการเติมไบคาร์บอเนตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง



รูปที่ 4.2 สภาพด่างในมวลน้ำของถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วัน ในถังการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.; ◆) และถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.; Δ) โดย (↓) แสดงวันที่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงปลานิล

- *คุณภาพน้ำอื่นๆ*

ผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้านคุณภาพน้ำทางกายภาพอื่นๆ ในช่วงระหว่างการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 56 วัน แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 6.70 - 6.90 มก./ล. ซึ่งเป็นระดับที่สามารถพบได้โดยทั่วไปและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ นั่นคือในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5 - 6 มก./ล. (Lawson, 1995) ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองจึงเป็นระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของปลานิล สำหรับค่าพีเอชในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดมีค่าประมาณ 7 - 8 ซึ่งโดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 7 - 8.5 (Hart และ O'sullivan, 1993) ส่วนผลการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าประมาณ 29 °ซ. ในทุกชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล (2547) ที่กล่าวว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลามีค่าอยู่ในช่วง 27 – 30 °ซ.

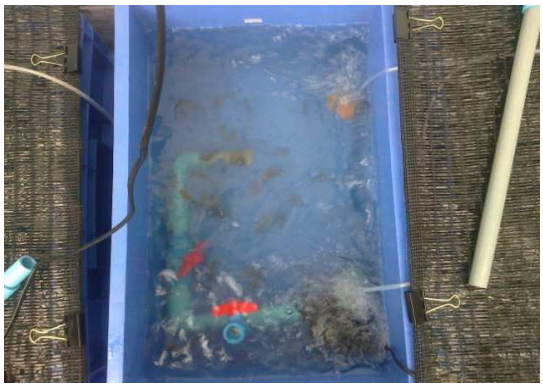
ตารางที่ 4.1 ผลสรุปคุณภาพน้ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)

คุณภาพน้ำ	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)
แอมโมเนียทั้งหมด (mg-N/L)	5.41±1.34 (0.06-30.89)	0.09±0.06 (0.01-0.32)
ไนไทรต์ (mg-N/L)	2.62±0.69 (0.13-8.06)	0.39±0.14 (0.04-1.35)
ไนเทรต (mg-N/L)	49.80±2.28 (0.98-188.81)	16.90±2.73 (0.94-56.87)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	4.91±0.60 (0.11-11.98)	0.57±0.16 (0.07-1.48)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	6.70±0.46 (6.20-7.67)	6.90±0.75 (6.20-8.41)
พีเอช (pH)	7.28±0.64 (5.66-8.19)	8.15±0.35 (7.30-8.52)
สภาพด่าง (mg-CO_3^{2-}/L)	125.51±15.58 (110.00-180.00)	130.00±23.24 (110.00-220.00)
อุณหภูมิน้ำ (°C)	28.80±1.91 (25.00-33.60)	28.70±1.77 (25.00-32.70)

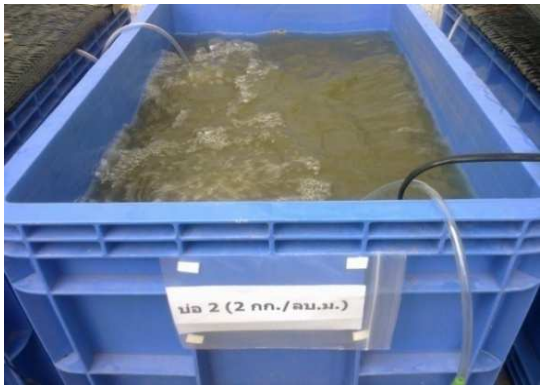
รูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่ายเปรียบเทียบสภาพของถังเลี้ยงปลานิลในวันเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง โดยช่วงเริ่มต้นการทดลองพบว่าลักษณะของน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองมีความใสจนสามารถเห็นอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณก้นถังได้อย่างชัดเจน แต่หลังจากการเลี้ยงเป็นเวลา 6 วัน น้ำเริ่มมีสีน้ำตาลอ่อนและขุ่น โดยถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและชัดเจนกว่าถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ ซึ่ง

หลังจากการเลี้ยงเป็นเวลา 18 วัน จะสามารถสังเกตเห็นสีเขียวอมน้ำตาลของแพลงก์ตอนพืชรวมกับตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) แสดงว่าภายในระบบการเลี้ยงมีสารอาหารสูงจึงพบการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชจำพวกจุลสาหร่าย (Hargreaves, 2006) ส่วนถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) จะสังเกตเห็นเป็นสีเขียวโดยมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นน้อยกว่า ทำให้แสงแดดสามารถส่องผ่านลงไปในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำได้ดีกว่าถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง เนื่องจากมีปริมาณตะกอนแขวนลอยขัดขวางการส่องผ่านของแสงได้น้อยจึงสังเกตเห็นสีเขียวของแพลงก์ตอนพืชอยู่รวมกับตะกอนแขวนลอย โดยรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบสีของน้ำและปริมาณตะกอนแขวนลอยของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลในวันที่ 43 และ 56 ของการทดลอง

ถังเลี้ยงแบบความหนาแน่นสูง
(วันเริ่มต้น)



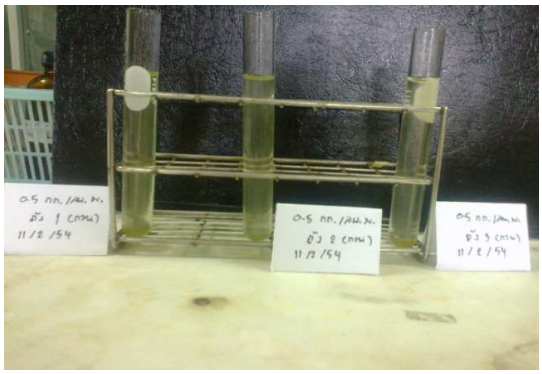
ถังเลี้ยงแบบความหนาแน่นต่ำ
(วันเริ่มต้น)



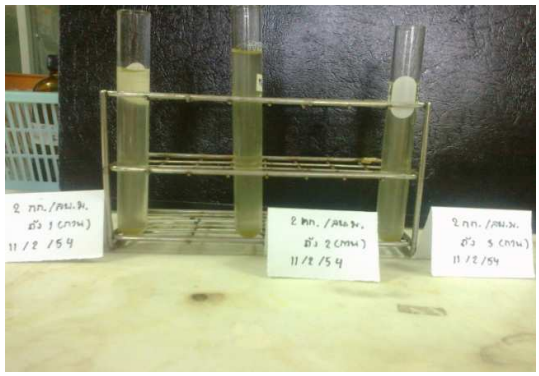
ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง
(วันที่ 56)

ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ
(วันที่ 56)

รูปที่ 4.3 สภาพการติดตั้งระบบและสีของน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) ในวันเริ่มต้นการทดลอง (บน) และเมื่อทำการเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 56 วัน (ล่าง)



ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ
(วันที่ 43)



ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง
(วันที่ 43)

ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ
(วันที่ 56)

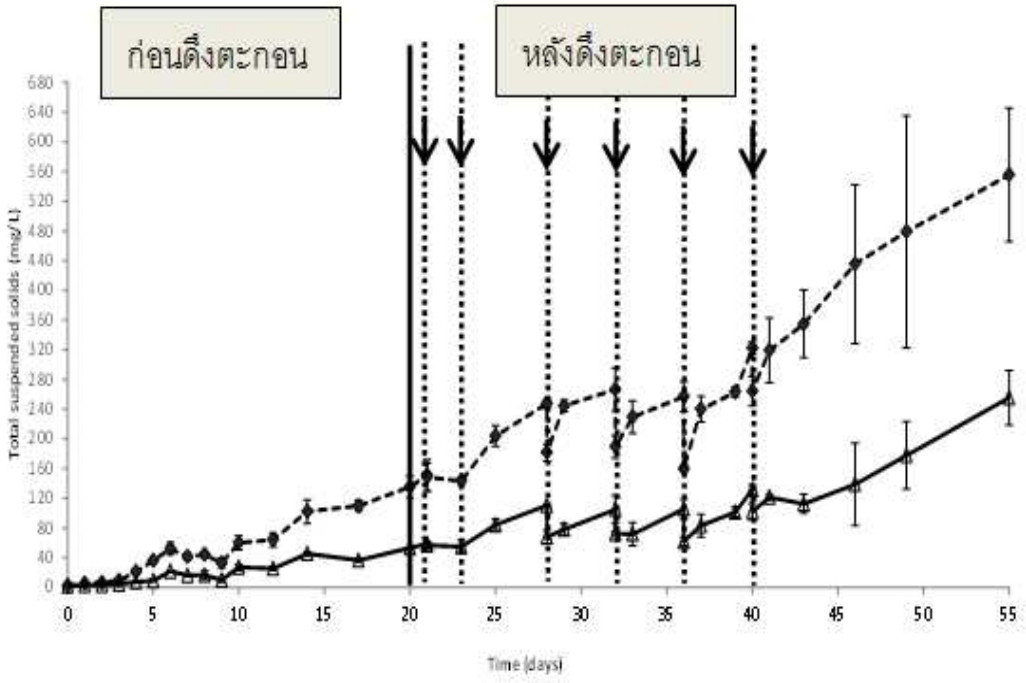
ถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง
(วันที่ 56)

รูปที่ 4.4 แสดงสีของตัวอย่างน้ำและตะกอนแขวนลอยภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) ในวันที่ 43 (บน) และวันที่ 56 (ล่าง) ของการเลี้ยงปลานิล

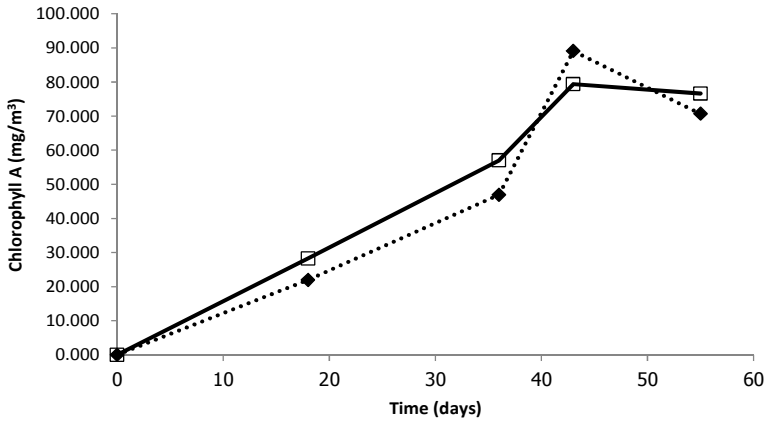
4.1.2 ปริมาณอนุภาคสารแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล

ผลการตรวจวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยในการเลี้ยงปลานิลดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) มีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูงสุดเท่ากับ 555.56±90.02 มก./ล. ส่วนการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) มีปริมาณตะกอนแขวนลอยเท่ากับ 255.56±36.72 มก./ล. หรือน้อยกว่าถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงคิดเป็นร้อยละ 54 ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองหลังจากการเลี้ยงเป็นเวลา 18 วัน สามารถสังเกตเห็นสีเขียวของแพลงก์ตอนพืชอยู่รวมกับของแข็งแขวนลอยอย่างชัดเจน โดยเมื่อทำการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เอในน้ำเลี้ยงปลานิลทุกถังการทดลองในวันที่ 43 ของการทดลอง พบว่าถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงกว่าถัง

เลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ คือมีปริมาณเท่ากับ 89.08±0.93 และ 79.40±3.34 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มของสีเขียวกับลดลงโดยการสังเกตุด้วยสายตา ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอที่มีปริมาณลดลงเช่นกันในการถังเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่น คือมีปริมาณ 70.68±5.85 และ 76.63±1.79 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ สำหรับการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและต่ำ โดยเนื่องจากในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีของแข็งแขวนลอยสะสมในปริมาณสูง จึงทำให้การสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชเกิดได้น้อย บางส่วนเกิดการตายเนื่องจากไม่ได้รับแสงอย่างเพียงพอ รวมทั้งช่วงที่มีการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง จึงส่งผลให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในปริมาณที่สูง อีกทั้งในช่วงท้ายของการทดลองมีความเข้มข้นของไนเทรตสูงกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. จึงอาจเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้แพลงก์พืชตายและลดปริมาณลง ดังนั้นปริมาณคลอโรฟิลล์เอที่ตรวจวัดได้จึงมีปริมาณที่ลดลงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูป 4.6



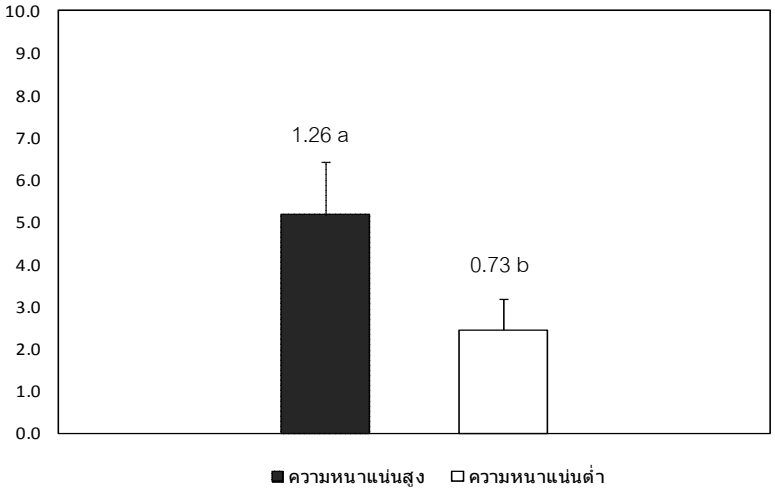
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 56 วัน โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) (Δ) แสดงการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และ (↓) แสดงวันที่ทำการดึงตะกอนออกจากถังเลี้ยงร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.; ◆) และถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.; □)

สำหรับการทดลองของ Vanitchanai และคณะ (2009) ซึ่งมีการเติมแป้งมันเพื่อช่วยการสร้างตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 1,118 มก./ล. และสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ได้ดี จากการทดลองนี้เมื่อทำการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยของการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) โดยทดลองดึงตะกอนแขวนลอยออกจากถังเลี้ยงคิดเป็นร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง พบว่าของแข็งแขวนลอยมีลักษณะเป็นฟล็อก (floc) เกาะเป็นกลุ่มและมีเศษอาหารที่เหลือ ซึ่งปริมาณของแข็งแขวนลอยสามารถเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณเท่าเดิมภายในระยะเวลา 4 วัน หรือคิดเป็นอัตราการเกิดตะกอนเท่ากับ 2.45±0.73 และ 5.17±1.26 มก./ล.-วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยแต่ละวันสูงกว่าการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำคิดเป็นร้อยละ 47.39 เนื่องจากมีปริมาณปลาที่สูงกว่าจึงส่งผลต่อปริมาณการขับถ่ายของปลาและอาหารคงค้างภายในระบบสูงขึ้นด้วย สำหรับงานวิจัยของ Teichert-Coddington และคณะ (1999) พบว่า แม้กระบวนการตกตะกอนจะสามารถแยกของแข็งแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ดี โดยปริมาตรน้ำ 10,000 ลบ.ม. สามารถแยกตะกอนได้ 1,285 กก. แต่เป็นปริมาณของแข็งอนินทรีย์เพียงร้อยละ 68 โดยของแข็งอินทรีย์และแพลงก์ตอนจะลอยตัวตามธรรมชาติ สำหรับในการทดลองนี้เมื่อทำการดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบในปริมาณที่สูงอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ภายในระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน จากการเสียสมดุลของกระบวนการดูดซึมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตะกอนแขวนลอยรวมกับกระบวนการไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังส่งผลต่อค่าสภาพ

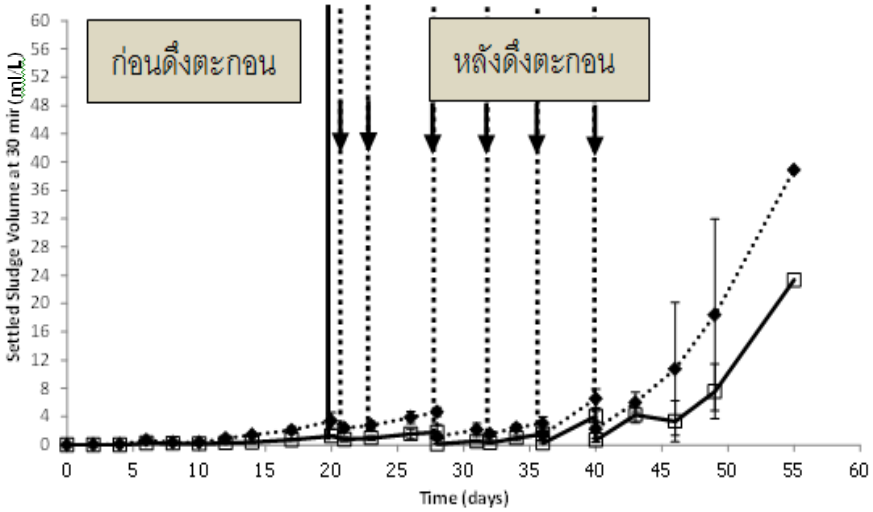
ด่างที่ลดลงอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมให้สภาพด่างอยู่ในช่วง 120 -160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และจากรายงานของ Timmons และคณะ (2002) กล่าวว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปไม่ควรมีค่าเกิน 80 มก./ล. เนื่องจากอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาต่างๆ ภายในระบบ และเกิดการสะสมสารพิษต่างๆ ในตะกอนแขวนลอยเมื่อมีปริมาณสูงเป็นเวลานาน ซึ่งจะถูกปลดปล่อยสู่มวลน้ำและเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ ส่วน Azim และคณะ (2008) รายงานเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบว่าไม่ควรเกิน 500 มก./ล. เนื่องจากตะกอนแขวนลอยที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการลดออกซิเจนและบดบังการมองเห็นในการหาอาหารของสัตว์น้ำ สำหรับการประมาณค่าตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นภายในระบบสามารถช่วยให้การวางแผนการกรองและนำตะกอนไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงแบบหมุนเวียนน้ำโดย Azim และ Little (2008) พบว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดอยู่ในช่วง 87 - 597 มก./ล. ซึ่งจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันกับค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยที่วิเคราะห์ได้ในถังเลี้ยงปลานิลจากงานวิจัยนี้



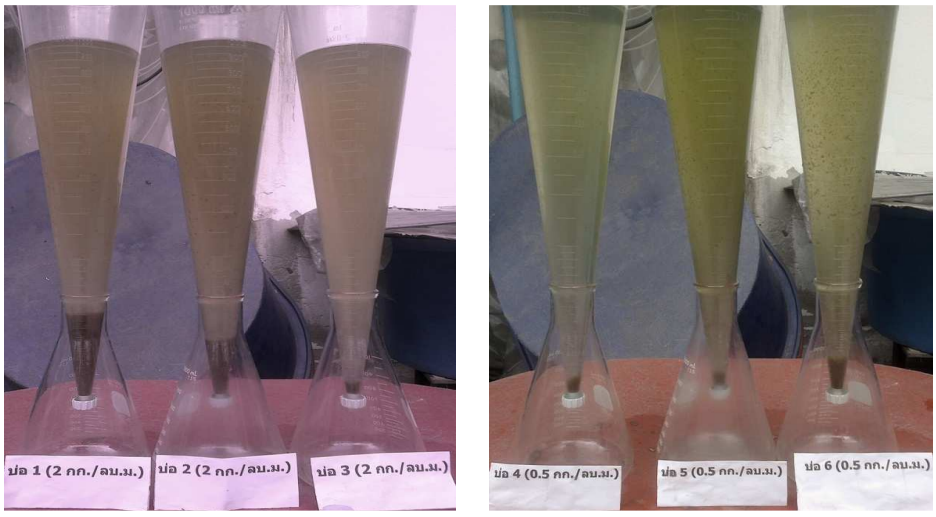
รูปที่ 4.7 อัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในแต่ละวันของระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับควาหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.; ■) และระบบเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.; □) โดยตัวอักษร a, b แสดงถึงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

ส่วนรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิล (SV_{30}) ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) มีปริมาตรตะกอนเท่ากับ 38.89±19.53 มล./ล. ส่วนถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) มีปริมาตรตะกอนเท่ากับ 23.33±1.67 มล./ล. โดยพบว่ามีความสอดคล้องกับปริมาณ

ตะกอนแขวนลอยที่มีในแต่ละถังเลี้ยงปลานิลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่ง Hargreaves (2006) กล่าวว่า อนุภาคที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงมักมีสัดส่วนของจุลสาหร่ายรวมกับตะกอนแขวนลอยสูงกว่าสัดส่วนของแบคทีเรีย



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรตะกอน (SV_{30}) ในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.; ◆) ถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.; □) ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 56 วัน และ (↓) แสดงวันที่ทำการดึงตะกอนออกจากถังเลี้ยงร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถัง



ปริมาตรตะกอนของถังเลี้ยงแบบความหนาแน่นสูง ปริมาตรตะกอนของถังเลี้ยงแบบความหนาแน่นต่ำ

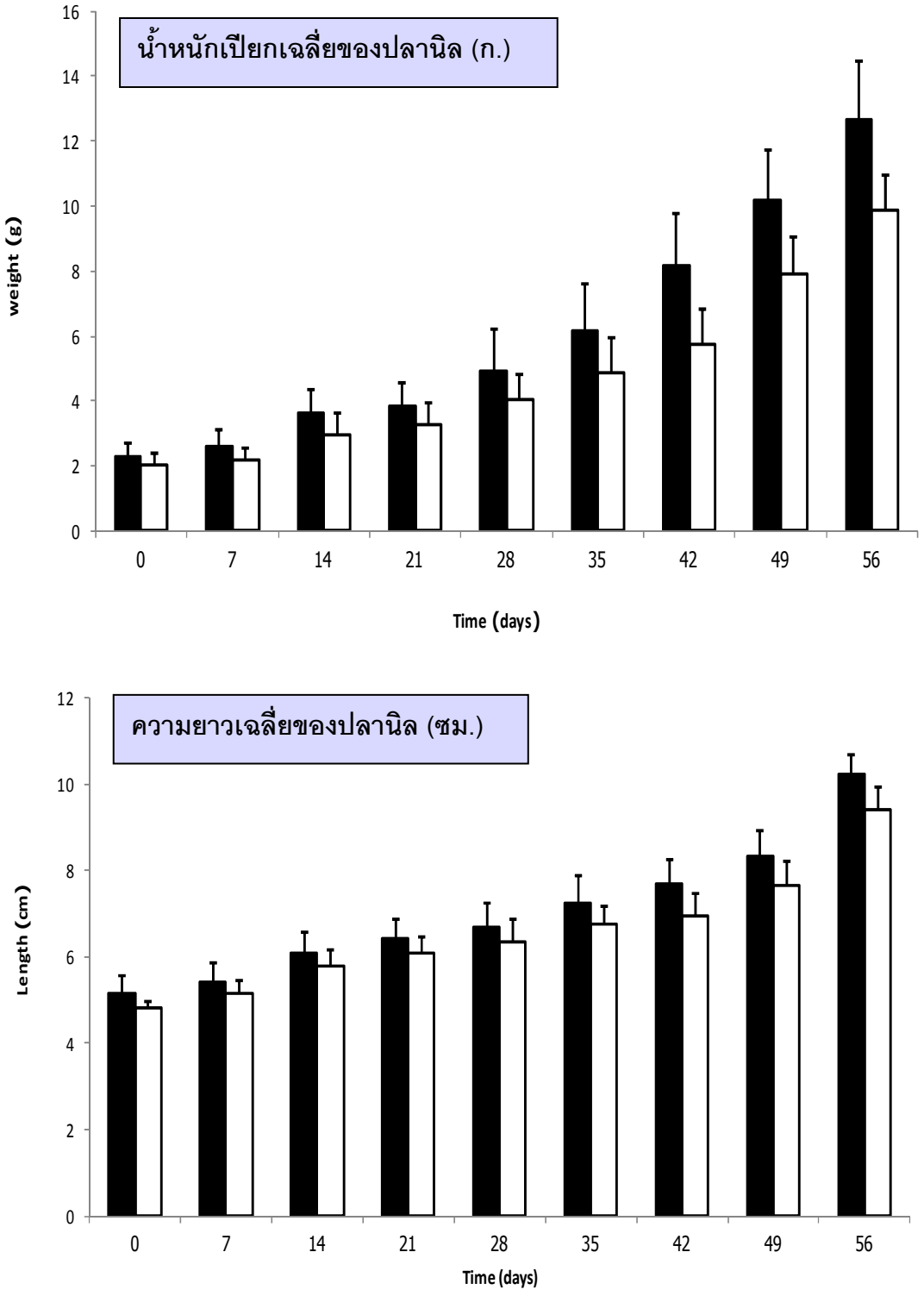
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายเปรียบเทียบการวัดปริมาตรตะกอนจากถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) (ซ้าย) และถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) (ขวา)

4.1.3 อัตราการเติบโตของปลานิล

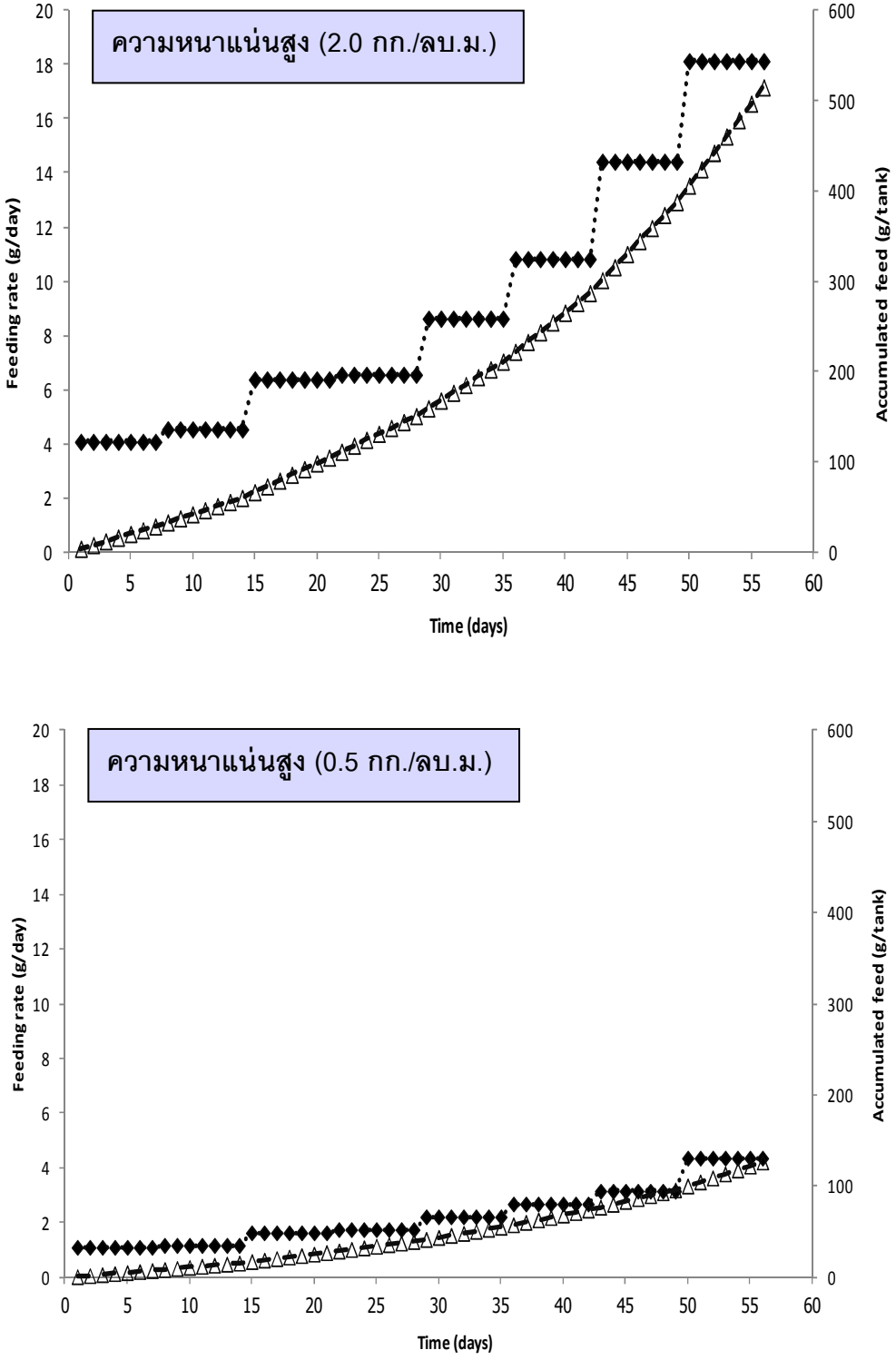
จากการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 56 วัน โดยเปรียบเทียบระหว่างการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ซึ่งพบว่าการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงคิดเป็นจำนวนปลาถังละ 32 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 2.31±0.42 ก.-นน. เปียก/ตัว และความยาวเฉลี่ยเริ่มต้น 5.14±0.43 ซม. สำหรับการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำคิดเป็นจำนวนปลาถังละ 11 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 2.01±0.38 ก.-นน. เปียก/ตัว และความยาวเฉลี่ยเริ่มต้น 4.81±0.18 ซม. โดยระหว่างการทดลองจะทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลทุกสัปดาห์ด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความยาวลำตัว ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนของขนาดลำตัวปลานิลจากถังทดลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวันแรกที่เริ่มปล่อยปลาลงถังกับวันสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายปลานิลก่อนการทดลอง (ซ้าย) และสิ้นสุดการทดลอง (ขวา)

กราฟในรูปที่ 4.11 แสดงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิลในแต่ละสัปดาห์ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงเป็นเวลา 56 วัน ในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง โดยพบว่าปลานิลในทุกชุดการทดลองมีการเติบโตขึ้น ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงมีน้ำหนักเฉลี่ยสูงกว่าถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำโดยมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 12.65±1.80 และ 9.86±1.12 ก.-นน. เปียก/ตัว ตามลำดับ และเมื่อตรวจวัดความยาวของปลานิลในทุกชุดการทดลองก็พบว่ามีความยาวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยผลการตรวจวัดความยาวของปลานิลในวันสุดท้ายของการทดลอง พบว่ามีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 10.23±0.44 และ 9.42±0.49 ซม. สำหรับถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ ส่วนรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณอาหารที่ให้สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ทั้งสองระดับความหนาแน่น



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเปียกเฉลี่ย (บน) และความยาวเฉลี่ยของปลานิล (ล่าง) ในถังที่เลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.; ■) และถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.; □) ในแต่ละสัปดาห์ของการทดลอง



รูปที่ 4.12 ปริมาณอาหารที่ให้ (◆) และปริมาณอาหารที่ให้สะสม (Δ) ภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) (บน) และถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) (ล่าง)

โดยทั่วไปทั้งอัตราการเติบโตและอัตราการรอดตายของปลานิลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของการเลี้ยง ได้แก่ อายุและขนาดปลานิล ความหนาแน่น คุณภาพน้ำ สุขภาพและความสมบูรณ์ของปลา ปริมาณและคุณภาพอาหารที่ให้ตลอดช่วงระยะเวลาการเลี้ยง (Bouldin และคณะ, 1974) โดยงานวิจัยนี้ทำการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) จากผลการทดลองพบว่า การเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีอัตราการเติบโตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 0.18±0.03 และ 0.14±0.01 ก.-นน. เปียก/วัน ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในชุดการทดลองทั้งสองระดับความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งอัตราการเติบโตดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Azim และ Little (2008) ที่รายงานถึงการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่น 12 กก./ลบ.ม. มีอัตราการเติบโตเฉลี่ย 0.16±0.09 ก.-นน. เปียก/วัน นั่นคือ การเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงมีอัตราการเติบโตสูงกว่าความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากปลานิลเป็นสัตว์สังคมจึงมีพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นฝูงใหญ่ จึงส่งเสริมต่อสุขภาพปลานิลที่แข็งแรงและการบริโภคอาหารที่สูงขึ้น อีกทั้งปัจจัยด้านระบบนิเวศและสภาวะแวดล้อมภายในถังเลี้ยงปลานิลที่แตกต่างกัน เช่น ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มแสง และแบคทีเรียที่มีประโยชน์ เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุของการเติบโตที่แตกต่างกันได้ สำหรับอัตราการแลกเนื้อของการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงมีค่าเท่ากับ 1.47 และ 1.39 ตามลำดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 56) ทั้งสองระดับความหนาแน่นมีอัตราการรอดตายร้อยละ 100

จากผลการศึกษาของ Gross และคณะ (2000) ที่ศึกษาสมดุลไนโตรเจนในการเลี้ยงปลานิลที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 17 ก. และทำการทดลองเป็นเวลา 133 วัน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าได้ผลผลิต 564 กก./ไร่ คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.5 ±0.5 และมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 7.80±0.14 ซึ่งอัตราการรอดตายของปลานิลคิดเป็นร้อยละ 94 และอัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 1.4 สำหรับผลการทดลองจากการเลี้ยงปลานิลในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าปลานิลที่เลี้ยงมีอัตราการรอดตายและอัตราการแลกเนื้อที่สูงกว่าการศึกษาของ Gross และคณะ (2000) โดยทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปัจจัยในการเลี้ยงและสภาวะแวดล้อมหลายๆ ประการที่แตกต่างกัน ได้แก่ งานวิจัยนี้มีการให้อาหารปลาที่มีปริมาณโปรตีนสูง (ร้อยละ 25) มีการให้อาหารที่เท่ากันทุกวันและปรับปริมาณอาหารที่ให้ใหม่อย่างเหมาะสมในทุกสัปดาห์ รวมทั้งความเหมาะสมของสภาวะแวดล้อมและระบบนิเวศภายในถังเลี้ยงปลานิล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเติบโตและอัตราการรอดตายของปลานิล

ตารางที่ 4.2 ผลการเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 56 วัน จากถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) และการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)

ผลการเลี้ยงปลานิล	ความหนาแน่นสูง	ความหนาแน่นต่ำ
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	56	56
จำนวนปลานิลเริ่มต้น (ตัว)	32	11
จำนวนปลานิลวันสุดท้าย (ตัว)	32	11
ขนาดน้ำหนักเริ่มต้น (ก.-นน. เปียก)	2.31±0.42	2.01±0.38
ขนาดน้ำหนักสุดท้าย (ก.-นน. เปียก)	12.65±1.80	9.86±1.12
ขนาดความยาวเริ่มต้น (ซม.)	5.14±0.43	4.81±0.18
ขนาดความยาวสุดท้าย (ซม.)	10.23±0.44	9.42±0.49
น้ำหนักอาหารทั้งหมด (ก.)	514.84	126.74
น้ำหนักปลานิลที่ปล่อย (กก./ลบ.ม.,กก./ตร.ม.)	2.04/0.37	0.55/0.10
น้ำหนักปลานิลวันสุดท้าย (กก./ลบ.ม.,กก./ตร.ม.)	11.28/2.05	2.71/0.49
อัตราการเติบโต (ก.-นน. เปียก/วัน)	0.18±0.03	0.14±0.01
ผลผลิต (กก.-นน. เปียก/ไร่)	2,681.45	626.72
อัตราการแลกเนื้อ	1.39	1.47
อัตราการรอดตายวันที่ 56 (ร้อยละ)	100	100

4.1.4 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังเลี้ยงปลานิล

ผลการเปรียบเทียบแหล่งและปริมาณไนโตรเจนรวมทั้งฟอสฟอรัสในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ในช่วงเวลาเริ่มต้นการทดลองและในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองภายหลังการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 56 วัน และผลการประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส แสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.6 ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลประกอบด้วย อาหารปลาทั้งหมดที่ใส่ในถังเลี้ยงปลานิล รวมทั้งปริมาณที่มีอยู่ในเนื้อปลานิล และการละลายอยู่ในน้ำ โดยพบว่าแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดของทั้งสองระดับความหนาแน่นในการเลี้ยงปลานิลมีการเปลี่ยนแปลงถ่ายโอนมวลสาร เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในเม็ดอาหารปลาจะเข้าไปสะสมอยู่ในตัวปลานิลเมื่อมีการเติบโต รวมทั้งสะสมอยู่ในจุลสาหร่ายและจุลินทรีย์ต่างๆ ในน้ำและตะกอนแขวนลอย ซึ่งการจัดทำสมดุลไนโตรเจนในถังเลี้ยงปลานิลทั้งสองระดับความหนาแน่น พบว่าไนโตรเจนส่วนใหญ่ที่เข้าสู่ระบบมาจากอาหารปลา โดยคิดเป็นร้อยละ 92.33 และ 90.51 ซึ่งช่วงเริ่มต้นมีปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 6.96 และ 9.29 และอีกประมาณร้อยละ 0.71 และ 0.20 เป็นส่วนของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ สำหรับการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความ

หนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง พบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สามารถคำนวณได้มาจากไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดร้อยละ 23.58 และ 16.70 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 2.84 และ 1.58 ตามลำดับ สำหรับไนโตรเจนที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลาของการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงคิดเป็นร้อยละ 37.09 ส่วนการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำคิดเป็นร้อยละ 47.16 และสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้ (Unaccounted nitrogen) ร้อยละ 44.63 และ 26.42 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้เป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญหายออกจากระบบทั้งจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนแขวนลอยตามริมขอบมุมถังเลี้ยงปลานิลที่เป็นบริเวณจุดอับอากาศ (dead zone) แม้จะมีการเติมอากาศแต่การฟุ้งกระจายไม่ทั่วทั้งถังเลี้ยงปลานิล นั่นคือ ไนโตรเจนสูญหายออกจากระบบในรูปของแก๊สไนโตรเจน (N_2) นอกจากนี้บางส่วนอาจระเหยไปในรูปของแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ได้เช่นกัน แต่มีสัดส่วนน้อย เนื่องจากที่ระดับพีเอชของน้ำในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 7 – 8 และอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25 – 33 °ซ ซึ่งแอมโมเนียส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 0.55 – 5.28 จะอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ซึ่งจะคงละลายอยู่ในน้ำ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2551) รวมทั้งไนโตรเจนส่วนหนึ่งอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิล โดยงานวิจัยนี้จะพบว่ามีปริมาณของไนโตรเจนที่สะสมในตัวปลามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ Avnimelech และ Rityo (2003) ที่อธิบายถึงปริมาณอาหารที่เข้าระบบทั้งหมดจะมีไนโตรเจนประมาณร้อยละ 22 และฟอสฟอรัสร้อยละ 16 ที่ถูกเปลี่ยนเป็นผลผลิตของสัตว์น้ำ สำหรับรายงานของ Rafiee และ Saad (2005) กล่าวว่าปริมาณไนโตรเจนที่ปลาต้องการคิดเป็นร้อยละ 32.53 ของอาหารที่ให้ตลอดการทดลอง 20 - 200 ก. และเปลี่ยนเป็นผลผลิตของสัตว์น้ำร้อยละ 44 ซึ่งมีรายงานหลายฉบับที่มีข้อเสนอแนะตรงกันเกี่ยวกับสมดุลไนโตรเจนภายในระบบเลี้ยงปลาจะมีไนโตรเจนภายในระบบคิดเป็นร้อยละ 20 - 40 มาจากอาหารปลาและอยู่ในรูปแอมโมเนีย (Rafiee และคณะ, 2002) ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนในระบบเลี้ยงมาจากอาหารปลาร้อยละ 39.29 สิ่งขับถ่ายของปลาร้อยละ 28 - 26 และเกิดการสะสมในตะกอนแขวนลอยร้อยละ 24 (Lin และ Nash, 1996 ; Funge-Smith และ Briggs, 1998) ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้มีการให้อาหารปลาในปริมาณที่สูง ธาตุอาหารไนโตรเจนจึงสะสมในส่วนต่างๆ ของระบบสูงกว่างานวิจัยอื่นๆ นอกจากนี้ในช่วงระหว่างการทดลองจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีการตรวจพบการเติบโตของแพลงก์ตอน จึงทำให้มีการดึงธาตุอาหารบางส่วนภายในระบบไปใช้

สำหรับการเปรียบเทียบแหล่งและปริมาณฟอสฟอรัสในระบบถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและที่ระดับความหนาแน่นสูงตลอดระยะเวลาการเลี้ยงปลานิล 56 วัน และทำการประเมินสมดุลของฟอสฟอรัส ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าแหล่งฟอสฟอรัสที่

เข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดของการเลี้ยงปลานิลส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาซึ่งคิดเป็นร้อยละ 18.75 และ 46.29 ซึ่งช่วงเริ่มต้นมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 3.13 และ 0.93 รวมทั้งฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ละลายน้ำคิดเป็นร้อยละ 1.56 และ 0.93 ตามลำดับ โดยเป็นส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ (Unaccounted phosphorus) มีในปริมาณที่สูงมากเท่ากับ 76.56 และ 51.85 ในการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ตามลำดับ ซึ่งจากรายงานของ Khan และคณะ (2010) กล่าวว่าในเนื้อพลาสติกมีส่วนผสมของสารโพลีเอสเตอร์ซีเรียม (IV) ฟอสเฟต ($Ce_2(PO_4)_3$) เจือปนอยู่ ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่ไม่สามารถระบุได้จึงอาจมาจากถังพลาสติกที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิล บางส่วนมาจากแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำเลี้ยงปลานิล และสารซักฟอกที่ใช้ในการล้างถังเลี้ยงปลานิลแล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดไม่หมด เมื่อสิ้นสุดการทดลองการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำทั้งหมดมีปริมาณสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 73.44 และ 62.64 รองลงมาคือฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 23.44 และ 43.52 ตามลำดับ สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยของการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงคิดเป็นร้อยละ 2.78 ซึ่งต่ำกว่าการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำที่คิดเป็นร้อยละ 3.12 โดยจากรายงานของ Rafiee และ Saad (2005) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่ปลาต้องการคิดเป็นร้อยละ 15.98 และ 7.16 ของปริมาณอาหารที่ให้ตลอดการทดลอง 20 - 200 ก. โดยเปลี่ยนเป็นผลผลิตของสัตว์น้ำร้อยละ 55 และ 24 ตามลำดับ และตะกอนแขวนลอยมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสะสมคิดเป็นร้อยละ 2.11 – 2.87 2.95 – 3.89 และ 0.024 – 0.50 ตามลำดับ นอกจากนี้ Avnimelech และ Lacher (1979) รายงานว่าตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงปลานิลเป็นที่สะสมของสารอาหารเป็นส่วนใหญ่และถูกปลดปล่อยสู่น้ำในระบบเลี้ยงโดยมีการสะสมของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมคิดเป็นร้อยละ 84.02 และ 92.84 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแหล่งสารอาหารของแบคทีเรียและพืชต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)										
องค์ประกอบไนโตรเจน	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**%ไนโตรเจน***	**ก.-ไนโตรเจน/ถัง**			**%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	514.84	-	470.54	-	5.61	26.40	-	-	90.51	-
ปลานิล	82.34	451.02	28.84	152.72	9.40/8.86**	2.71	13.53	10.82	9.29	37.09
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-	-	-	-	-	0.06	4.93	4.87	0.20	16.70
ไนโตรเจนละลายน้ำ (TDIN)	-	-	-	-	-	0.06	4.58	4.52	0.20	15.50
ไนโตรเจนที่ไม่ละลายน้ำ	-	-	-	-	-	0	0.35	0.35	0	1.20
ตะกอนแขวนลอย	-	-	-	25.01	1.85	-	0.46	0.46	-	1.58
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	13.02	-	44.63
ผลรวมไนโตรเจน						**29.17**	-	**29.17**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.4 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)										
องค์ประกอบไนโตรเจน	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**%ไนโตรเจน***	**ก.-ไนโตรเจน/ถัง**			**%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	126.74	-	115.83	-	5.61	6.50	-	-	92.33	-
ปลานิล	23.10	108.46	5.23	41.62	9.40/9.16**	0.49	3.81	3.32	6.96	47.16
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-	-	-	-	-	0.05	1.71	1.66	0.71	23.58
ไนโตรเจนละลายน้ำ (TDIN)	-	-	-	-	-	0.05	1.66	1.61	0.71	22.87
ไนโตรเจนที่ไม่ละลายน้ำ	-	-	-	-	-	0	0.05	0.05	0	0.71
ตะกอนแขวนลอย	-	-	-	11.50	1.77	-	0.20	0.20	-	2.84
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	1.86	-	26.42
ผลรวมไนโตรเจน						**7.04**	-	**7.04**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.5 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)										
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**			**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	514.84	-	470.54	-	1,067.81	0.50	-	-	46.29	-
ปลานิล	82.34	451.02	28.84	152.72	3,848.35/3116.91**	0.01	0.48	0.47	0.93	43.52
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	-	-	-	-	-	0.01	0.59	0.58	0.93	62.64
ตะกอนแขวนลอย	-	-	-	25.01	1,402.67	-	0.03	0.03	-	2.78
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	0.56	-	-	51.85	-
ผลรวมฟอสฟอรัส						**1.08**	-	**1.08**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.6 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลาความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)										
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**			**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	126.74	-	115.83	-	1,067.81	0.12	-	-	18.75	-
ปลานิล	23.10	108.46	5.23	41.62	3,848.35/4,085.86**	0.02	0.17	0.15	3.13	23.44
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	-	-	-	-	-	0.01	0.48	0.47	1.56	73.44
ตะกอนแขวนลอย	-	-	-	11.50	1,393.94	-	0.02	0.02	-	3.12
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	0.49	-	-	76.56	-
ผลรวมฟอสฟอรัส						**0.64**	-	**0.64**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

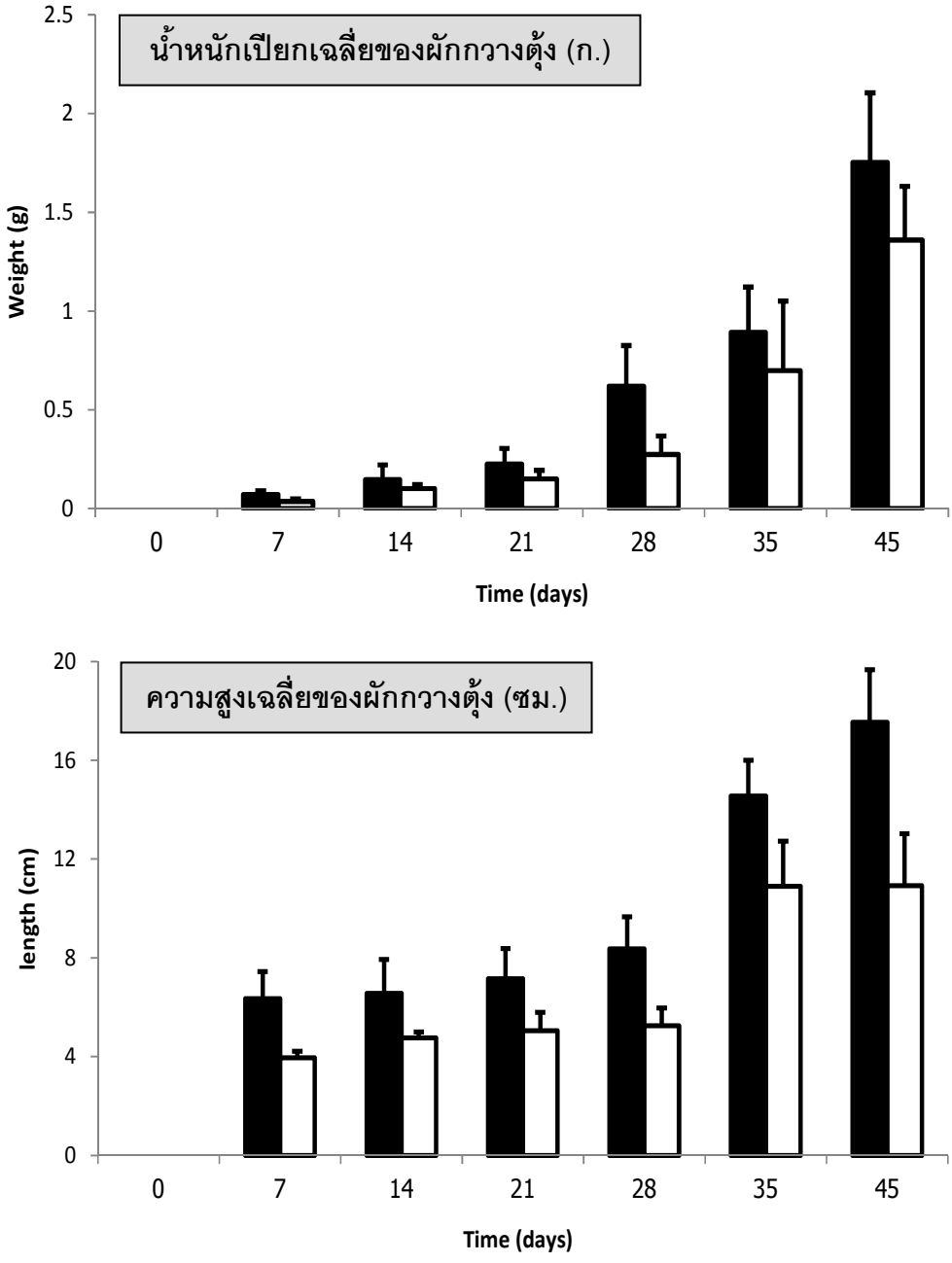
4.2 การศึกษาอัตราการเติบโตและความต้องการธาตุอาหารของพืช

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการเติบโตและปริมาณธาตุอาหารที่ผักกวางตุ้งใช้ตลอดระยะเวลาก่อนการเก็บเกี่ยว โดยในระหว่างการทดลองทำการเติมปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งสารอาหารสำหรับผักกวางตุ้งใช้ในการเติบโตสัปดาห์ละ 2 ครั้ง และให้น้ำวันละ 2 ครั้ง สำหรับการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 45 วัน ซึ่งในช่วงระหว่างการทดลองมีการควบคุมปัจจัยสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสม รวมทั้งการป้องกันและควบคุมโรคแมลงต่างๆ ภายในโรงเรือน (Johnson และ Wardlow, 1997) จากนั้นทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตในทุกสัปดาห์

4.2.1 อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง

จากการทดลองปลูกผักกวางตุ้งด้วยต้นกล้าที่มีอายุ 7 วันลงสู่ถังปลูกเป็นระยะเวลา 45 วัน โดยระหว่างการทดลองทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งทุก 7 วัน และเปรียบเทียบการเติบโตของผักกวางตุ้งระหว่างถังที่ปลูกในดินเพาะปลูกและปลูกบนเม็ดดินเผา ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 แสดงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง ส่วนรูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายการเติบโตของผักกวางตุ้งที่ปลูกในดินเพาะปลูกและปลูกบนเม็ดดินเผา สำหรับข้อมูลการเติบโตของผักกวางตุ้งโดยละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งผลการทดลองพบว่าการปลูกผักกวางตุ้งในดินเพาะปลูกและถังที่ปลูกบนเม็ดดินเผามีการเติบโตที่สูงขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 1.76±0.35 และ 1.36±0.27 ก.-นน เปียก/ต้น ตามลำดับ เมื่อตรวจวัดความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้งในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเท่ากับ 17.54±2.14 และ 10.93±2.10 ซม. ตามลำดับ โดยผักกวางตุ้งที่ปลูกในดินเพาะปลูกมีอัตราการเติบโตสูงกว่าการปลูกบนเม็ดดินเผา คือ 0.04±0.01 และ 0.03±0.01 ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในชุดการทดลองทั้งสองชุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) สำหรับเหตุผลนั้นในดินเพาะปลูกมีการผสมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืชอย่างสมบูรณ์ โดยเมื่อทำการเติมปุ๋ยอินทรีย์ลงไปจึงทำให้มีแร่ธาตุอาหารต่างๆ อย่างเพียงพอต่อความต้องการของพืช แตกต่างจากในเม็ดดินเผาที่ไม่มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืชเลย จึงทำให้พืชมีอัตราการเติบโตต่ำและปุ๋ยอินทรีย์ที่เติมลงไปอาจยังไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อการเจริญของพืช แต่ข้อดีของเม็ดดินเผา คือ มีรูพรุนสูง จึงมีส่วนช่วยให้มีการระบายอากาศที่ดีกว่าในดินเพาะปลูกที่เมื่อปลูกพืชเป็นเวลานานจะเกิดการอุดตันและลดอัตราการเติบโตได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งกับรายงานของ ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ (2541) ที่พบว่าผักกวางตุ้งอายุ 55 วัน มีน้ำหนักเฉลี่ย 4.07 ก.-นน. เปียก และความสูงเฉลี่ย 28 ซม. ผลการวิจัยนี้ทั้งน้ำหนักและความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้งมีค่าต่ำกว่าการปลูกโดยทั่วไป อาจเนื่องมาจากความแตกต่างด้านปัจจัยการปลูก การขาดธาตุอาหารหลักและธาตุ

อาหารรอง รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่จำเป็นต่อการเติบโต เช่น ปริมาณแสงที่เพียงพอ อากาศที่ถ่ายเทได้สะดวก ปริมาณความชื้น เป็นต้น นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อเร่งการเติบโตซึ่งมีธาตุอาหารที่จำเป็นและพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันทีมากกว่าปุ๋ยอินทรีย์ อัตราการเติบโตดังกล่าวจึงสูงกว่าในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเปียกเฉลี่ย (บน) และความสูงเฉลี่ยของผักกวางตุ้ง (ล่าง) ในถังที่ปลูกด้วยดินเพาะ (■) และในถังที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (□) ในแต่ละสัปดาห์ของการทดลอง 45 วัน

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบการปลูกผักกวางตุ้งระหว่างการปลูกด้วยดินเพาะปลูกและการปลูกบนเม็ดดินเผาเป็นเวลา 45 วัน

พารามิเตอร์	ปลูกด้วยดินเพาะปลูก	ปลูกด้วยเม็ดดินเผา
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	45	45
ขนาดน้ำหนักเริ่มต้น (ก.-นน. เปียก)	0.07±0.02	0.04±0.01
ขนาดน้ำหนักสุดท้าย (ก.-นน. เปียก)	1.76±0.35	1.36±0.27
ขนาดความสูงเริ่มต้น (ซม.)	6.36±1.09	3.96±0.27
ขนาดความสูงสุดท้าย (ซม.)	17.54±2.14	10.93±2.10
น้ำหนักปุ๋ยอินทรีย์ทั้งหมด (ก.)	15.24	10.43
อัตราการเติบโต (ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน)	0.04±0.01	0.03±0.01
ผลผลิต (กก./ไร่)	358.21	250.95

ต้นกล้าอายุ 7 วันที่ปลูกบนดินเพาะปลูก

ต้นกล้าอายุ 7 วันที่ใช้ปลูกบนเม็ดดินเผา

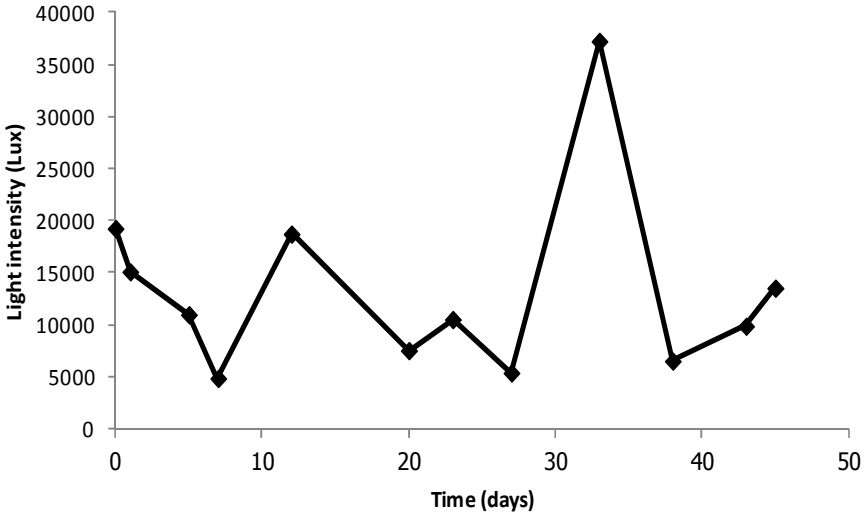
ผักกวางตุ้งปลูกบนดินเพาะปลูกอายุ 45 วัน

ผักกวางตุ้งปลูกบนเม็ดดินเผาอายุ 45 วัน

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายการเติบโตของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกและปลูกบนเม็ดดินเผา ของผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน (บน) และสิ้นสุดการทดลอง 45 วัน (ล่าง)

- *ความเข้มแสง*

ผลการรวบรวมข้อมูลของความเข้มแสงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเติบโตและการสังเคราะห์แสงของผักกวางตุ้ง รวมทั้งการหมายรวมถึงปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเติบโตของปลานิล แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยเมื่อตรวจวัดในช่วงเวลาแดดจัด (13.00 น.) ตลอดการทดลอง พบว่าความเข้มแสงอยู่ในช่วง 4,870 - 37,240 ลักซ์ โดยจากรายงานของดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ (2541) กล่าวว่าความเข้มแสง 16,000 ลักซ์ เพียงพอต่อการสังเคราะห์แสงของพืชผักทุกชนิด



รูปที่ 4.15 ปริมาณความเข้มแสงที่แตกต่างกันที่เวลา 13.00 น. ตลอดการทดลอง

4.2.2 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังปลูกผักกวางตุ้ง

ผลการเปรียบเทียบแหล่งและปริมาณไนโตรเจนรวมทั้งฟอสฟอรัสในถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูกและบนเม็ดดินเผาในช่วงเวลาเริ่มต้นการทดลองและในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองเป็นระยะเวลา 45 วัน ซึ่งการประเมินสมดุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึง 4.11 ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ถังปลูกพืชประกอบด้วย ปุ๋ยอินทรีย์ทั้งหมดที่ใส่ในถังปลูกพืช และปริมาณที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อผักกวางตุ้ง โดยพบว่าแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ถังปลูกผักกวางตุ้งมีการเปลี่ยนแปลงถ่ายโอนมวลสาร เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปุ๋ยอินทรีย์จะเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อผักกวางตุ้งเมื่อมีการเติบโต รวมทั้งสะสมอยู่ในดินเพาะปลูกหรือเม็ดดินเผา และบางส่วนจุลสาหร่ายในถังบรรจุน้ำใช้ในการเติบโต ซึ่งการจัดทำสมดุลไนโตรเจนในถังปลูกผักกวางตุ้งทั้งสองชุดการทดลอง พบว่าเมื่อเติมปุ๋ยอินทรีย์เข้าไปในระบบเพื่อเป็นแหล่งสารอาหารไนโตรเจนและใช้ในการเติบโตของผักกวางตุ้ง ซึ่งการปลูกบนดินเพาะปลูกและบนเม็ดดินเผาต้องการไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 2.27 และ 3.10 ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นการทดลองมี

ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะคิดเป็นร้อยละ 4.81 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการปลูกบนเม็ดดินเผาที่คิดเป็นร้อยละ 2.52 เนื่องจากในดินเพาะปลุกมีปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองต่างๆ อยู่อย่างเพียงพอ โดยมีส่วนของสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้ ในปริมาณที่สูงเท่ากับร้อยละ 92.92 และ 94.38 ตามลำดับ สำหรับผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกและเม็ดดินเผา ซึ่งสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้เป็นส่วนที่เกิดจากสารอาหารที่ผสมอยู่ในดินเพาะปลูก และการย่อยสลายสารอาหารในดินโดยแบคทีเรีย และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีไนโตรเจนสะสมในผักกวางตุ้งทั้งสองชุดการทดลองคิดเป็นร้อยละ 100 ส่วนปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในเม็ดดินเผามีปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลบางส่วนอาจยังไม่ครบถ้วน นั่นคือ ไนโตรเจนอาจสูญหายออกจากระบบด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน สำหรับการประเมินปริมาณฟอสฟอรัสในการปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูกและบนเม็ดดินเผาพบว่า ผักกวางตุ้งต้องการปริมาณฟอสฟอรัสจากปุ๋ยอินทรีย์ในการเติบโตคิดเป็นร้อยละ 7.50 และ 0.18 ซึ่งช่วงเริ่มต้นมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในผักกวางตุ้งคิดเป็นร้อยละ 5.00 และ 0.09 ตามลำดับ โดยถังปลูกผักกวางตุ้งในดินเพาะปลูกมีส่วนที่ไม่สามารถระบุได้สูงถึงร้อยละ 87.50 ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากสารอาหารเช่นเดียวกับไนโตรเจน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีฟอสฟอรัสสะสมในผักกวางตุ้งคิดเป็นร้อยละ 100 และ 1.78 สำหรับการปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูกและปลูกบนเม็ดดินเผาตามลำดับ ซึ่งบางส่วนอาจสะสมอยู่ในดินเพาะปลูกที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูล นอกจากนี้ฟอสฟอรัสบางส่วนภายในเม็ดดินเผายังถูกใช้เป็นสารอาหารในการเติบโตของผักกวางตุ้งได้ และอีกประมาณร้อยละ 7.39 เป็นสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้ ซึ่งเป็นส่วนที่สูญหายออกจากถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา เนื่องจากจุลสาหร่ายในถังบรรจุน้ำใช้ในการเติบโต รวมทั้งอาจสะสมในตะกอนเม็ดดินเผาที่ตกตะกอนในถังบรรจุน้ำ สำหรับรายงานของ ศิริอร แก้วโบราณ (2544) ที่ทำการปลูกผักกาดหอมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทราย พบว่าผักกาดหอมต้องการไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมคิดเป็นร้อยละ 1.5 0.2 และ 1.0 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก (ชุดควบคุม)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองของถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก										
	น้ำหนักเปียก (ก.)		น้ำหนักแห้ง (ก.)		%ไนโตรเจน*	ก.-ไนโตรเจน/ถัง			%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ	
องค์ประกอบไนโตรเจน	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด		เริ่มต้น	สิ้นสุด	สุทธิสิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
ปุ๋ยอินทรีย์	15.24	-	14.19	-	1.66	0.24	-	-	2.27	-
ผักกวางตุ้ง	20.49	211.20	13.65	164.09	3.73/6.77**	0.51	11.11	10.60	4.81	100
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	9.85	-	-	92.92	-
ผลรวมไนโตรเจน						**10.60**	-	**10.60**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** ผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน/อายุ 45 วัน

ตารางที่ 4.9 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองของถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา										
	น้ำหนักเปียก (ก.)		น้ำหนักแห้ง (ก.)		%ไนโตรเจน*	ก.-ไนโตรเจน/ถัง			%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ	
องค์ประกอบไนโตรเจน	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
ปุ๋ยอินทรีย์	10.43	-	9.71	-	1.66	0.16	-	-	3.10	-
ผักกวางตุ้ง	11.69	122.40	5.60	88.78	2.35/5.96**	0.13	5.29	5.16	2.52	100
เม็ดดินเผา	-	-	20,000	20,000	<0.01	-	-	-	-	-
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	4.87	-	-	94.38	-
ผลรวมไนโตรเจน						**5.16**	**-**	**5.16**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** ผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน/อายุ 45 วัน

ตารางที่ 4.10 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก (ชุดควบคุม)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองของถังปลูกผักกวางตุ้งบนดินเพาะปลูก									
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**		**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
ปุ๋ยอินทรีย์	15.24	-	14.19	-	178.51	0.003	-	7.50	-
ผักกวางตุ้ง	20.49	211.20	13.65	164.09	129.22/247.13**	0.002	0.04	5.00	100
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	0.035	-	87.50	-
ผลรวมไนโตรเจน						**0.04**	**0.04**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** ผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน/อายุ 45 วัน

ตารางที่ 4.11 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา (ชุดทดลอง)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองของถังปลูกผักกวางตุ้งบนเม็ดดินเผา									
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**		**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
ปุ๋ยอินทรีย์	10.43	-	9.71	-	178.51	0.002	-	0.18	-
ผักกวางตุ้ง	11.69	122.40	5.60	88.776	129.22/246.73**	0.001	0.02	0.09	1.78
เม็ดดินเผา	-	-	20,000	20,000	55.99/50.90***	1.12	1.02	99.73	90.83
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	0.083	-	7.39
ผลรวมฟอสฟอรัส						**1.123**	**1.123**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

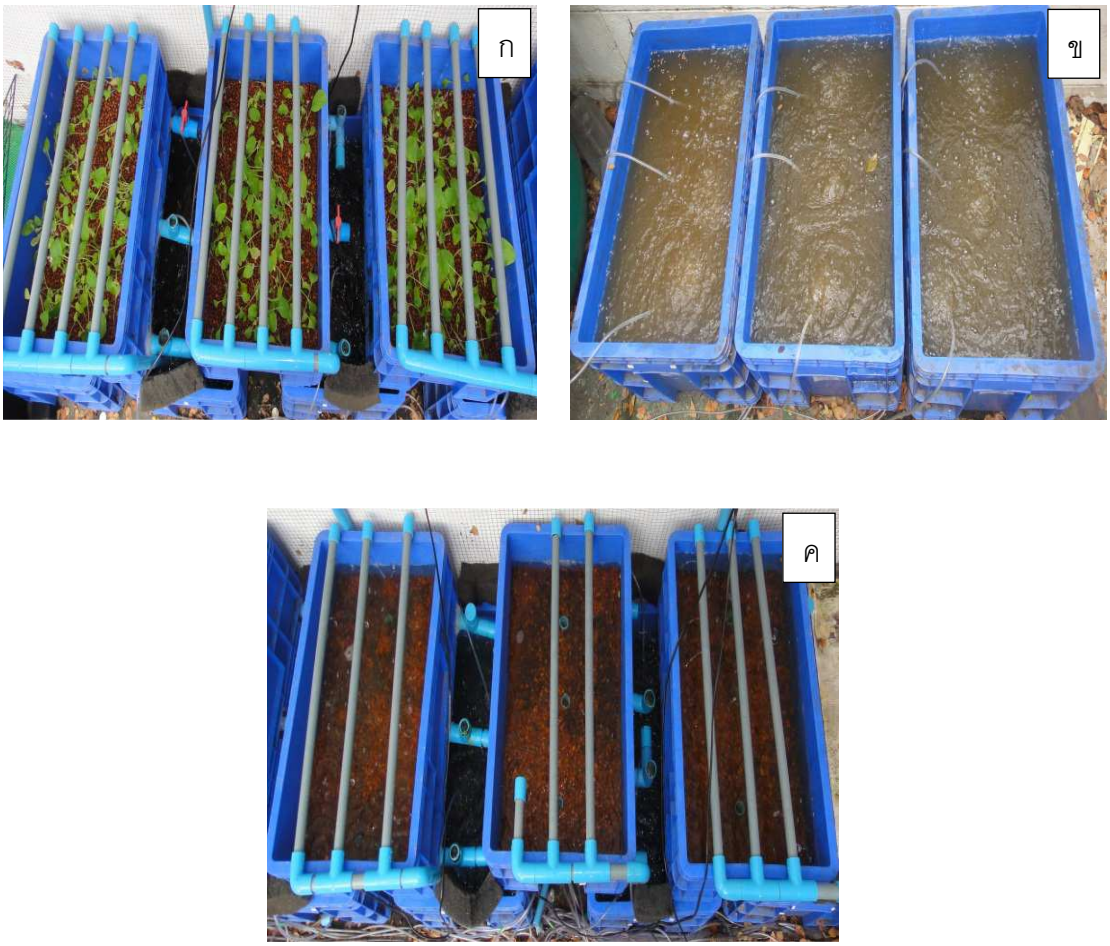
** ผักกวางตุ้งอายุ 7 วัน/อายุ 45 วัน

*** เริ่มต้น/สิ้นสุด

4.3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสภายในถังเลี้ยงปลานิลด้วยการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุตัวกลางแบบอะควาโปนิกส์ ซึ่งแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ (1) ชุดทดลองที่เลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุตัวกลาง (2) ชุดควบคุม-1 ที่เลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียว และ (3) ชุดควบคุม-2 ที่เลี้ยงปลานิลและใช้วัสดุตัวกลางแต่ไม่มีการปลูกผักกวางตุ้ง โดยนำข้อมูลจากการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยและบทบาทของตะกอนในการควบคุมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (การทดลองช่วงที่ 1) ซึ่งเริ่มต้นการทดลองด้วยการปล่อยปลานิลลงเลี้ยงในทุกชุดการทดลอง โดยใช้ลูกพันธุ์ปลานิลที่มีขนาดน้ำหนักเฉลี่ย 14.27±1.42 ก.-นน. เปียก และความยาวเฉลี่ย 9.44±0.27 ซม. ในอัตราการปล่อยที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. จำนวน 9 ถัง (3 ชุดการทดลอง x 3 ซ้ำ) ภายใต้สภาวะเหมือนจริงในโรงเรือนที่ได้รับแสงธรรมชาติ สำหรับถังเลี้ยงปลานิลที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.31 ม. บรรจุน้ำจืดปริมาตร 45 ล. ที่มีการเติมอากาศด้วยหัวทรายตลอดเวลา ให้อาหารปลาโดยใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปในอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน และปรับปริมาณอาหารให้มากขึ้นเมื่อปลามีการเติบโตทุกสัปดาห์ ส่วนข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเติบโตของผักกวางตุ้งและสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของการปลูกผักกวางตุ้ง (การทดลองช่วงที่ 2) โดยทำการปลูกผักกวางตุ้งในชุดทดลองด้วยการคัดเลือกต้นกล้าผักกวางตุ้งที่สมบูรณ์แข็งแรงอายุ 7 วัน ลงปลูกในถังปลูกพืชแต่ละถังจำนวนถังละ 60 ต้น โดยแต่ละต้นคัดให้มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกัน คือ น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 0.15±0.02 ก.-นน. เปียก/ต้น และความสูงเฉลี่ย 3.95±0.27 ซม./ต้น สำหรับถังปลูกพืชที่ใช้ในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 เป็นถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.38 x 0.58 x 0.24 ม. ที่บรรจุเม็ดดินเผาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 - 16 มม. จนเต็มห่างจากขอบด้านบน 0.14 ม. และเจาะท่อระบายน้ำด้านข้างของถังจำนวน 3 จุด โดยสวมท่อข้อต่อและต่อท่อสูง 0.1 ม. เพื่อให้มีน้ำขังภายในถัง หลังจากนั้นทำการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิลให้ไหลเหนือชั้นวัสดุตัวกลาง โดยน้ำส่วนเกินจะไหลล้นผ่านท่อข้อต่อที่ติดตั้งไว้ ซึ่งกำหนดอัตราภาระทางชลศาสตร์ด้วยอัตราการไหล 3.0 ล./นาที และกำหนดวงจรการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยด้วยเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ (Timer) ที่มีระยะเวลาการจ่าย 10 นาที และหยุดพัก 60 นาที หรือคิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำ 618 ล./วัน (14 เท่าของปริมาตรน้ำในระบบต่อวัน) ในระหว่างการทดลองทำการตรวจวัดและประเมินอัตราการเติบโตของปลานิลทุกชุดการทดลอง รวมทั้งอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งทุก 7 วัน ตลอดระยะเวลาต่อเนื่อง 35 วัน โดยการชั่งน้ำหนักปลานิลทุกตัวด้วยเครื่อง

ชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง และวัดขนาดความยาวของปลานิลด้วยอุปกรณ์วัดความยาว ส่วนการตรวจวัดการเติบโตของผักกวางตุ้ง ได้แก่ น้ำหนักเริ่มต้นและสิ้นสุด ความสูง ขนาดความกว้างของใบ ทรงพุ่ม เป็นต้น ร่วมกับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลอง และจัดทำสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด สำหรับรูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลองของชุดการทดลอง 3 รูปแบบ



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายภายในแต่ละถัง (3 ซ้ำ) ของชุดการทดลอง 3 รูปแบบ ดังนี้

(ก) ชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)

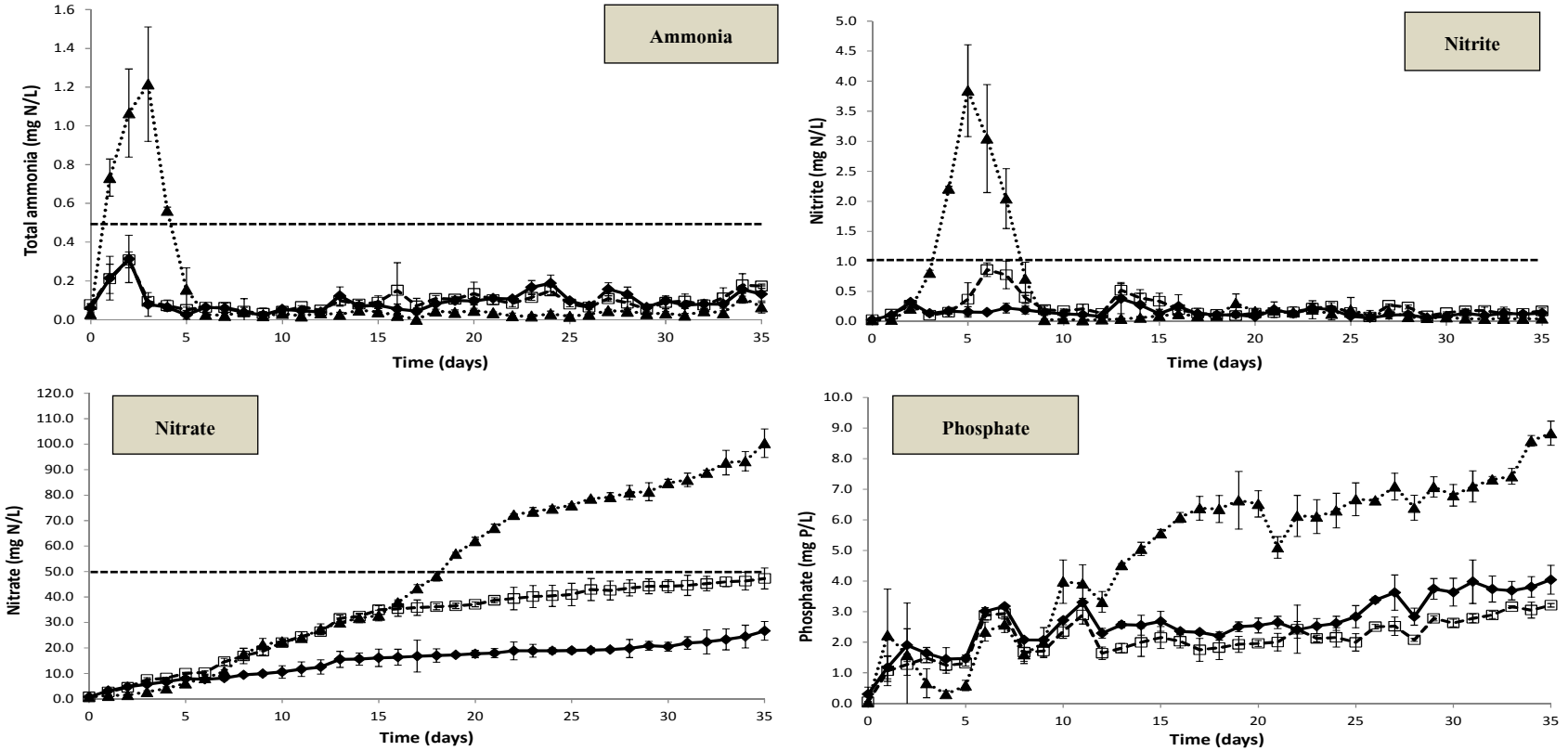
(ข) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)

(ค) ชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิล

- *แอมโมเนีย*

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลแต่ละชุดการทดลอง (ชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2) ตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าถังเลี้ยงปลานิลในช่วงแรกเกิดการสะสมของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน โดยชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียได้ดีกว่าชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งสามชุดการทดลองมีการสะสมในน้ำช่วง 5 วันแรกนับตั่งแต่เริ่มต้นการทดลอง หลังจากนั้นระบบสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.2 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตลอดการทดลอง โดยชุดทดลองและชุดควบคุม-2 มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงสุดเกิดขึ้นในวันที่ 2 ของการทดลองเท่ากับ 0.31±0.12 และ 0.31±0.04 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ย 0.10±0.02 และ 0.10±0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุม-1 พบว่าปริมาณแอมโมเนียสูงสุดเกิดขึ้นในวันที่ 3 ของการทดลอง เท่ากับ 1.22±0.30 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีแอมโมเนียเฉลี่ย 0.13±0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับในช่วงท้ายของการทดลองพบว่าปลานิลในถังชุดควบคุม-1 ไม่บริโภคอาหาร เนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วงเริ่มต้นและความเข้มของไนเทรตในช่วงท้ายการทดลองมีความเข้มข้นสูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยในการเลี้ยงสัตว์น้ำ (0.5 และ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ) จึงอาจเป็นสาเหตุให้ปลานิลมีสุขภาพที่อ่อนแอและไม่บริโภคอาหารในบางช่วงเวลา นอกจากนี้ยังเกิดจากปัจจัยสภาวะแวดล้อมด้วยเดียวเช่นกัน ดังนั้นจึงหยุดการให้อาหารจึงส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในถังชุดควบคุม-1 มีปริมาณน้อย ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณแอมโมเนียในถังชุดควบคุม-1 มีความเข้มข้นน้อยกว่าถังชุดทดลองและถังควบคุม-2 ที่มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการรายงานของ ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล (2547) กล่าวว่าระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงปลาควรมีความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. และถ้ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงเกิน 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลให้ปลาอ่อนแอและตายได้ง่าย (Liao และ Mayo, 1972) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชุดทดลองและชุดควบคุม-2 สามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าชุดควบคุม-1



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และฟอสเฟตของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 35 วัน ของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก; ◆) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว; ▲) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง; □) โดยเส้นขวางแนวนอนแสดงค่าระดับความเข้มข้นที่ใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

โดยมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างการทำงานของแบคทีเรียในถังเลี้ยงปลาและกระบวนการดูดซึมจากตะกอนแขวนลอย เม็ดดินเผา และผักกวางตุ้งเพื่อใช้เป็นสารอาหารในการเจริญเติบโต

- *ไนไทรต์*

สำหรับการตรวจวัดความเข้มข้นของไนไทรต์ในตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลในชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งคาดว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนไทรต์ภายในทุกชุดการทดลองนี้เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพของแบคทีเรียกลุ่ม Ammonia Oxidizing Bacteria (AOB) ที่ทำการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไทรต์ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนอย่างพอเพียงด้วยการเติมอากาศ ชุดทดลองพบว่ามีความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.38±0.25 มก.-ไนโตรเจน/ล. คิดเป็นปริมาณไนไทรต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.15±0.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. และหลังจากนั้นความเข้มข้นของไนไทรต์จะลดลงต่ำกว่า 0.2 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนสิ้นสุดการทดลอง ส่วนชุดควบคุม-2 พบว่าการสะสมไนไทรต์เริ่มเกิดขึ้นในวันที่ 3 - 18 ของการทดลอง โดยไนไทรต์มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.23±0.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. และสูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลองเท่ากับ 0.86±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. และหลังจากนั้นความเข้มข้นของไนไทรต์จะลดต่ำกว่า 0.2 มก.-ไนโตรเจน/ล. แตกต่างจากชุดควบคุม-1 ที่พบว่าความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดเท่ากับ 3.84±0.76 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 5 ของการทดลอง และมีความเข้มข้นไนไทรต์เฉลี่ย 0.43±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งหลังจากนั้นความเข้มข้นของไนไทรต์จะลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 0.2 มก.-ไนโตรเจน/ล. นั่นคือ ชุดทดลองและชุดควบคุม-2 สามารถควบคุมความเข้มข้นของไนไทรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าชุดควบคุม-1 โดยอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลอง ซึ่งจากรายงานของมั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2539) กล่าวว่าปริมาณไนไทรต์ในระบบไม่ควรมีค่าที่สูงเกิน 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. มิฉะนั้นจะเป็นอันตรายต่อปลา

- *ไนเทรต*

ผลการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเทรตในตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลทั้ง 3 รูปแบบการทดลอง คือชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ดังแสดงรูปที่ 4.17 เช่นกัน โดยคาดว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเทรตในทุกระบบการทดลอง

เกิดขึ้นจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Nitrite Oxidizing Bacteria (NOB) ที่เปลี่ยนไนไทรต์ไปกลายเป็นไนเทรต จึงทำให้ในระบบของทุกชุดการทดลองมีความเข้มข้นของไนเทรตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดการทดลอง ซึ่งมีปริมาณไนเทรตเฉลี่ยเท่ากับ 15.07±2.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเท่ากับ 26.66±3.69 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดการทดลองสำหรับชุดทดลอง ส่วนชุดควบคุม-2 พบว่ามีความเข้มข้นของไนเทรตเฉลี่ย 30.36±2.14 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 47.24±4.10 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ในชุดควบคุม-1 พบว่าความเข้มข้นของไนเทรตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 47.77±1.62 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนมีความเข้มข้นสูงถึง 100.37±5.59 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยพบว่าเป็นความเข้มข้นของไนเทรตที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับรายงานของ Whiston และคณะ (1994) ที่กล่าวว่าความเข้มข้นของไนเทรตที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรสูงเกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้รายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ยังเพิ่มเติมว่าในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำระบบปิดไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเทรตสูงกว่า 100 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งอาจส่งผลให้สัตว์น้ำเสียชีวิตได้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณความเข้มข้นไนเทรตสะสมน้อยกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างน้ำในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองของงานวิจัยนี้มีความปลอดภัยและไม่ส่งผลกระทบต่อการเลี้ยงปลานิล แต่สำหรับชุดควบคุม-1 ที่ความเข้มข้นไนเทรตสูงเกิน 100 มก.-ไนโตรเจน/ล. จึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพปลา และทำให้ปลานิลที่เลี้ยงไม่บริโภคอาหาร แต่สาเหตุที่ปลานิลในระบบยังคงมีชีวิตอยู่ได้อาจเนื่องมาจากปลาที่ใช้ในการทดลองเหล่านี้ได้ผ่านการปรับสภาพการดำรงชีวิตเบื้องต้นมาแล้ว จึงมีความทนทานต่อความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้สูง

สำหรับการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 น่าจะเกิดขึ้นได้จากหลายกระบวนการร่วมกัน ได้แก่ กระบวนการไนทริฟิเคชันภายในถังเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับกระบวนการดูดซึมของผักกวางตุ้ง และกระบวนการไนทริฟิเคชันที่เม็ดดินเผาซึ่งมีแบคทีเรียกลุ่ม AOB และ NOB รวมทั้งตะกอนอินทรีย์ที่ยึดติดอยู่บริเวณผิวของเม็ดดินเผา นอกจากนี้ยังเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในถังปลูกพืชที่บรรจุชั้นเม็ดดินเผา และการสะสมของตะกอนแขวนลอยตามริมขอบมุมถังเลี้ยงปลานิลที่เป็นบริเวณจุดอับอากาศ แม้จะมีการเติมอากาศแต่การฟุ้งกระจายไม่ทั่วทั้งถังเลี้ยงปลานิล รวมทั้งไนโตรเจนบางส่วนอาจถูกใช้ในการเติบโตจากจุลสาหร่ายในถังเลี้ยงปลานิล โดยจากผลการตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เม็ดดินเผามีบทบาทที่สำคัญในการช่วยบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนดังกล่าวนอกเหนือจากกระบวนการทางชีวภาพของแบคทีเรียในถังเลี้ยงปลานิล จึงส่งผลต่อการช่วยให้กระบวนการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยของการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป แตกต่างจากถังเลี้ยงปลานิลชุด

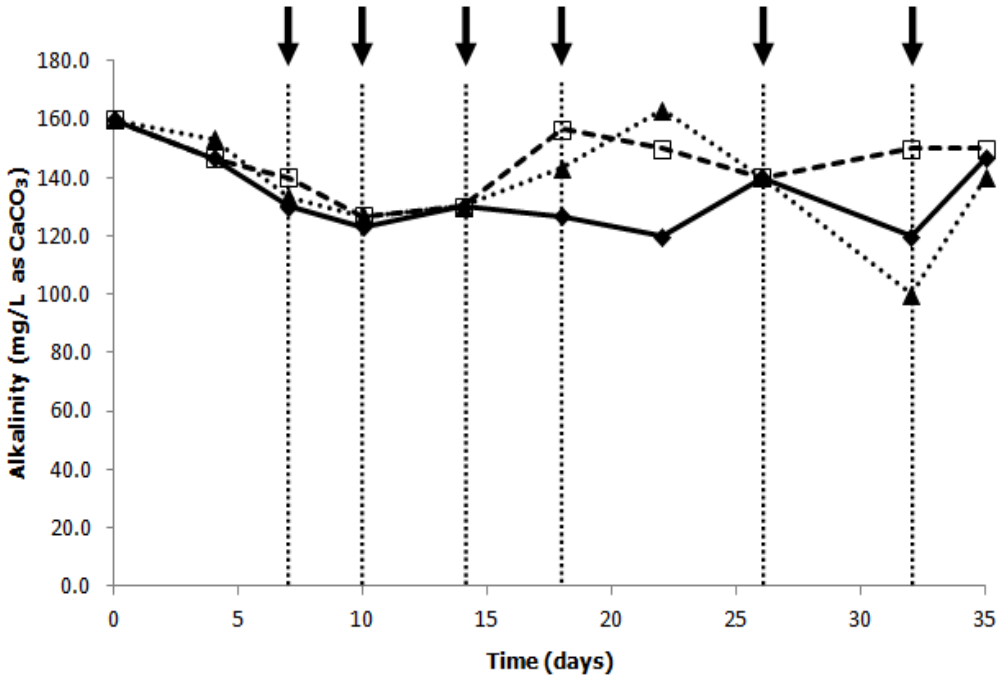
ควบคุม-1 ที่การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับการดูดซึมของตะกอนแขวนลอยภายในถังเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนใช้เวลานาน และมีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยของการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป นอกจากนี้ยังอาจเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในถังเลี้ยงปลานิลเช่นเดียวกับชุดทดลอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบที่มีตัวกลางสามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและยืดระยะเวลาการสะสมของไนเทรตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลโดยตรงต่อปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อมีการผสมผสานพืชที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นร่วมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดจะช่วยให้การควบคุมสารประกอบอนินทรีย์เกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นภายใต้ระบบหมุนเวียนน้ำเดียวกัน

- *ฟอสเฟต*

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าทั้งสามชุดการทดลองมีปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยในชุดควบคุม-1 มีความเข้มข้นสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าชุดทดลองและชุดควบคุม-2 อาจเนื่องมาจากผักกวางตุ้งในชุดทดลองสามารถใช้ฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารในการเติบโต อีกทั้งการมีเม็ดดินเผาเป็นตัวกลางในถังปลูกพืชยังช่วยในการดูดซับฟอสเฟตได้ นอกจากนี้บางส่วนจุลสาหร่ายในถังเลี้ยงปลานิลอาจใช้ในการเติบโต จึงทำให้ความเข้มข้นของฟอสเฟตในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 มีความเข้มข้นน้อยกว่าในชุดควบคุม-1 ที่ไม่มีทั้งตัวกลางและการปลูกผักกวางตุ้ง แต่ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นในชุดควบคุม-1 จุลสาหร่ายในถังเลี้ยงปลานิลอาจใช้ในการเติบโตได้ โดยชุดทดลองมีปริมาณฟอสเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 2.66±0.25 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 4.04±0.47 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. ส่วนชุดควบคุม-2 พบว่ามีความเข้มข้นของฟอสเฟตเฉลี่ย 2.12±0.23 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นเท่ากับ 3.21±0.06 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. และสำหรับชุดควบคุม-1 พบว่าความเข้มข้นของฟอสเฟตเฉลี่ย 4.88±0.43 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. มีค่าเพิ่มขึ้นสูงถึง 8.84±0.40 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง นั่นคือ ผลการทดลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนถึงบทบาทและความสำคัญของผักกวางตุ้งและเม็ดดินเผาในการช่วยควบคุมความเข้มข้นของฟอสเฟตในระบบเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์

- *ค่าสภาพด่างของน้ำ*

ก่อนการเริ่มระบบทดลองได้มีการตรวจวิเคราะห์และปรับค่าสภาพด่างของน้ำด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงปลานิลจนมีความเข้มข้นประมาณ 140 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยเมื่อเดินระบบการทดลองพบว่าน้ำในถังเลี้ยงปลานิลทุกถังมีค่าสภาพด่างลดลงเรื่อยๆ ตลอดการทดลอง จึงต้องทำการปรับสภาพด่างทุกๆ 3 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง เพื่อให้คงสภาพอยู่ในช่วง 120 - 160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงสภาพด่างของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลแต่ละถังในช่วงการทดลอง 35 วัน โดยพบว่าในบางช่วงมีค่าต่ำลงจนน้อยกว่า 120 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. แต่เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตจะช่วยดึงให้ค่าสภาพด่างเพิ่มขึ้นจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ ซึ่งการลดลงของสภาพด่างในน้ำเลี้ยงปลานิลทั้ง 3 ชุดการทดลอง แสดงถึงการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ เนื่องจากสภาพด่างที่ลดลงส่วนหนึ่งเกิดจากไนทริไฟอิงแบคทีเรียนำคาร์บอนจากโซเดียมไบคาร์บอเนตมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเติบโต



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงสภาพด่างในมวลน้ำของถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 35 วัน ของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (◆) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (▲) ชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (☐) และวันที่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงปลานิล (↓)

- *คุณภาพน้ำอื่นๆ*

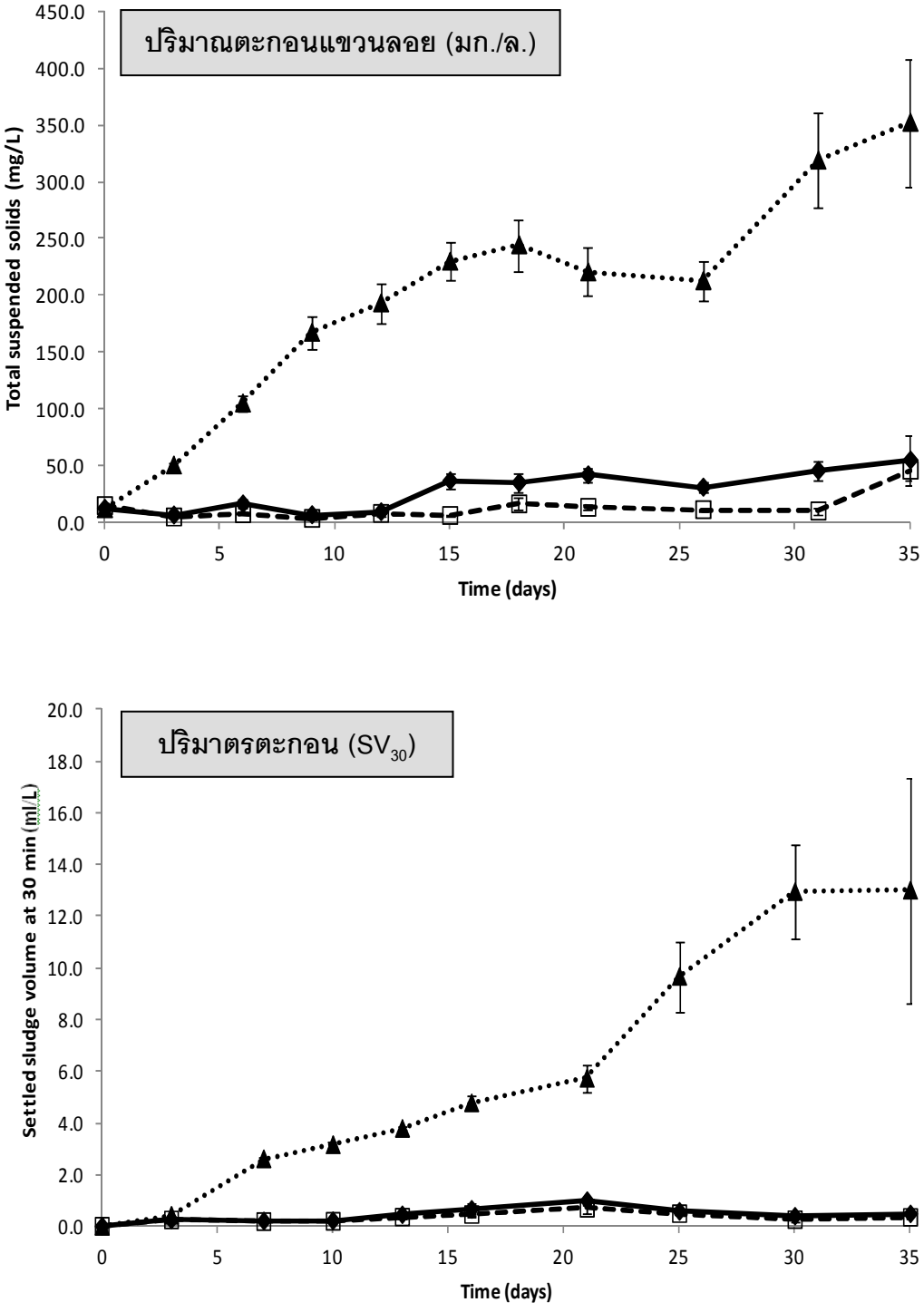
สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางด้านกายภาพอื่นๆ ตลอดการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 35 วัน ของถังชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และถังชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 7.07 – 9.07 มก./ล. ซึ่งเป็นระดับที่สามารถพบได้โดยทั่วไปและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับค่าพีเอชในถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดมีค่าประมาณ 8.23 – 8.55 ส่วนผลการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าประมาณ 27 - 30 °ซ. ในทุกชุดการทดลอง นอกจากนี้การตรวจวัดสภาพด่างในน้ำถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 120 – 160 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.

ตารางที่ 4.12 ผลสรุปคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และถังชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

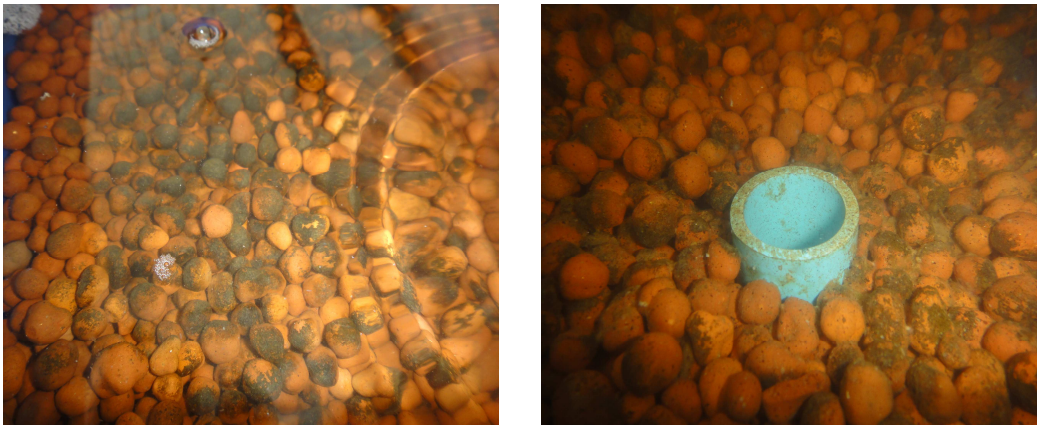
คุณภาพน้ำ	**ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)**		
	ชุดทดลอง	**ชุดควบคุม-1**	**ชุดควบคุม-2**
แอมโมเนียทั้งหมด (mg-N/L)	0.09±0.02 (0.02-0.31)	0.13±0.03 (0.00-1.22)	0.10±0.03 (0.03-0.31)
ไนไทรต์ (mg-N/L)	0.15±0.06 (0.03-0.38)	0.43±0.11 (0.02-3.84)	0.23±0.06 (0.03-0.86)
ไนเทรต (mg-N/L)	15.07±2.06 (0.77-26.66)	47.77±1.62 (0.73-100.37)	30.37±2.14 (0.79-47.24)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	2.66±0.25 (0.30-4.04)	4.88±0.43 (0.03-8.84)	2.12±0.23 (0.05-3.21)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	7.66±0.09 (7.23-8.73)	7.37±0.09 (7.07-8.07)	7.76±0.08 (7.20-9.07)
พีเอช (pH)	8.37±0.03 (8.24-8.54)	8.37±0.04 (8.24-8.55)	8.41±0.04 (8.23-8.53)
ค่าสภาพด่าง (mg-CO_3^{2-}/L)	134.33±6.62 (120.00-160.00)	139.00±6.20 (100.00-163.33)	145.00±13.63 (126.67-160.00)
อุณหภูมิน้ำ (°C)	27.86±0.19 (26.60-28.67)	28.35±0.13 (27.00-30.07)	27.56±0.14 (26.50-28.50)

4.3.2 ปริมาณอนุภาคสารแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล

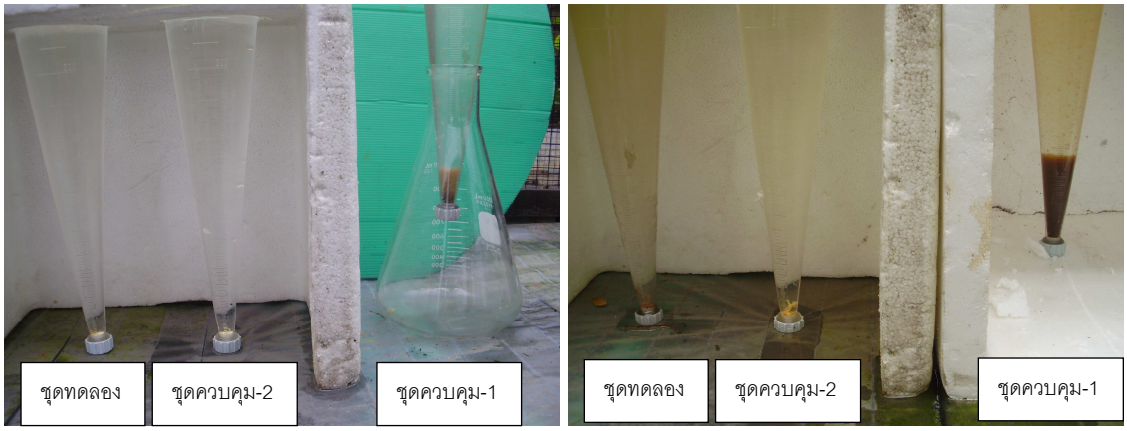
การตรวจวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) มีปริมาณเท่ากับ 55.00±22.55 และ 46.11±8.55 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) มีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูงกว่า คือเท่ากับ 352.22±56.01 มก./ล. โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองได้ทำการแยกตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะและค้างอยู่บนผิวของเม็ดดินเผาที่ใช้เป็นตัวกลางในการปลูกผักกวางตุ้ง (รูปที่ 4.20) เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอย พบว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในชุดทดลองที่แยกได้เท่ากับ 53.24 ก.-นน. แห้ง/ถัง และในชุดควบคุม-2 เท่ากับ 48.33 ก.-นน. แห้ง/ถัง โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยที่แยกได้นี้เป็นส่วนผสมระหว่างตะกอนที่เกิดขึ้นจากเม็ดดินเผาและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิล จากรายงานของ Azim และคณะ (2008) กล่าวว่าของแข็งแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 500 มก./ล. เนื่องจากตะกอนที่มากเกินไปจะดูดจับออกซิเจนและบดบังการมองเห็นในการหาอาหารของสัตว์น้ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์ (2554) ที่กล่าวว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในช่วง 300 – 500 มก./ล. สามารถช่วยบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาตรตะกอนที่เวลา 30 นาที (SV_{30}) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 มีปริมาณเท่ากับ 0.48±0.11 13.00±4.36 และ 0.34±0.04 มล./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณตะกอนแขวนลอยที่มีในแต่ละถังเลี้ยงปลานิลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอย (บน) และปริมาตรตะกอน (ล่าง) ในถังเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 35 วัน ของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (◆) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (▲) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (□)



รูปที่ 4.20 ลักษณะตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาตลอดการทดลอง 35 วัน



(วันที่ 7 ของการทดลอง) (วันที่ 35 ของการทดลอง)

รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายเปรียบเทียบการตรวจวัดปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ในวันที่ 7 (ซ้าย) และวันที่ 35 (ขวา) ของการทดลอง

ในระหว่างการทดลองสามารถสังเกตเห็นสีเขียวของแพลงก์ตอนพืชอยู่รวมกับตะกอนแขวนลอยอย่างชัดเจนในแต่ละถังของชุดควบคุม-1 หลังจากเริ่มการทดลองได้ 20 วัน ซึ่งเมื่อทำการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เอในน้ำเลี้ยงปลานิลทุกถังการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 8.29±0.71 มก./ลบ.ม. ถังชุดควบคุม-2 เท่ากับ 10.11±0.89 มก./ลบ.ม. และถังชุดควบคุม-1 เท่ากับ 30.40±4.24 มก./ลบ.ม. ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปหากมีสารประกอบไนโตรเจนในปริมาณที่สูงจะกระตุ้นและส่งผลให้เกิดการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็ว โดยจะมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอใน

น้ำสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551) สำหรับการตรวจวัดค่าซีโอดีของน้ำเลี้ยงปลานิลจากทุกชุดการทดลองด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux method) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าซีโอดีของชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 มีความเข้มข้นเท่ากับ 36.37±2.03 54.36±7.99 และ 35.89±6.21 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่กำหนดค่าการปล่อยซีโอดีไม่เกิน 120 มก./ล. (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547)

ตารางที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลจากชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่ของการทดลอง	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มก./ลบ.ม.)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม-1	ชุดควบคุม-2
วันเริ่มต้น (0)	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
วันที่ 14	2.78±0.29	14.75±1.01	3.84±1.02
วันสุดท้าย (35)	8.29±0.71	30.40±4.24	10.11±0.89

ตารางที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีของน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่ของการทดลอง	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มก./ล.)		
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม-1	ชุดควบคุม-2
วันเริ่มต้น (0)	6.26±179	8.60±0.68	7.04±1.17
วันที่ 14	19.16±2.95	29.72±0.68	21.12±2.35
วันสุดท้าย (35)	36.37±2.03	54.36±7.99	35.89±6.21

4.3.3 การเลี้ยงและอัตราการเติบโตของปลานิล

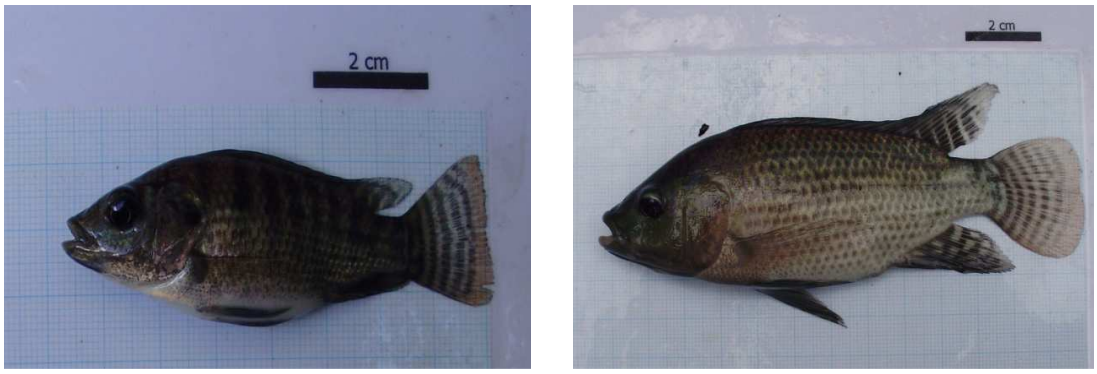
จากการทดลองเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากระบบการเลี้ยง และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการเลี้ยงปลานิลในชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.15 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ความหนาแน่นปลานิลมี

ตารางที่ 4.15 ผลการเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 35 วัน ของถังเลี้ยงชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

พารามิเตอร์	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม-1	ชุดควบคุม-2
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	35	35	35
จำนวนปลานิลเริ่มต้น (ตัว)	8	5	6
จำนวนปลานิลวันสุดท้าย (ตัว)	8	5	6
ขนาดน้ำหนักเริ่มต้น (ก.-นน. เปียก)	11.31±1.49	16.31±1.49	15.18±1.28
ขนาดน้ำหนักสุดท้าย (ก.-นน. เปียก)	27.20±6.56	29.43±7.06	28.65±3.12
ขนาดความยาวเริ่มต้น (ซม.)	8.89±0.32	9.96±0.23	9.46±0.27
ขนาดความยาวสุดท้าย (ซม.)	11.37±1.02	11.79±0.73	11.92±0.62
น้ำหนักอาหารทั้งหมด (ก.-นน. เปียก)	200.50	135.33	176.12
น้ำหนักปลานิลที่ปล่อย (กก./ลบ.ม.,กก./ตร.ม.)	2.14/0.39	2.04/0.37	2.01/0.36
น้ำหนักปลานิลวันสุดท้าย (กก./ลบ.ม.,กก./ตร.ม.)	5.11/0.93	3.68/0.67	3.81/0.69
อัตราการเติบโต (ก.-นน. เปียก/วัน)	0.45±0.15	0.37±0.16	0.38±0.05
ผลผลิต (กก.-นน. เปียก/ไร่)	862.92	475.98	521.47
อัตราการแลกเนื้อ	1.69	2.06	1.96
อัตราการรอดตายวันที่ 35 (ร้อยละ)	100	100	100

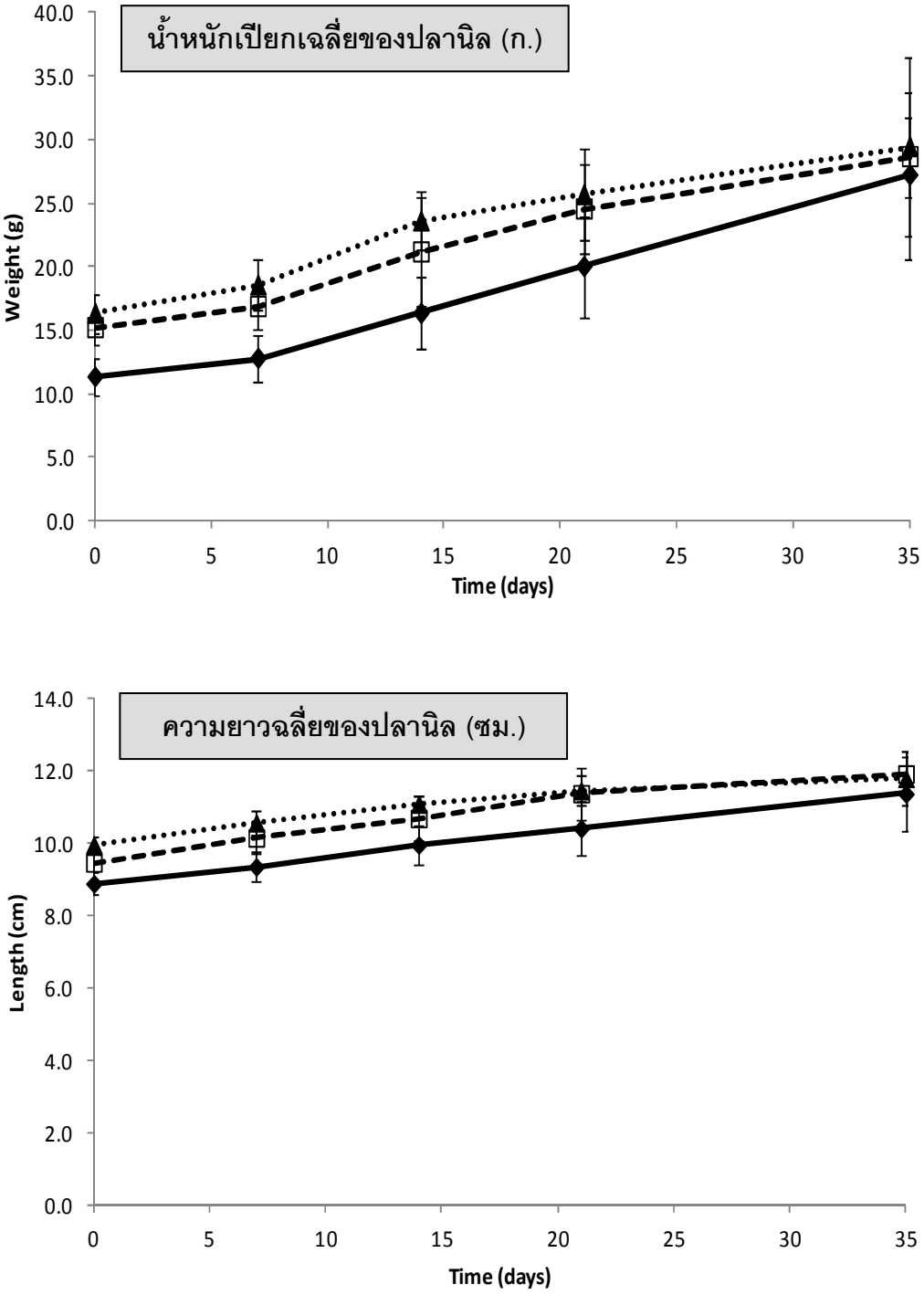
ค่าเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นเริ่มต้นในวันแรกที่ทำการปล่อยปลานิลลงถังเฉลี่ย 2.0 กก./ลบ.ม. เป็น 5.11 กก./ลบ.ม. ในชุดทดลอง และมีความหนาแน่นสุดท้ายเท่ากับ 3.68 และ 3.81 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ในชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 โดยตลอดการทดลองพบว่าปลานิลที่เลี้ยงในทุกชุดการทดลองมีการเติบโตขึ้น ดังรูปที่ 4.22 นั่นคือ น้ำหนักเฉลี่ยปลานิลในชุดทดลองเพิ่มขึ้นจาก 11.31±1.49 เป็น 27.20±6.56 ก.-นน. เปียก/ตัว ชุดควบคุม-1 เพิ่มขึ้นจาก 16.31±1.49 เป็น 29.43±7.06 ก.-นน. เปียก/ตัว และชุดควบคุม-2 เพิ่มขึ้นจาก 15.18±1.28 เป็น 28.65±3.12 ก.-นน. เปียก/ตัว ดังนั้นทุกสัปดาห์หลังการตรวจวัดการเติบโตจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอาหารที่ให้ในแต่ละวันด้วยอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลา แต่สำหรับชุดควบคุม-1 หลังจากวันที่ 20 ของการทดลอง พบว่าปลาไม่บริโภคอาหาร จึงงดการให้อาหารจนสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวมีความเข้มข้นของไนเทรตสูงเกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. จึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพปลา และทำให้ปลานิลที่เลี้ยงไม่บริโภคอาหาร แต่สาเหตุที่ปลานิลในระบบยังคงมีชีวิตอยู่ได้อาจเนื่องมาจากปลานิลได้ผ่านการปรับสภาพการดำรงชีวิตเบื้องต้นมาแล้ว จึงมีความทนทานต่อความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้สูง ส่วนรูปที่ 4.23 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักและ

ความยาวเฉลี่ยของปลานิลจากทุกชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 35 วัน โดยเมื่อคำนวณค่าอัตราการเติบโตของปลานิลในชุดทดลอง ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.45±0.15 0.37±0.16 และ 0.38±0.05 ก.-นน. เปียก/วัน ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งปลานิลในชุดทดลองมีอัตราแลกเนื้อเท่ากับ 1.69 ส่วนชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 มีอัตราแลกเนื้อเท่ากับ 2.06 และ 1.96 ตามลำดับ ส่วนอัตราการรอดของปลานิลในการทดลองทุกชุดเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองคิดเป็นร้อยละ 100 ในขณะที่ปริมาณอาหารที่ให้สะสมเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองทั้งสามเท่ากับ 200.50 135.33 และ 176.12 ก. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24

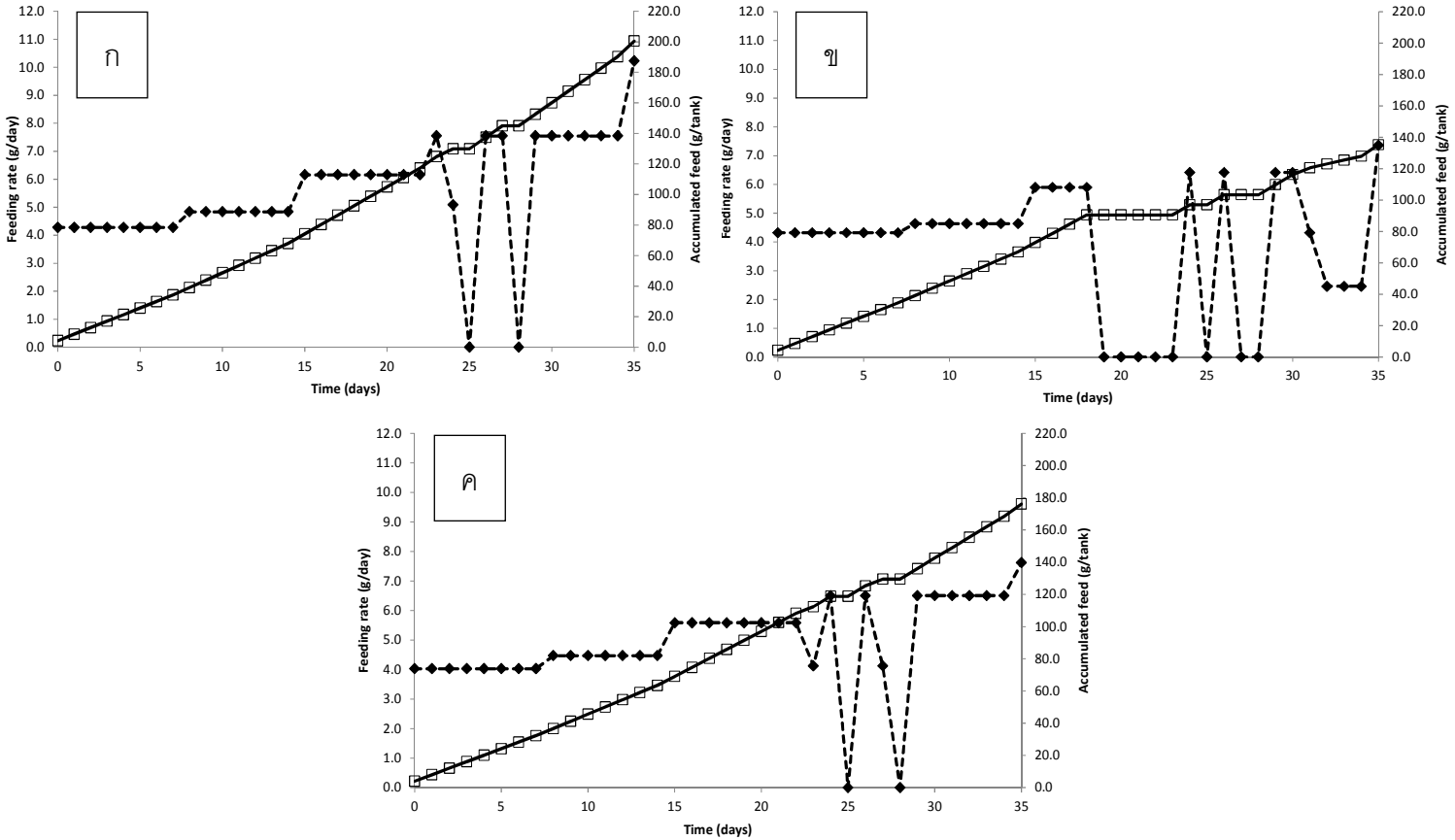


(วันแรกของการทดลอง) (วันสุดท้ายของการทดลอง)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายขนาดที่เปลี่ยนแปลงของปลานิลก่อนการทดลอง (ซ้าย) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ขวา)



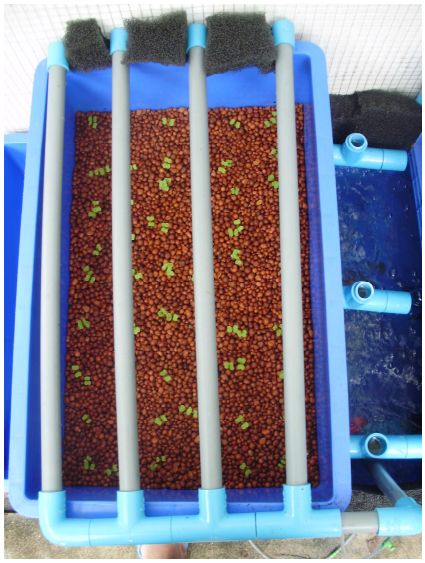
รูปที่ 4.23 น้ำหนักเฉลี่ยของปลานิล (บน) และความยาวเฉลี่ยของปลานิล (ล่าง) ของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (◆) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (▲) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (☐) ในแต่ละสัปดาห์ของการทดลอง



รูปที่ 4.24 ปริมาณอาหารที่ให้ (◆) และปริมาณอาหารที่ให้สะสม (□) ภายในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (ก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (ข) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (ค)

4.3.4 อัตราการเติบโตของผักกวางตุ้ง

จากการทดลองเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกผักกวางตุ้งแบบอะควาโปนิกส์ โดยการอนุบาลต้นกล้าผักกวางตุ้งเป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนการนำลงปลูกในถังปลูกจำนวนถังละ 60 ต้น (3 ซ้ำ) และทำการทดลองเป็นระยะเวลา 35 วัน ด้วยอัตราภาระทางชลศาสตร์ในการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิลเข้าสู่ถังปลูกผักกวางตุ้งที่อัตราการไหล 3.0 ล./นาที. ทำการกักพักน้ำและตะกอนไว้ในถังปลูกพืชของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ในลักษณะเดียวกันกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland system) ตามระดับที่กำหนดไว้ โดยในครั้งแรกได้ทดลองเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยด้วยปั๊มใต้น้ำเป็นเวลา 10 นาที และหยุดการทำงานของปั๊มเป็นระยะเวลา 30 นาที หรือคิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำ 1,080 ล./วัน (24 เท่าของปริมาตรน้ำในระบบต่อวัน) สำหรับในชุดทดลองมีการขังน้ำเลี้ยงปลาในระดับสูงถึงระดับโคนต้นผักกวางตุ้งตลอดเวลา ซึ่งหลังจากทำการทดลองได้เพียง 21 วัน พบว่าในการทดลองเบื้องต้นผักกวางตุ้งไม่เติบโตประกอบกับใบผักกวางตุ้งมีสีเหลืองและเริ่มตาย ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนแนวทางการทดลองโดยยังคงเลือกอัตราภาระทางชลศาสตร์เท่าเดิม แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยด้วยปั๊มใต้น้ำเป็นเวลา 10 นาที และหยุดการทำงานของปั๊มเป็นระยะเวลา 60 นาที หรือคิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำ 618 ล./วัน (14 เท่าของปริมาตรน้ำในระบบต่อวัน) โดยชุดทดลองมีการขังน้ำเลี้ยงปลาในระดับรากผักกวางตุ้งตลอดเวลาด้วยการกำหนดระดับน้ำแบบกาลักน้ำในลักษณะเดียวกับชุดควบคุม-2 ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.16 เมื่อตรวจวัดการเติบโตในแต่ละสัปดาห์ พบว่าผักกวางตุ้งมีน้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 1.00±0.38 ก.-นน. เปียก/ต้น และความสูงเฉลี่ยในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 8.04±1.13 ซม. โดยมีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.02±0.01 ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 4.2.1 จะพบว่าอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งในการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากในการทดลองที่ 4.2.1 มีการเติมปุ๋ยอินทรีย์สำหรับเป็นสารอาหารต่อผักกวางตุ้ง จึงทำให้ในระบบมีทั้งปริมาณธาตุอาหารหลักและอาหารรองที่จำเป็นต่อการเติบโตของผักกวางตุ้งอย่างเพียงพอ แต่การทดลองนี้มีเพียงฟอสเฟตและสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งสารอาหารอาจไม่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ของผักกวางตุ้งอีกทั้งไม่มีสารอาหารรองที่จำเป็นภายในระบบอีกด้วย สำหรับรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 แสดงการเติบโตของผักกวางตุ้งในด้านความสูง ความกว้างของใบ และความกว้างของทรงพุ่มต้น ตลอดการทดลอง สำหรับรายงานของ Yun และคณะ (2006) กล่าวว่าผักกวางตุ้งสามารถใช้สารอาหารจากปุ๋ยยูเรียในรูปของแอมโมเนียและไนเทรต โดยผักกวางตุ้งสามารถดูดซึมสารอาหารคิดเป็นน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 17 – 39.5 มก./กก.-ปุ๋ยยูเรีย นอกจากนี้ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเทรตที่สะสมในส่วนของใบและลำต้นที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคไม่ควรเกิน 0.8 และ 1.9 มก./กก.-นน.แห้ง ตามลำดับ



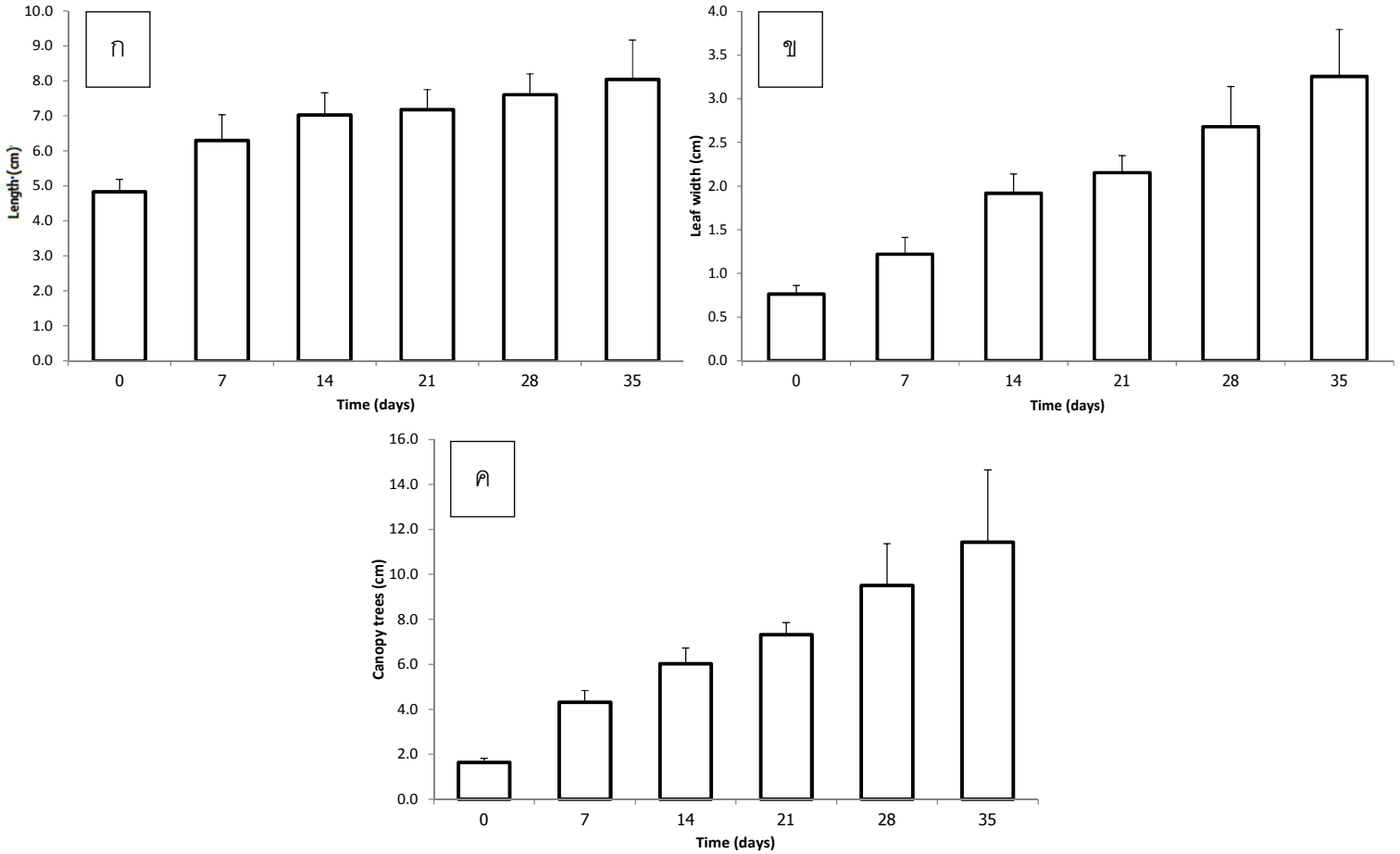
(วันที่ 7 ของการทดลอง)

(วันที่ 21 ของการทดลอง)

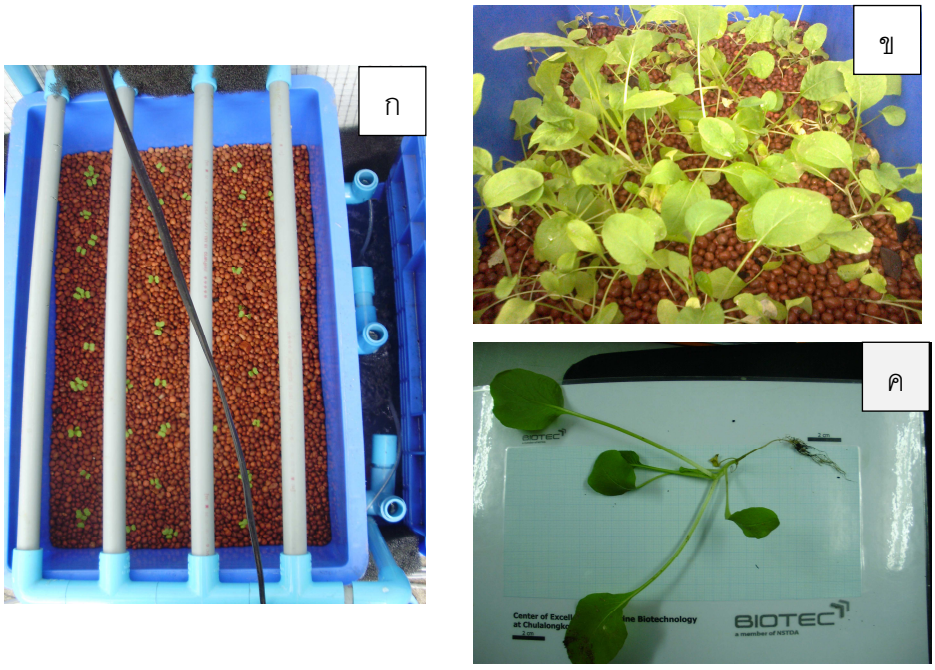
รูปที่ 4.25 ผักกวางตุ้ง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ที่เวลา 7 วัน (ซ้าย) และ 21 วัน (ขวา) ในการทดลองที่มีการขังน้ำไว้ในระดับที่รากผักจมน้ำตลอดเวลาและมีการเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยเป็นเวลา 10 นาที และหยุดพัก 30 นาที (การทดลองเบื้องต้น)

ตารางที่ 4.16 ผลการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ของระบบการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์

พารามิเตอร์	ผลการปลูกผักกวางตุ้ง
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	35
จำนวนเริ่มต้นต่อถัง (ต้น)	60
จำนวนสิ้นสุดต่อถัง (ต้น)	58
ขนาดน้ำหนักเริ่มต้น (ก.-นน. เปียก)	0.15±0.02
ขนาดน้ำหนักสุดท้าย (ก.-นน. เปียก)	1.00±0.38
ขนาดความสูงเริ่มต้น (ซม.)	4.83±0.35
ขนาดความสูงสุดท้าย (ซม.)	8.04±1.13
ขนาดความกว้างใบเริ่มต้น (ซม.)	0.77±0.10
ขนาดความกว้างใบสุดท้าย (ซม.)	3.26±0.54
ขนาดความกว้างทรงพุ่มเริ่มต้น (ซม.)	1.64±0.18
ขนาดความกว้างทรงพุ่มสุดท้าย (ซม.)	11.43±3.22
อัตราการเติบโต (ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน)	0.02±0.01
ผลผลิต (กก.-นน. เปียก/ไร่)	293.08



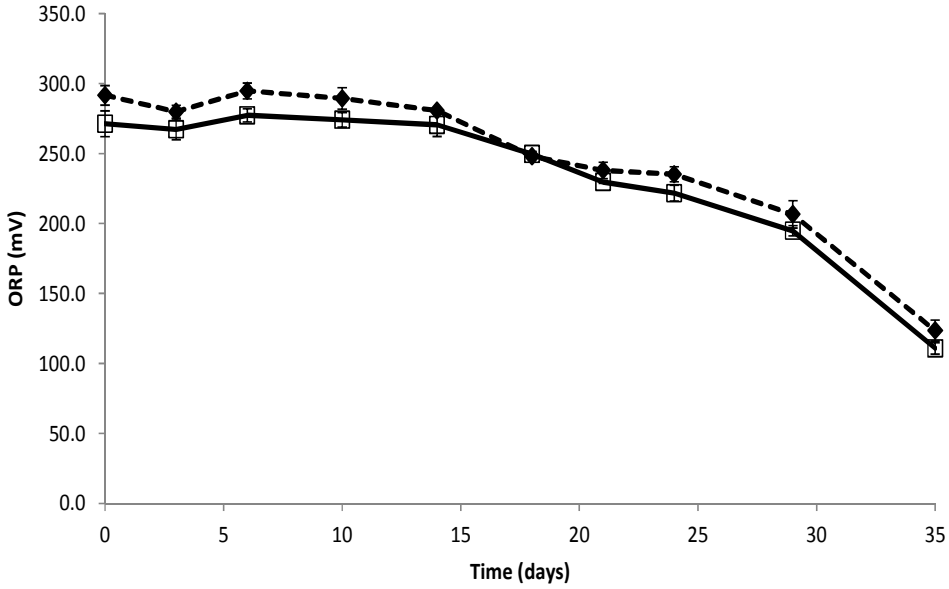
รูปที่ 4.26 การเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดการทดลองระยะเวลา 35 วัน ด้านความสูงเฉลี่ยของต้น (ก) ความกว้างเฉลี่ยของใบ (ข) และความกว้างเฉลี่ยของทรงพุ่ม (ค)



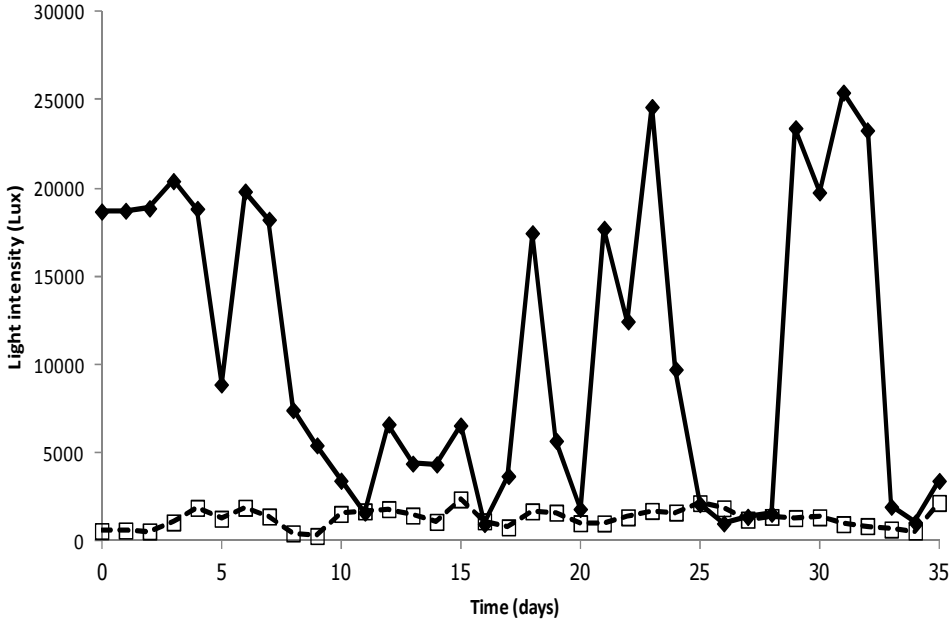
รูปที่ 4.27 แสดงการเติบโตของผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง 35 วัน สำหรับการเริ่มดำเนินการ (ก) สิ้นสุดการทดลอง (ข) และการตรวจวัดความสูง (ค)

สำหรับผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทางกายภาพในระหว่างการดำเนินการทดลอง พบว่าค่าโออาร์พีในชั้นเม็ดดินเผาของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) มีค่าลดลงเรื่อยๆ จาก +290 เป็น +110 มิลลิโวลท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งค่าโออาร์พีที่ลดลงเนื่องจากมีปริมาณตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิลสะสมในปริมาณสูงจึงส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้อยลง และบางส่วนภายในถังปลูกพืชมีสภาวะไร้ออกซิเจน ถึงแม้ว่าค่าโออาร์พีของชั้นเม็ดดินเผาที่ตรวจวัดได้มีค่าเป็นบวก แต่ก็อาจส่งผลให้เกิดสภาพดีไนทริฟิเคชันได้ที่บริเวณชั้นของเม็ดดินเผาและที่ชั้นไบโอฟิล์มของตะกอนที่สะสมตัวกันในถังปลูกพืช รวมทั้งตะกอนแขวนลอยสะสมบริเวณมุมขอบถังปลูกพืชและถังเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงส่งผลให้เกิดการลดลงของไนเทรตและกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน สำหรับค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้มีค่าเป็นบวกอาจมีสาเหตุมาจากช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัดมีการหมุนเวียนน้ำ จึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำบริเวณชั้นเม็ดดินเผา ทั้งนี้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ยาวนานอาจส่งผลต่อการเติบโตของผักกวางตุ้งได้ (ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ, 2541) ส่วนผลจากการรวบรวมข้อมูลของความเข้มแสงที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเติบโตและการสังเคราะห์แสงของผักกวางตุ้ง รวมทั้งการหมายรวมถึงปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเติบโตของปลานิล โดยตรวจวัดในช่วงเวลาแดดจัด (10.00 น.) และช่วงเวลาแสงเริ่มน้อย (15.00 น.) ตลอดการทดลอง ได้ผลดังรูปที่ 4.29 พบว่าความเข้มแสงในเวลา 10.00 น. อยู่ในช่วง 980 - 25,410 ลักซ์ และความเข้มแสงในเวลา 15.00 น. อยู่ในช่วง 310 - 2,380 ลักซ์ ซึ่ง

ในช่วงเวลาดำเนินการทดลองอยู่ในเดือนกรกฎาคม โดยช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในฤดูฝนปริมาณแสงจึงน้อยมากในช่วงบางเวลา



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พี (ORP) ในถังปลูกผักกวางตุ้งตลอดระยะเวลา 35 วัน ของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (◆) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (☐)



รูปที่ 4.29 ปริมาณความเข้มแสงที่แตกต่างกันในช่วงเวลา 10.00 น. (◆) และเวลา 15.00 น. (☐) ของแต่ละวันตลอดการทดลอง 35 วัน

4.3.5 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยระบบอะควาโปนิกส์โดยการจัดทำสมดุลไนโตรเจนภายในระบบตลอดระยะเวลา 35 วัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.17 ถึง 4.19 ซึ่งไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลประกอบด้วย อาหารปลาทั้งหมดที่ใส่ในถังเลี้ยงปลานิล รวมทั้งปริมาณที่มีอยู่ในเนื้อปลานิล และการละลายอยู่ในน้ำ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายโอนมวลสาร เช่น ไนโตรเจนในเม็ดอาหารปลาจะเข้าไปสะสมอยู่ในตัวปลานิลเมื่อมีการเติบโต รวมทั้งสะสมอยู่ในจุลสาหร่ายหรือพืชและจุลินทรีย์ต่างๆ ในน้ำและตะกอนแขวนลอย สำหรับการจัดทำสมดุลไนโตรเจนพบว่า แหล่งไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองส่วนใหญ่มาจากอาหารปลา โดยชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) มีปริมาณไนโตรเจนจากอาหารปลาที่เข้าสู่ระบบคิดเป็นร้อยละ 86.45 ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 13.06 และอีกประมาณร้อยละ 0.33 และ 0.16 เป็นส่วนของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำและสะสมในผักกวางตุ้ง ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 18.61 มีปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 6.69 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 0.65 และไนโตรเจนของตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาคิดเป็นร้อยละ 9.72 ซึ่งมีเพียงร้อยละ 1.31 ที่ไนโตรเจนสะสมภายในผักกวางตุ้ง โดยเป็นสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้สูงถึงร้อยละ 63.02 สำหรับการประเมินสมดุลไนโตรเจนภายในระบบของชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ไนโตรเจนที่เข้าระบบจากอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 85.73 ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 13.90 และไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำคิดเป็นร้อยละ 0.37 ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 14.00 การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันจึงเกิดการสะสมไนโตรเจนในน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 14.82 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 0.64 และไนโตรเจนของตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาคิดเป็นร้อยละ 11.79 ส่วนสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้คิดเป็นร้อยละ 58.765 อย่างไรก็ตาม ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 เป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญหายออกจากระบบทั้งจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนแขวนลอยตามริมขอบมุมถังเลี้ยงปลานิลที่เป็นบริเวณจุดอับอากาศ แม้จะมีการเติมอากาศแต่การฟุ้งกระจายไม่ทั่วทั้งถังเลี้ยงปลานิล และบริเวณที่ตะกอนแขวนลอยสะสมปริมาณสูงในถังปลูกผักกวางตุ้ง รวมทั้งบริเวณชั้นเม็ดดินเผาที่เกิดการอัดตัวแน่น นั่นคือ ไนโตรเจนสูญหายออกจากระบบในรูปของแก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้บางส่วนอาจระเหยไปในรูปของแก๊สแอมโมเนียได้เช่นกัน แต่มีสัดส่วนน้อย เนื่องจากที่ระดับพีเอชของน้ำในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 8.2 – 8.5 และอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 26 – 30 °ซ ซึ่งแอมโมเนียส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 8.11 – 14.97 จะอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน ซึ่งจะคงละลายอยู่ในน้ำ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์

และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2551) รวมทั้งไนโตรเจนส่วนหนึ่งอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิล

ในส่วนของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) พบว่าไนโตรเจนจากอาหารปลาที่เข้าสู่ระบบคิดเป็นร้อยละ 82.09 ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 17.57 และไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำคิดเป็นร้อยละ 0.34 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 15.84 มีปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 32.03 ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันที่มีการสะสมของไนเทรต ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 6.43 และสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้คิดเป็นร้อยละ 47.70 ซึ่งเป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญหายออกจากระบบถังเลี้ยงปลานิลเช่นเดียวกับชุดทดลองและชุดควบคุม-2

ตารางที่ 4.17 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)										
องค์ประกอบไนโตรเจน	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**%ไนโตรเจน***	**ก.-ไนโตรเจน/ถัง**			**%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	200.50	-	196.19	-	5.40	10.59	-	-	86.45	-
ปลานิล	85.53	204.40	15.55	41.41	10.32/9.37**	1.60	3.88	2.28	13.06	18.61
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-	-	-	-	-	0.04	0.86	0.82	0.33	6.69
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	2.48	3.37	-	0.08	0.08	-	0.65
ตะกอนแขวนลอยติดเม็ดดินเผา	-	-	-	53.24	2.23	-	1.19	1.19	-	9.72
ผักกวางตุ้ง	9.12	57.88	1.10	3.77	1.39/4.66**	0.02	0.18	0.16	0.16	1.31
เม็ดดินเผา	-	-	22,000	22,000	<0.01	-	-	-	-	-
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	7.72	-	63.02
ผลรวมไนโตรเจน						**12.25**	-	**12.25**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.18 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการควบคุม 1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)										
องค์ประกอบไนโตรเจน	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**%ไนโตรเจน***	**ก.-ไนโตรเจน/ถัง**			**%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	135.33	-	132.42	-	5.40	7.15	-	-	82.09	-
ปลานิล	81.57	147.13	14.83	29.81	10.32/9.77**	1.53	2.91	1.38	17.57	15.84
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-	-	-	-	-	0.03	2.82	2.79	0.34	32.03
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	15.85	3.53	-	0.56	0.56	-	6.43
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	3.98	-	45.70
ผลรวมไนโตรเจน						**8.71**	-	**8.71**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.19 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการควบคุม 2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

สมดุลไนโตรเจนในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)										
องค์ประกอบไนโตรเจน	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**%ไนโตรเจน***	**ก.-ไนโตรเจน/ถัง**			**%ไนโตรเจนเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	176.12	-	172.34	-	5.40	9.31	-	-	85.73	-
ปลานิล	80.50	152.33	14.64	30.86	10.32/9.83**	1.51	3.03	1.52	13.90	14.00
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-	-	-	-	-	0.04	1.65	1.61	0.37	14.82
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	2.07	3.17	-	0.07	0.07	-	0.64
ตะกอนแขวนลอยติดเม็ดดินเผา	-	-	-	48.34	2.65	-	1.28	1.28	-	11.79
เม็ดดินเผา	-	-	22,000	22,000	<0.01	-	-	-	-	-
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	6.38	-	58.75
ผลรวมไนโตรเจน						**10.86**	-	**10.86**	**100**	**100**

หมายเหตุ * CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest,Italy

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

4.3.6 การประเมินสมดุลของฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

สำหรับการประเมินสมดุลฟอสฟอรัสภายในระบบอะควาโปนิกส์ตลอดระยะเวลา 35 วัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.20 ถึง 4.22 ซึ่งฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลประกอบด้วยอาหารปลาทั้งหมดที่ใส่ในถังเลี้ยงปลานิล รวมทั้งปริมาณที่มีอยู่ในเนื้อปลานิล และการละลายอยู่ในน้ำ โดยมีการเปลี่ยนแปลงถ่ายโอนมวลสาร เช่น ฟอสฟอรัสในเม็ดอาหารปลาจะเข้าไปสะสมอยู่ในตัวปลานิลเมื่อมีการเติบโต รวมทั้งสะสมอยู่ในจุลสาหร่ายหรือผักกวางตุ้งและจุลินทรีย์ต่างๆ ในน้ำและตะกอนแขวนลอย เมื่อมีการจัดทำสมดุลฟอสฟอรัสพบว่า แหล่งฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบการเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลองส่วนใหญ่มาจากอาหารปลา โดยชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) มีปริมาณฟอสฟอรัสจากเม็ดดินเผาเป็นปริมาณมากถึง 76.05 และ 75.05 ตามลำดับ ซึ่งชุดทดลองปริมาณฟอสฟอรัสจากอาหารปลาที่เข้าสู่ระบบคิดเป็นร้อยละ 20.47 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 3.29 ซึ่งฟอสฟอรัสละลายน้ำทั้งหมดและสะสมในผักกวางตุ้งคิดเป็นร้อยละ 0.15 และ 0.04 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองฟอสฟอรัสเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 3.66 มีปริมาณฟอสฟอรัสละลายน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 8.99 ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 1.10 และฟอสฟอรัสของตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาคิดเป็นร้อยละ 7.68 ซึ่งมีเพียงร้อยละ 0.11 ที่ฟอสฟอรัสสะสมภายในผักกวางตุ้ง ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเม็ดดินเผามีปริมาณลดลงเหลือ 64.35 โดยเป็นสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้มีถึงร้อยละ 14.11 สำหรับการประเมินสมดุลฟอสฟอรัสภายในระบบของชุดควบคุม-2 ฟอสฟอรัสที่เข้าระบบจากอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 21.32 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 3.42 และฟอสฟอรัสละลายน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 0.21 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองฟอสฟอรัสเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 4.26 เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 7.04 ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 0.85 และฟอสฟอรัสของตะกอนแขวนลอยที่ยึดเกาะบนเม็ดดินเผาคิดเป็นร้อยละ 11.94 สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเม็ดดินเผามีปริมาณลดลงเหลือ 60.12 ส่วนสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้คิดเป็นร้อยละ 15.78 อย่างไรก็ตาม ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 เป็นส่วนที่สูญหายออกจากระบบโดยถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลและชั้นเม็ดดินเผา

ในส่วนของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) พบว่าฟอสฟอรัสจากอาหารปลาที่เข้าสู่ระบบคิดเป็นร้อยละ 44.34 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวปลาคิดเป็นร้อยละ 9.34 และอีกร้อยละ 0.35 เป็นส่วนของฟอสฟอรัสละลายน้ำทั้งหมด นอกจากนี้สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้คิดเป็นร้อยละ 45.97 ซึ่งในเนื้อพลาสติกมีส่วนผสมของสารโพลีเอสเตอร์ซีเรียม (IV) ฟอสเฟตเจือปนอยู่

(Khan และคณะ, 2010) ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่ไม่สามารถระบุได้จึงอาจมาจากถังพลาสติกที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิล บางส่วนมาจากแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำเลี้ยงปลานิล และสารซักฟอกที่ใช้ในการล้างถังเลี้ยงปลานิลแล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดไม่หมด โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองฟอสฟอรัสเปลี่ยนเป็นเนื้อปลาคิดเป็นร้อยละ 8.17 มีปริมาณฟอสฟอรัสละลายน้ำทั้งหมดคิดเป็นร้อย 79.00 ซึ่งเกิดการสะสมภายในถังเลี้ยงปลานิล ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาคิดเป็นร้อยละ 12.83

ตารางที่ 4.20 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)										
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส (มก./กก.)***	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**			**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**		**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	200.50	-	196.19	-	2,875.28	0.56	-	-	20.47	
ปลานิล	85.53	204.40	15.55	41.41	5,703.38/4,562.69**	0.09	0.19	0.10	3.29	3.66
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	-	-	-	-	-	0.004	0.25	0.246	0.15	8.99
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	2.48	10,119.32	-	0.03	0.03	-	1.10
ตะกอนแขวนลอยติดเม็ดดินเผา	-	-	-	53.24	3,903.01	-	0.21	0.21	-	7.68
ผักกวางตุ้ง	9.12	57.88	1.10	3.77	967.55/1,292.22**	0.001	0.004	0.003	0.04	0.11
เม็ดดินเผา	-	-	22,000	22,000	94.59/79.95**	2.08	-	1.76	76.05	64.35
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	0.386	-	14.11
ผลรวมฟอสฟอรัส						**2.735**	-	**2.735**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.21 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)										
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**			**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	135.33	-	132.42	-	2,875.28	0.38	-	-	44.34	-
ปลานิล	81.57	147.13	14.83	29.81	5,703.38/5,031.36**	0.08	0.15	0.07	9.34	8.17
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	-	-	-	-	-	0.003	0.68	0.677	0.35	79.00
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	15.85	7,166.07	-	0.11	0.11	-	12.83
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	0.394	-	-	45.97	-
ผลรวมฟอสฟอรัส						**0.857**	**-**	**0.857**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ตารางที่ 4.22 ปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดการทดลองในชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

สมดุลฟอสฟอรัสในชุดการทดลองถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)										
องค์ประกอบฟอสฟอรัส	**น้ำหนักเปียก (ก.)**		**น้ำหนักแห้ง (ก.)**		**ความเข้มข้นฟอสฟอรัส**	**ก.-ฟอสฟอรัส/ถัง**			**%ฟอสฟอรัสเทียบกับทั้งระบบ**	
	เริ่มต้น	**สิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**(มก./กก.)***	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**	**สุทธิสิ้นสุด**	**เริ่มต้น**	**สิ้นสุด**
อาหารปลานิล	176.12	-	172.34	-	2,875.28	0.50	-	-	21.32	-
ปลานิล	80.50	152.33	14.64	30.86	5,703.38/5,754.56**	0.08	0.18	0.10	3.42	4.26
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	-	-	-	-	-	0.005	0.17	0.165	0.21	7.04
ตะกอนแขวนลอยในบ่อปลา	-	-	-	2.07	9,064.32	-	0.02	0.02	-	0.85
ตะกอนแขวนลอยติดเม็ดดินเผา	-	-	-	48.34	5,738.36	-	0.28	0.28	-	11.94
เม็ดดินเผา		-	22,000	22,000	79.95/64.02**	1.76	-	1.41	75.05	60.13
สิ่งที่ไม่สามารถระบุได้	-	-	-	-	-	-	-	0.37	-	15.78
ผลรวมฟอสฟอรัส						**2.345**	-	**2.345**	**100**	**100**

หมายเหตุ * Optical Emission Spectrometer,Optima 4300 DV,Perkin Elmer Instruments,USA

** เริ่มต้น/สิ้นสุด

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำสมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) ระหว่างไนโตรเจนที่เข้าระบบ (input) และไนโตรเจนสุดท้าย (output) ซึ่งก็คือ ไนโตรเจน ณ วันสุดท้ายของการทดลอง วิธีนี้จะช่วยให้สามารถประเมินสัดส่วนการบำบัดปริมาณไนโตรเจนโดยผักกวางตุ้งและเม็ดดินเผาได้จากไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบการเลี้ยงปลานิล โดยวิธีการศึกษานี้ เรียกว่า Nitrogen budget ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมามีผู้ทำการศึกษาในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำหลายชนิด เช่น ปลา (Gross และคณะ, 2000) และกุ้ง (Coddington, 1995) เป็นต้น ดังตารางที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลการศึกษา Nitrogen budget ในสัตว์น้ำต่างๆ

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลของการศึกษา Nitrogen budget จากเอกสารที่ได้มีรายงานไว้กับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้

ชนิดสัตว์น้ำ	ไนโตรเจนจากอาหาร (ร้อยละ N ทั้งหมด)	ไนโตรเจนในสัตว์น้ำ (ร้อยละ N ทั้งหมด)	ไนโตรเจนในน้ำ (ร้อยละ N ทั้งหมด)	เอกสารอ้างอิง
กุ้ง	90	21	22	(1)
กุ้ง	40	16	72	(2)
กุ้ง	78	18	30	(1)
กุ้ง	76.4-92.4	22.8-30.7	14.1-28.4	(3)
กุ้ง	75.64-94.36	21.4-22.7	16.31-26.28	(4)
ปลา *(Sciaenops ocellatus)*	52.57-56.61	28-34	31-34	(5)
ปลานิล	5.5-35.1	21-22	59-72	(6)
ปลาดุก	87.89	31.53	68.47	(7)
ปลานิล	90.51-92.33	37.09-47.16	16.70-23.58	งานวิจัยนี้ (4.1.3)
ปลานิล	82.09-86.45	14.00-18.61	6.69-32.03	งานวิจัยนี้ (4.3.5)

หมายเหตุ : (1) = งานวิจัยของ Funge-Smith และ Briggs (1998)
(2) = งานวิจัยของ Coddington (1995)
(3) = งานวิจัยของ Thakur และ Lin (2003)
(4) = งานวิจัยของ Avnimelech และ Rityo (2003)
(5) = งานวิจัยของ Thoman และคณะ (2001)
(6) = งานวิจัยของ Siddiqui และ Harbi (1999)
(7) = งานวิจัยของ Gross และคณะ (2000)

ผลจากตารางที่ 4.23 และหัวข้อ 4.3.1 พบว่าระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำภายใต้โรงเรือนมีแสงแบบบ่อไร้ดิน ชุดทดลองที่มีการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกพืชบนเม็ดดินเผา และชุดควบคุม-2 ที่เลี้ยงปลานิลร่วมกับการใช้ตัวกลางเม็ดดินเผาสามารถบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือ เม็ดดินเผามีศักยภาพในการช่วยบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าผักกวางตุ้งมีส่วนช่วยในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้เพียงเล็กน้อย โดยดึงไปใช้เป็นธาตุอาหารสำหรับการเติบโต

เมื่อเปรียบเทียบการบำบัดคุณภาพน้ำด้วยพืช (ผักกวางตุ้ง) กับการบำบัดคุณภาพน้ำด้วยจุลินทรีย์ พบว่าระบบทั้งสองมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยการบำบัดคุณภาพน้ำด้วยการปลูกผักกวางตุ้งจะมีข้อดีคือ ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำและระบบปลูกพืชอยู่ภายใต้ระบบหมุนเวียนน้ำเดียวกันจึงเหมือนผลผลิตทวีคูณ และสามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงสัตว์น้ำได้ นั่นคือ ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับกระบวนการดูดซึมโดยตะกอนแขวนลอยและพืชที่ปลูก สำหรับข้อเสียคือ ประสิทธิภาพของการบำบัดขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาวะแวดล้อมเป็นสำคัญ กล่าวคือ หากปัจจัยสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดต่ำลง รวมทั้งค่าลงทุนเดินระบบเริ่มต้นสูงและต้องมีความเชี่ยวชาญในการควบคุมระบบ ขณะที่การบำบัดคุณภาพน้ำด้วยจุลินทรีย์จะมีข้อดีที่สามารถบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงและดีไนทริไฟอิง (Nitrifying และ Denitrifying bacteria) ซึ่งจะช่วยทำให้ไม่เกิดการสะสมของปริมาณไนไทรต์และไนเทรตภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่ข้อเสียของระบบบำบัดนี้คือ ไม่สามารถบำบัดปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในน้ำได้ ทำให้เกิดการสะสมของฟอสเฟตภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงส่งผลให้เกิดการเพิ่มจำนวนของปริมาณแพลงก์ตอนพืชและมีการใช้ออกซิเจนในช่วงเวลากลางคืน รวมทั้งทำให้คุณภาพน้ำต่ำลงจากปริมาณออกซิเจนภายในระบบลดลง และทำให้บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำขาดออกซิเจนอย่างรุนแรงส่งผลให้สัตว์น้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจนสำหรับการหายใจ นอกจากนี้ระบบบำบัดดังกล่าวต้องอาศัยความเชี่ยวชาญในการควบคุมระบบและเสียค่าใช้จ่ายในปริมาณที่สูงสำหรับการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งจากผลการวิจัยในครั้งนี้ทดลองใช้ตัวกลางเม็ดดินเผาและการปลูกผักกวางตุ้งบนตัวกลางเม็ดดินเผาสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงปลานิลได้ไม่แตกต่างกัน รวมทั้งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป ดังนั้นการประยุกต์ใช้ทั้งระบบการบำบัดคุณภาพน้ำด้วยพืชบนตัวกลางเม็ดดินเผาหรือใช้ตัวกลางเม็ดดินเผาเพียงอย่างเดียวร่วมกับจุลินทรีย์ในน้ำน่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการบำบัดคุณภาพน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาอัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยและบทบาทของตะกอนในการควบคุมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลที่ 2 ระดับความหนาแน่น คือ ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ผลการทดลองพบว่า

- อัตราการเกิดตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงเท่ากับ 2.45±0.73 และ 5.17±1.26 มก./ล.-วัน ตามลำดับ ซึ่งจะต้องมีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากถังเลี้ยงปลานิลทุก 4 วัน เพื่อควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำให้อยู่ในระดับที่ต้องการ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเท่ากับ 255.56±36.72 และ 555.56±90.02 มก./ล.
- อัตราการเติบโตของปลานิลที่ทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงแตกต่างกันคือ 0.14 และ 0.18 ก.-นน. เปียก/วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในชุดการทดลองทั้งสองระดับความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีอัตราการรอดตายร้อยละ 100
- การทดลองดึงตะกอนแขวนลอยออกจากระบบร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำในถังส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง ส่วนที่ระดับความหนาแน่นต่ำไม่เกิดการสะสมของแอมโมเนียและไนไทรต์ ดังนั้นปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีผลโดยตรงในการช่วยควบคุมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับการดูดซึม แต่จะต้องมีการควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยไม่ให้เกิน 500 มก./ล. เนื่องจากจะส่งผลให้ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีความต้องการออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นจากการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในตะกอน รวมทั้งบดบังการมองเห็นในการหาอาหารของสัตว์น้ำ
- เมื่อทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนในการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง พบว่าแหล่งไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดของการเลี้ยงปลานิลส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาซึ่งคิดเป็นร้อยละ 92.33 และ 90.51 ตามลำดับ ซึ่ง

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณไนโตรเจนที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 47.16 และ 37.09 รองลงมาคือไนโตรเจนทั้งหมดที่ละลายน้ำซึ่งคิดเป็นร้อยละ 23.58 และ 16.70 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 2.84 และ 1.58 ตามลำดับ รวมทั้งสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้ (Unaccounted nitrogen) ซึ่งเป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญหายจากระบบสูงถึงร้อยละ 44.63 และ 26.42 ของการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง ตามลำดับ โดยเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนแขวนลอยตามริมขอบมุมถังเลี้ยงปลานิลที่เป็นบริเวณจุดอับอากาศทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนระเหยออกสู่ระบบ รวมทั้งอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิล และบางส่วนอาจระเหยไปในรูปของแก๊สแอมโมเนีย แต่มีสัดส่วนน้อย เนื่องจากที่ระดับพีเอชของน้ำในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 7 – 8 และอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25 – 33 °ซ ซึ่งแอมโมเนียส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 0.55 – 5.28 จะละลายน้ำอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน

- สำหรับการประเมินสมดุลฟอสฟอรัสในการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) พบว่าแหล่งฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบการเลี้ยงปลานิลส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาซึ่งคิดเป็นร้อยละ 18.75 และ 46.29 ซึ่งส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ (Unaccounted phosphorus) มีในปริมาณที่สูงมากเท่ากับ 76.56 และ 51.85 ตามลำดับ โดยในเนื้อพลาสติกมีส่วนผสมของสารโพลีเอสเตอร์ซีเรียม (IV) ฟอสเฟตเจือปนอยู่ รวมทั้งสารซักฟอกที่ใช้ในการล้างถังเลี้ยงปลานิลแล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดไม่หมด ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำทั้งหมดมีปริมาณมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 73.44 และ 62.64 รองลงมาคือฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลาซึ่งคิดเป็นร้อยละ 23.44 และ 43.52 ตามลำดับ สำหรับการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยของการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงคิดเป็นร้อยละ 2.78 ซึ่งต่ำกว่าการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำที่คิดเป็นร้อยละ 3.12

<u>การทดลองช่วงที่ 2</u> เป็นการศึกษาการเติบโตของผักกวางตุ้งและสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของการปลูกผักกวางตุ้ง โดยเปรียบเทียบระหว่างการปลูกในดินเพาะปลูกกับการปลูกบนเม็ดดินเผา ผลการทดลองพบว่า

- การปลูกในดินเพาะปลูกมีอัตราการเติบโตที่สูงกว่าการปลูกบนเม็ดดินเผา คือมีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.04 และ 0.03 ก./ต้น-วัน ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในชุดการทดลองทั้งสองชุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p<0.05$) โดยเมื่อประเมินสมดุลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพบว่า ผักกวางตุ้งต้องการสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการเติบโต สำหรับการปลูกผักกวางตุ้งบนชั้นเม็ดดินเผาเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อผักกวางตุ้งคิดเป็นร้อยละ 100 และ 1.78 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่วิเคราะห์บางส่วนอาจยังไม่ครบถ้วน ดังนั้นไนโตรเจนในระบบอาจสูญหายออกจากระบบด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน รวมทั้งจุลสาหร่ายในถังบรรจุน้ำใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการเติบโต และบางส่วนอาจสะสมในดินเพาะปลูกและตะกอนเม็ดดินเผา

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยการปลูกพืชแบบอะควาโปนิกส์ ซึ่งทำการหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิลเข้าสู่ถังปลูกผักกวางตุ้งที่มีเม็ดดินเผาเป็นวัสดุปลูก ผลการทดลองพบว่า

- ระบบบำบัดของชุดทดลองที่มีถังบรรจุเม็ดดินเผาและมีการปลูกผักกวางตุ้ง และชุดควบคุม-2 ที่มีเฉพาะเม็ดดินเผาแต่ไม่มีการปลูกผักกวางตุ้ง สามารถควบคุมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตรวจพบปริมาณแอมโมเนียสูงสุดในระหว่างการเลี้ยงปลานิลเท่ากับ 0.31±0.12 และ 0.31±0.04 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุม-1 ที่ทำการเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวไม่มีถังบำบัดจะพบความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงถึง 1.22±0.30 มก.-ไนโตรเจน/ล. และต่อมาจะเกิดการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและพบการสะสมของฟอสเฟตที่มีระดับความเข้มข้น 8.84±0.40 มก.-ฟอสฟอรัส/ล. นอกจากนี้ในชุดควบคุม-1 ยังพบการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชทำให้น้ำมีสีเขียว
- สำหรับอัตราการเติบโตของปลานิลในชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) เท่ากับ 0.45±0.15 ก.-นน. เปียก/วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าในชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ที่มีอัตราการเติบโตใกล้เคียงกัน คือ 0.37±0.16 และ 0.38±0.05 ก.-นน. เปียก/วัน ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (T-test) พบว่าอัตราการเติบโตในทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยทุกชุดการทดลองนั้นปลานิลมีอัตราการรอดตายร้อยละ 100 ส่วนอัตราการเติบโตของผักกวางตุ้งในชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 0.02±0.01 ก.-นน. เปียก/ต้น-วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 35 วัน

- ผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนพบว่า ไนโตรเจนที่เข้าระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 82.09 – 86.45 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณไนโตรเจนที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 14.00 – 18.61 รองลงมาคือไนโตรเจนทั้งหมดที่ละลายน้ำซึ่งคิดเป็นร้อยละ 6.69 – 14.82 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 0.64 – 6.43 ตามลำดับ สำหรับชุดทดลองที่มีการปลูกผักกวางตุ้งพบการสะสมของไนโตรเจนในผักกวางตุ้งเพียงร้อยละ 1.31 และในชุดควบคุม-1 กระบวนการไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะทำให้มีปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนสะสมในน้ำสูงถึงร้อยละ 32.03 จากการสะสมของไนเทรตภายในระบบ นอกจากนั้นทุกชุดการทดลองยังพบไนโตรเจนส่วนที่สูญหายจากระบบในปริมาณค่อนข้างสูง (ร้อยละ 45.70 – 63.02) ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันทำให้ไนโตรเจนสูญหายออกจากระบบไปในรูปของแก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้บางส่วนอาจระเหยไปในรูปของแก๊สแอมโมเนียได้เช่นกันแต่มีสัดส่วนน้อย เนื่องจากที่ระดับพีเอชของน้ำในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 8.2 – 8.5 และอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 26 – 30 °ซ ซึ่งแอมโมเนียส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 8.11 – 14.97 จะละลายน้ำอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน รวมทั้งไนโตรเจนส่วนหนึ่งอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิล
- ส่วนการประเมินสมดุลฟอสฟอรัสพบว่า ฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 20.47 – 44.34 ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำทั้งหมดมีปริมาณมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 7.04 – 8.99 รองลงมาคือ ฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนเป็นเนื้อปลาซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3.66 – 8.17 และปริมาณฟอสฟอรัสในตะกอนแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 0.85 – 12.83 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่พบในผักกวางตุ้งมีเพียงร้อยละ 0.11 นอกจากนี้ชุดควบคุม-1 ที่เลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวเกิดการสะสมฟอสฟอรัสในน้ำปริมาณร้อยละ 79 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) สำหรับสิ่งที่ไม่สามารถระบุได้มีปริมาณ 14.11 – 45.97 ซึ่งเป็นส่วนที่สูญหายออกจากระบบโดยถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเติบโตของจุลสาหร่ายที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลและชั้นเม็ดดินเผา นอกจากนี้บางส่วนอาจเกิดจากสารประกอบฟอสฟอรัสในเนื้อพลาสติกที่มีส่วนผสมของสารโพลีเอสเตอร์ซีเรียม (IV) ฟอสเฟตเจือปนอยู่

จากผลการทดลองทั้ง 3 ส่วนการทดลองเมื่อนำมาประมวลกันทำให้สามารถสรุปได้ในภาพรวมว่า การหมุนเวียนน้ำและตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านเข้าไปยังระบบบำบัดที่มีการปลูกพืชบนวัสดุตัวกลางเม็ดดินเผา สามารถควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่ำกว่า 1.0 มก.-ไนโตรเจน/ล.) ตลอดระยะเวลาการทดลอง นอกจากนี้ยังไม่พบการสะสมของไนเทรตในน้ำเนื่องจากเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันขึ้นในชั้นของตะกอนแขวนลอยที่สะสมอยู่ในถังบรรจุเม็ดดินเผา และบริเวณชั้นเม็ดดินเผา รวมทั้งจุดอับอากาศทั้งในถังเลี้ยงปลาและถังปลูกพืช สำหรับการปลูกผักกวางตุ้งในถังบรรจุเม็ดดินเผาจะมีส่วนช่วยในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้เพียงเล็กน้อย ผลจากการทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นบทบาทของตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลซึ่งจะมีส่วนในการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับการดูดซึม สำหรับการแยกตะกอนแขวนลอยออกมากเกินไปจะลดประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและกระบวนการดูดซึมของตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล ซึ่งก็อาจทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียขึ้นในน้ำได้เช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- จากผลการทดลองที่ 4.3.1 พบว่าชุดทดลองที่มีการปลูกผักกวางตุ้งบนชั้นเม็ดดินเผาและชุดควบคุม-2 ที่มีเฉพาะเม็ดดินเผาแต่ไม่มีการปลูกผักกวางตุ้ง สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่แตกต่างกัน อีกทั้งผักมีการใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่น้อย ดังนั้นเม็ดดินเผาที่เลือกใช้เป็นตัวกลางจึงมีศักยภาพในการบำบัดคุณภาพน้ำให้ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำก่อนการหมุนเวียนกลับสู่ถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน

- การสร้างถังปลูกพืชในลักษณะพื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland) ควรมีศึกษาสรีรวิทยาของพืชที่ใช้ในการศึกษาและการออกแบบควบคุมระดับความสูงของน้ำที่กักขังอย่างเหมาะสม เนื่องจากเป็นส่วนที่มีสำคัญโดยเฉพาะพืชชนิดอายุการเก็บเกี่ยวสั้น รวมทั้งปริมาณสารอาหารที่พืชต้องการประเภทของพืช และอายุของพืชที่ใช้ในการศึกษา เป็นส่วนที่มีความสำคัญด้วยเช่นเดียวกัน

- ปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ปริมาณความเข้มแสง อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ที่มีความสำคัญต่อการเติบโตของสัตว์น้ำและพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มแสงต้องมีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชในการสังเคราะห์แสง

- การพัฒนาระบบในขั้นตอนต่อไปควรมีการแยกถังตกตะกอนแขวนลอยออกจากถังเลี้ยงปลา เพื่อการใช้ประโยชน์จากตะกอนแขวนลอยอย่างเต็มประสิทธิภาพในการเป็นสารอาหารทางเลือกของพืช รวมทั้งการเพิ่มถังปรับเสถียร (stabilization tank) ก่อนการหมุนเวียนน้ำกลับสู่ถังเลี้ยงปลา นอกจากนี้การเพิ่มการเติบโตของพืชอาจทำได้โดยเพิ่มระบบเติมสารอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืช เนื่องจากสารอาหารในน้ำและตะกอนแขวนลอยที่ได้จากถังเลี้ยงปลาอาจยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กลุ่มสถิติและสารสนเทศการประมง. 2537. การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมบำบัดน้ำเสีย. เล่ม 4, พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: มิตรนราการพิมพ์.

คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2537. แนวทางการป้องกันเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา: กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2546. คู่มือวิชาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีวภาพ. เล่มที่ 2, กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

จิระเดช แจ่มสว่าง. 2547. เอกสารการควบคุมศัตรูพืชโดยการปลูกผักระบบไม่ใช้ดินและภายในโรงเรือน. ใน การควบคุมโรคผัก, หน้า 34 – 38. กรุงเทพมหานคร: คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ. 2535. คัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ฐานเศรษฐกิจ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ. 2541. ผักกวางตุ้ง. บทความวิทยุรายการสาระความรู้ทางการเกษตร. (พฤษภาคม – กรกฎาคม): 45 – 51.

ดิเรก ทองอร่าม. 2550. ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดีการพิมพ์.

ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์. 2534. ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: พรานนกการพิมพ์.

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. 2547. การกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. เล่มที่ 121, ราชกิจจานุเบกษา ตอนพิเศษ 49 ง. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ธีรพงษ์ จรัญญากรณ์. 2545. การใช้สาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ธัญฐิติ มาแสง. 2553. ความรู้เรื่องผักกวางตุ้ง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.doae.go.th/library/html/detail/vegetable/guangtung/guangtung_index.html [2553, 12 มิถุนายน]

ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนทริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิวัติ สุธีมีชัยกุล. 2551. รายงานสินค้าประมงกับเขตการค้าเสรี. ใน เศรษฐกิจการเกษตร, หน้า 17 – 24. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์. 2552. ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลสาหร่ายและอนุภาคสารแขวนลอยเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล. 2538. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ของดินและน้ำกับสารรีดิวซ์ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำเน้นการศึกษาปลานิลและกุ้งกุลาดำที่เลี้ยงแบบหนาแน่นในตู้กระจก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิมล เกษสยม. 2534. อิทธิพลของสารละลายธาตุอาหารพืชและปุ๋ยที่มีต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในพริกชี้ฟ้า คะน้าจีน และผักกาดหอม ที่ปลูกในวัสดุชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พุทธ ส่องแสงจินดา. 2550. การจัดการสารประกอบไนโตรเจนในฟาร์มเลี้ยงกุ้งระบบปิด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.kungthai.com/KungThai/con_detail.php?id=32 [2553, 18 มิถุนายน]

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. 2551. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย จำนวน 2,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2536. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. เล่ม 1, การจัดการคุณภาพน้ำ. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. การคัดเลือกหัวเชื้อไนทริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มลวิภา ลือชัย. 2540. การปรับปรุงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลด้วยระบบถังกรองทรายแบบไหลไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ. 2528. คุณสมบัติน้ำและวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภานุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัณยวุฒิ, วีระ วัชรกรโยธิน และกมล จันทรโรทัย. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. ใน ความรู้เกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงปลานิล, หน้า 36 – 42 กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ราเชนทร์ วิสุทธิแพทย์. 2550. เอกสารเผยแพร่การปลูกพืชและการเลี้ยงสัตว์แบบไฮโดรโปนิกส์. ปทุมธานี: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

วิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด, สถาบัน. 2536. การพัฒนาการเพาะปลานิล. เอกสารวิชาการ 23. (มิถุนายน – สิงหาคม): 47 – 50.

วิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, สถาบัน. 2533. การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. เอกสารวิชาการ 43. (สิงหาคม – กันยายน): 64 – 92.

วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เดี่ยววาณิชย์. 2535. พีเอช กรุงเทพมหานคร: แลปอินเตอร์.

วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาสินี ไตรยราช. 2546. สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรทในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเทรตแบบท่อยาวสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรานุช หลาง. 2551. จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์. 2554. การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์. 2544. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในตู้เลี้ยงปลาน้ำจืดระบบปิดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริอร แก้วโบราณ. 2544. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบการปลูกพืชไร้ดินโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลทราย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สายวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เศรษฐกิจการเกษตร, สำนักงาน. 2552. รายงานสถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2553. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป.

สุรัชดา ไชยชนะ 2544. การกำจัดไนเตรทโดยออโตโทรฟิกดีไนทริฟิเคชันในคอลัมน์กำมะถันหินปูน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุฤทธิ์ สมบูรณ์ชัย, ประจวบ ฉายบุ, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และอานัฐ ตันโช. 2551. ศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพเพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 2 (พฤษภาคม – มิถุนายน): 55 – 65.

อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2538. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponics). กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อำไพเทพิน สิงหะพันธุ. 2543. ระบบบำบัดไนเตรทเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Adams, P. 1994. Nutrition of Greenhouse Vegetable in NFT and Hydroponic System. Acta Horticulture 361: 245 - 257.

Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons.

Anderson, G.K., and Ibahim, A.B. 1978. Treatment of high nitrate wastewater by plastic media anaerobic filters with particular reference to latex processing. Progress in Water Technology 10 (May - June): 237 - 253.

APHA (American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation). 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. United States of America: American Public Health Association.

Avnimelech, Y., and Lacher, M. 1979. A tentative nutrient budget for intensive fish ponds. The Israeli journal of aquaculture : Bamidgeh 31: 3 – 8.

Avnimelech, Y., and Rityo, G. 2003. Shrimp and fish pond soils processes and management. Aquaculture 264: 140 - 147.

Azim, M.E., and Little, D.C. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture 283: 29 – 35.

Azim, M.E., Little, D.C., and Bron, J.E. 2008. Microbial protein production in activated suspension tanks manipulating C:N ratio in feed and the implications for fish culture. Bioresource Technology 99: 3590 – 3599.

Bergheim, A., and Asgard, T. 1996. Waste production in aquaculture. Cited in Baird, D.J., Beveridge, M.C.M., Kelly, L.A., and Muir, J.F. Aquaculture and Water Resource Management. [Electronic Documents System] Blackwell Science, Oxford, pp. 50 – 80.

Bevan, S. 2010. The Aquaponics Guidebook. 3rd edition. London: Aquaponic Europe.

Bitton, G.B. 1994. Wastewater microbiology. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons.

Bouldin, D.R., Johnson, R.L., Burda, C., and Kao, C.W. 1974. Losses of inorganic nitrogen from aquatic systems. Journal of Environmental Quality 3: 107 – 114.

Boyd, C.E. 1998. Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering 18: 9 - 40.

Boyd, C.E. 1998. Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering 18: 9 - 40. Cited in มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. การคัดเลือกหัวเชื้อไนทริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Brune, D.E., Schwartz, G., Eversole, A.G., Collier, J.A., and Schwedler, T.E. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. Aquacultural Engineering 28: 65 - 86.

Chanratchakool, P., Turnbull, J.F., Funge-Smith, S., and Limsuwan, C. 1995. Health Management in Shrimp Pond. In Aquatic Animal Health Research Institute, Department of Fisheries, pp.256 – 264. Bangkok Thailand.

Cambell, C.S., and Ogden, M.H. 1999. Constructed Wetlands Sustainable Landcape. Canada: John Wiley & Sons.

Coddington, D.T. 1995. Characterization of shrimp farm effluents in Honduras and chemical budget of selected nutrients. In Pond Dynamics/Aquaculture Collaborative Research Support Program, pp.321 – 330. Oregon State University.

Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W.B., and Hassan, A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. Bioresource Technology 101(5): 1511 – 1517.

Fay, J. 2011. Aquaponic Systems [Online]. Available from: http://www. aquaponicssystems.us /2011/aquaponic-systems [2011, March 14]

Focht, D.D., and Verstraete, W. 1977. Biochemical ecology of nitrification and denitrification. In Advances in Microbial Ecology, pp.135 – 214. New York: Plenum Press.

Funge-Smith, S.J., and Briggs, M.R.P. 1998. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability. Aquaculture 164: 117 – 133.

Gerberg, R.M., Brenner, S.R., Lyon, S.R., and Elkins, B.V. 1987. Literature Review with Integrated Site Metal Data and Implication for food Web Toxicity, Hayward Marsh, Hayward California, Submitted by Woodward Clyde Constructants and Humboldt State University.

Gomez, M.A., Lopez, J.G., and Garcia, E.H. 2000. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in denitrifying submerged filter. Journal of Hazardous Materials B80: 69 - 80.

Graber A., and Junge R. 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246: 147 – 156.

Grassholf, K., Kremling, K., and Ehrhaedt, M. 1999. Methods of seawater analysis 3rd edition. Weinheim: Wiley - VCH.

Gross, A., Boyd, C.E., and Wood, C.W. 2000. Nitrogen transformations and balance in Nile tilapia ponds. Aquacultural Engineering 24: 1 – 14.

Gutierrez-Wing, M.T., and Malone, R.F. 2006. Biological filters in aquaculture: trends and research direction for freshwater and marine applications. Aquacultural Engineering 34(3): 163 - 171.

Hakanson, L. 1988. Basic Concepts Concerning Assessments of Environmental Effects of Marine Fish Farms. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

Hammer, D.E., and Kadlec, R.H. 1983. Design Principles for Wetlands Treatment System. In National technical Information Survive, pp.354 – 367. United States of America: University of Michigan.

Hargreaves, A.J. 2006. Photosythetic suspended-growth systems in aquaculture. Aquacultural Engineering 34: 344 - 363.

Hart, P. and O'sullivan, D. 1993. Recirculating system: Design, construction and management. Australia: Turtle Press Pty.

Hellinga, C.S., A.A.J.C. Mulder, J.W., van Loosdrecht, M.C.M., and Heijnen, J.J. 1998. The SHARON process: a innovative method for nitrogen removal from ammonia-rich wastewater. Water Science Technology 37: 135 - 142.

Her, J.J., and Huang. J.S. 1995. Influence of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough. Aquacultural Engineering 5: 45 - 54.

Johnson, D.M., and Wardlow, G.W. 1997. A Prototype Recirculating Aquaculture-Hydroponic System. Journal of Agricultural Mechanization Revised for Publication (November 7).

Johnsen, F., Hillestad, M., and Austreng, E. 1993. High energy diets for Atlantic salmon. Effect on pollution. Cited in Kaushik, S.J., and Luquet, P. Fish Nutrition in Practice. [Electronic Documents System] International Research Associates, Paris, pp. 391 – 401.

Kessomboon, S. 1990. Piggery Wastewater Treatment by Aquatic plant System. Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.

Khan, A.A., Ahmad, R., Khan, A., and Mondal, P.K. 2010. Preparation of unsaturated polyester Ce(IV) phosphate by plastic waste bottles and its application for removal of Malachite green dye from water samples. Arabian Journal of Chemistry 43: 445 - 452.

Knowler, J.T. 1982. Biochemistry and Molecular Biology Education. United Kingdom: John Wiley & Sons.

Koiller, M., and Avtation, R.R. 1985. A laboratory scale recycling water unit for tilapia breeding. Aquacultural Engineering 4: 235 - 246.

Lawson, T.B. 1995. Fundamentals of Aquaculture Engineering. New York: Chapman & Hall.

Lee, P.G., Lea, R.N., Dohmann, E., Preblisky, W., Turk, P.E., Ying, H., and Whitson, J.L. 2000. Denitrification in aquaculture system: an example of a fuzzy logic control problem. Aquacultural engineering 23: 37 - 59.

Lemarie, G., Martin, J.-L.M., Dutto, G., and Garidou, C. 1998. Nitrogen use and phosphorus waste production in a flow-through land-based farm of European seabass (*Dicentrarchus labrax*). Aquatic Living Resources 11: 247 – 254.

Liao, P.B., and Mayo, R.D. 1972. Salmonid hatchery water reuse system. Aquaculture 1: 317 - 335.

Lin, C.K., and Nash, G.L. 1996. Asian Shrimp News, Collected Columns. Asian Shrimp Culture Council (1989 – 1995): 125 – 136.

Mateju, V., Cizinska, S., Krejci, J., and Janoch, T. 1992. Biological water denitrification a review. Enzyme and Microbiology Technology 14: 170 - 183.

McMurtry, M.R., Sanders, D.C., Nelson, P.V., and Nash, A. 1993. Mineral Nutrient Concentration and Uptake by Tomato Irrigated with Recirculating Aquaculture Water as Influenced by Quantity of Fish Waste Products Supplied. Journal of Plant Nutrition 16(3): 407 - 419.

Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 4th edition. Singapore: Mcgraw – Hill.

Nelson, R. 2008. Aquaponic Food Production. Raising fish and plants for food and profit. United States of America: Nelson and Pade Incorporation.

Nootong, K., Pavasant, P., and Powtongsook, S. 2011. Effects of organic carbon addition in controlling inorganic nitrogen concentrations in a biofloc system. Journal of The World Aquaculture Society 42(3): 339 - 346.

Peak, S. 2011. What is aquaponics [Online]. Available from: http://www.thingstoquestion.com [2011, February 4]

Piedrahita, R.H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation Aquaculture 226: 35 - 44.

Pillay, T.V.R. 1992. Aquaculture and the Environment. New York: Wiley.

Polprasert, C. 1989. Organic Waste Water Recycling. London: John Wiley & Sons.

Rafiee, G.R., Saad, C.R., Kamarudin, M.S., Sijam, K., Ismail, M.R., and Yusop, K. 2002. Use of aquaculture wastewaters as nutrient solutions for growth of lettuce (*Lactuca, sativa var, longifolia*). In Proceeding of Asia-Pacific Conference on marine Science and technology 12 – 16 may, vol. 1, pp.354 – 360. Malaysia.

Rafiee, G.R., and Saad, C.R. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. Aquaculture 244: 109 – 118.

Reed, S.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. 1988. Natural system for waste management and treatment. New York: McGraw - Hill.

Roger, F.E.J., Roger, K.H., and Buzer, J.S. 1985. Wetlands for Wastewater Treatment. South Africa: Witwatersard University Press.

Sachs, J., and Knop, W. 1865. Künstlischer Boden zu Vegetationsversuchen. Landw Versuchs-stat Dresden : 341 – 344.

Schryver, D.P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., and Verstraete, W. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture 277: 125 - 137.

Seawright, D.E., Stickney, R. R., and Walker, R. B. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. Aquaculture 160(3-4): 215 - 237.

Siddiqui, A.Q., and Harbi, A.H.A. 1999. Nutrient budget in tank with different stocking densities of hybrid tilapia. Aquaculture 170: 245 - 252.

Spotte, S. 1979. Seawater aquariums the captives environment. New York: John Wiley & Sons.

Strickland, J.D.H., and Parsons, T.R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd edition. Canada: Fisheries Research Board.

Tchobanoglous, G., Burton, L.F., and Stensel, D.H. 2004. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th edition. New York: McGraw - Hill.

Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D.B., Potts, A., and Boyd, C.E. 1999. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. Aquacultural Engineering 19: 147 - 161.

Thakur, D.P., and Lin, C.K. 2003. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus monodon*) cultures system. Aquacultural Engineering 27: 159 - 176.

Thoman, E.S., Ingall, E.D., Davis, A.D., and Arnold, C.R. 2001. A nitrogen budget for a closed, recirculating mariculture system. Aquacultural Engineering 24: 195 - 211.

Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T., and Vinci, B.J. 2002. Recirculating aquaculture systems. 2nd edition. New York: Cayuga Aqua Ventures, Ithaca.

US. EPA., 1975. Process Design Manual for Nitrogen Control. Washington, D.C.: office of Technology Transfer.

Vanitchanai, W., Powtongsook, S., and Nootong, K. 2009. Effects of organic carbon addition on inorganic nitrogen control and biofloc characteristics during the closed-water tilapla growout in suspension system. In 35th Congress on Science and Technology of Thailand 15 - 17 October, pp.136 – 143. Bangkok.

Verstraete, W., and Alexander, M. 1972. Heterotrophic nitrification by *Arthrobacter* sp. Journal of Bacteriology 110: 955 - 961.

Wetzel, R.G. 2001. Ecology of Fresh Water. 3rd edition. New Zealand: University of Wisconsin Digital Collections Center. Cited in Camargo, J.A., Alonso, A., and Salamanca, A. 2005. Nitrate toxicity to aquatic animals : a review with new data for freshwater invertebrates. Chemosphere 58: 1255 - 1267.

Wheaton, W.F. 1997. Aquaculture engineering. Canada: Wiley & sons.

Wheaton, W.F. 1997. Aquaculture engineering. Canada: Wiley & sons. Cited in มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. การคัดเลือกหัวเชื้อไนทริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Whiston, J., Turk, P., and Lee, P. 1994. Biological Denitrification in a Closed Recirculating marine culture system. In Aquaculture Engineering Conference. 21 - 23 June, pp.354 – 357. United States of America.

Wilson, A., and Brian, V. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. Aquaculture International 14: 539 – 550.

Yoshida, A.A., Glass, D.M., Ehret, D., and menzies, J. 1996. Molity and deposition of oxygen limit in cucumber plants. Plant Cell and Environment 14: 485 - 492.

Yun, S.I., Ro, H.M., Choi, W.J., and Chang, S.X. 2006. Interactive effects of N fertilizer source and timing of fertilization leave specific N isotopic signatures in Chinese cabbage and soil. Soil Biology and Biochemistry 38: 1682–1689.

Zweig, D.R., Morton, J.D., and Stewart, M.M. 1999. Source water quality for aquaculture: a guide for assessment. Environmentally and Socially Sustainable Development. Washington, D.C: The World Bank.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Srickland and Parson (1972) โดยเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันทีถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °ซ.

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายฟีนอล โดยการละลายฟีนอล 20 ก. ใน 95% เอทิลแอลกอฮอล์จนได้ปริมาตร 200 มล.

2. สารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ เตรียมโดยละลาย $Na_2[Fe(CN)_5NO].2H_2O$ 1 ก. ในน้ำ De-ionized ปริมาตร 200 มล. เก็บในขวดสีชา สารละลายดังกล่าวสามารถเก็บไว้ได้นานประมาณ 1 เดือน

3. สารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ซึ่งเตรียมโดยการผสมอัลคาไลน์รีเอเจนต์ (ละลายโซเดียมซิเทรต 100 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 ก. ในน้ำ D.I. ปริมาตร 500 มล.) กับสารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ (ใช้สารละลายไฮโปคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล) ในอัตราส่วน 100 มล. ต่อ 25 มล.

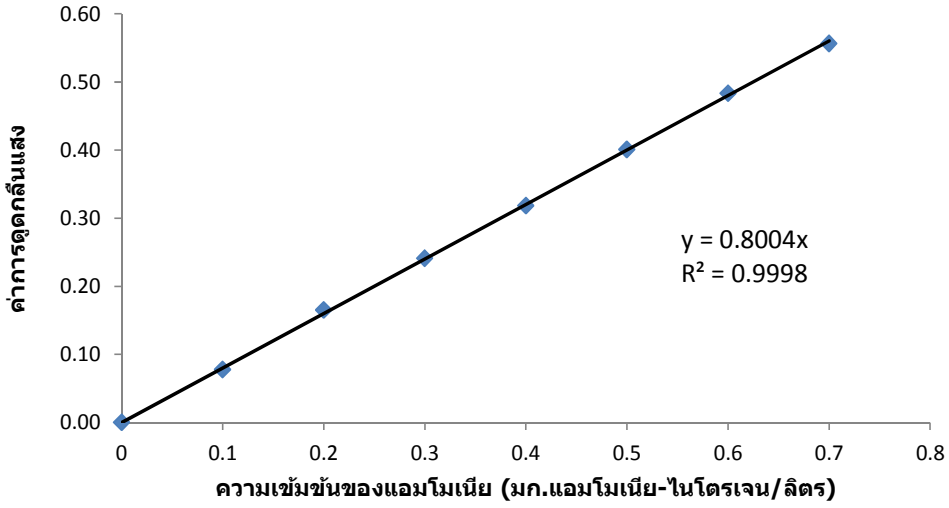
- *การเตรียม Ammonium stock solution* (ความเข้มข้น 500 มก. แอมโมเนียม-ไนโตรเจน/ล.)

ชั่ง NH_4Cl 0.1906 ก. ละลายด้วยน้ำกลั่น (De-ionized water) เจือจางเป็น 100 มล. เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายฟีนอลปริมาตร 0.2 มล. และสารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ปริมาตร 0.2 มล. ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ปริมาตร 0.5 มล. และปิดฝาหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้สารละลายกับน้ำตัวอย่างผสมเข้ากัน (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชม. หลังจากสารทำปฏิกิริยากันแล้วสีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะ

คงที่อยู่ภายในเวลา 24 ชม. สำหรับ Blank จะใช้น้ำกลั่น (De-ionized water) โดยใส่สารเคมีแบบเดียวกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร สำหรับสารละลายแอมโมเนียมาตรฐานเตรียมที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 มก.แอมโมเนียม-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมเข้มข้น (ความเข้มข้น 500 มก.แอมโมเนียม-ไนโตรเจน/ล.) ถ้าหากความเข้มข้นของปริมาณแอมโมเนียมที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทำกราฟมาตรฐานจำเป็นต้องทำการเจือจางปริมาตรน้ำเพื่อให้ค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่สามารถหาค่าได้จากกราฟมาตรฐาน การเจือจางปริมาตรน้ำตัวอย่างขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปริมาณแอมโมเนียที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในรูปภาคผนวก ก-1)



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย-ไนโตรเจน (Total ammonia concentration)

ก.2 วิธีวิเคราะห์ไนไทรต์-ไนโตรเจน

การวิเคราะห์ปริมาณไนไทรต์ในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์ไนไทรต์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Srickland and Parson (1972) โดยเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันทีถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °ซ.

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ เตรียมโดยละลายซัลฟานิลาไมด์ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มล. จากนั้นเติมน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล. เขย่าให้กันแล้วตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที

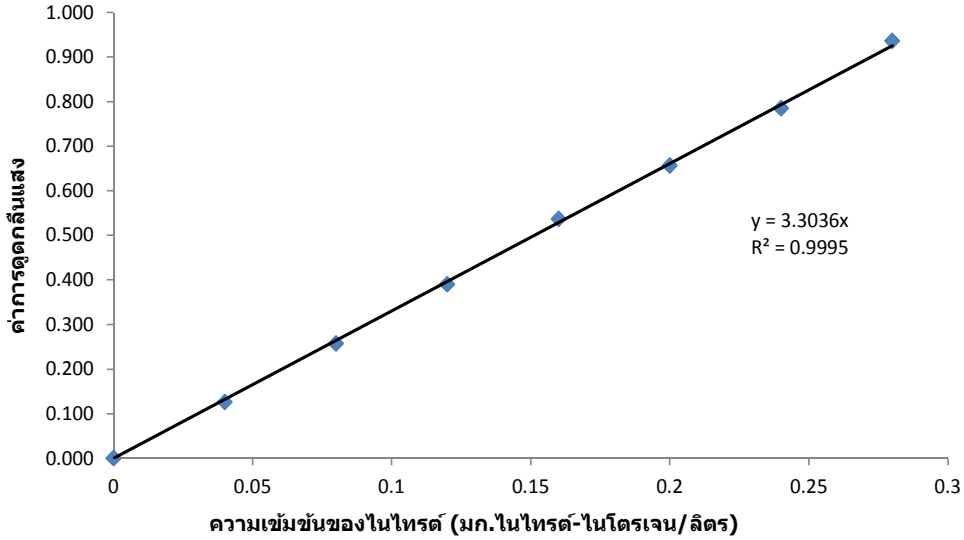
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยละลาย N-(1-Naphthy)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 ก. ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มล. เก็บในขวดสีชาและควรเตรียมใหม่ทุกเดือน

- *การเตรียม Nitrite stock solution* (ความเข้มข้น 500 มก. ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล.)

ชั่ง $NaNO_2$ 0.2463 ก. (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °ซ. เป็นเวลา 1 ชม.) ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มล. เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลองทำการเตรียมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. และเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. ปิดหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มแล้วนำไปปั่นและตั้งทิ้งไว้ 40 นาที (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร สำหรับสารละลายไนไทรต์มาตรฐานเตรียมที่ความเข้มข้น 0.04 0.08 0.12 0.16 0.20 0.24 และ 0.28 มก. ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานไนไทรต์เข้มข้น (ความเข้มข้น 500 มก. ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล.) ดังแสดงในรูปภาคผนวก ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนไทรต์-ไนโตรเจน (NO_2^--N)

ก.3 วิธีวิเคราะห์ไนเทรต-ไนโตรเจน

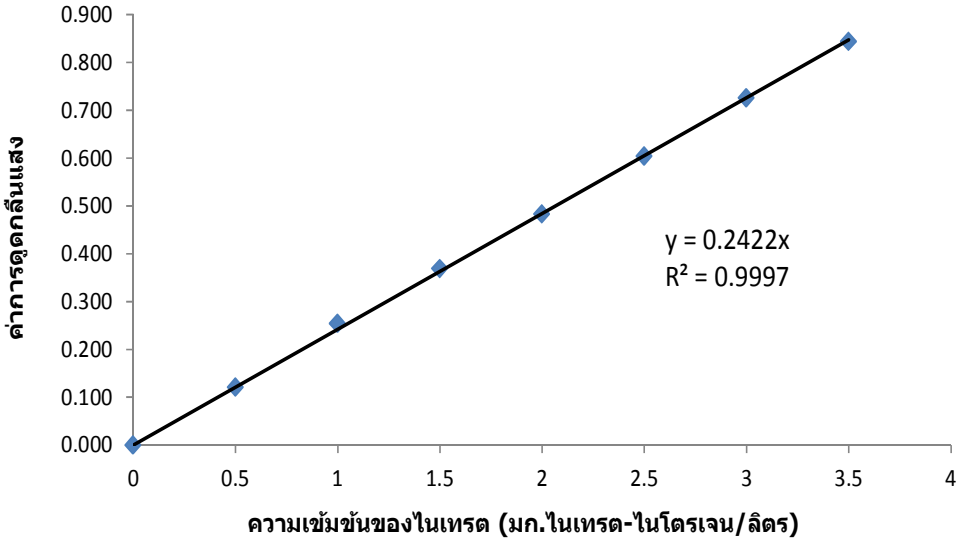
การวิเคราะห์ปริมาณไนเทรตในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (2005) โดยเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันทีถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °ซ.

- *การเตรียม Nitrate stock solution* (ความเข้มข้น 500 มก. ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล.)

ชั่ง KNO_3 0.3610 ก. (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °ซ. เป็นเวลา 24 ชม.) ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มล. เก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์ม 1 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเทรตในน้ำด้วยวิธีนี้โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank ซึ่งไม่มีการเติมสารเคมี สำหรับการวัดผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่นจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเทรตต่อไป ซึ่งค่าที่คำนวณได้ต้องลบด้วยปริมาณไนไทรต์ซึ่งวิเคราะห์มาจากน้ำตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนไทรต์รวมอยู่ด้วยทำให้ปริมาณไนเทรตที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง สำหรับสารละลายไนเทรตมาตรฐานเตรียมที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 มก. ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานไนเทรตเข้มข้น (ความเข้มข้น 500 มก. ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล.) ดังแสดงในภาคผนวก ก-3)



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเทรต-ไนโตรเจน (NO_3^--N)

ก.4 วิธีวิเคราะห์อนินทรีย์ฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์ปริมาณอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในน้ำด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (2005) โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันทีถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °ซ.

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดรท เตรียมโดยละลาย $[(NH_4)_6Mo_7O_{24}.H_2O]$ 15 ก. ด้วยน้ำกลั่น 500 มล. (เก็บในขวดพลาสติกห่างจากแสง สามารถเก็บไว้ได้ไม่มีกำหนด)

2. สารละลายกรดซัลฟิวริก ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 140 มล. ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 900 มล. (ควรเก็บไว้ในที่เย็นและเก็บไว้ในขวดแก้ว)

3. สารละลายกรดแอสคอบิค ละลายกรดแอสคอบิค (AR Grade) 27 ก. ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 500 มล. เก็บสารละลายไว้ในขวดพลาสติกนำไปแช่เย็น (สารละลายจะเก็บไว้ได้นานหลายเดือน แต่ไม่ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเกิน 1 สัปดาห์)

4. สารละลาย Potassium Antimonyl tartrate ละลาย Potassium Antimonyl tartrate 0.34 ก. ในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มล. (เก็บไว้ในขวดพลาสติกหรือขวดแก้วแช่เย็น สารละลายสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน)

5. Mixed reagent เตรียมการผสมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดรทปริมาตร 100 มล. สารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาตร 250 มล. สารละลายกรดแอสคอบิคปริมาตร 100 มล. และสารละลาย Potassium Antimonyl tartrateปริมาตร 50 มล. (ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้ ไม่สามารถเก็บสารได้นานเกิน 6 ชม. ปริมาตรดังกล่าวสามารถใช้ได้กับตัวอย่างน้ำจำนวน 50 ตัวอย่าง)

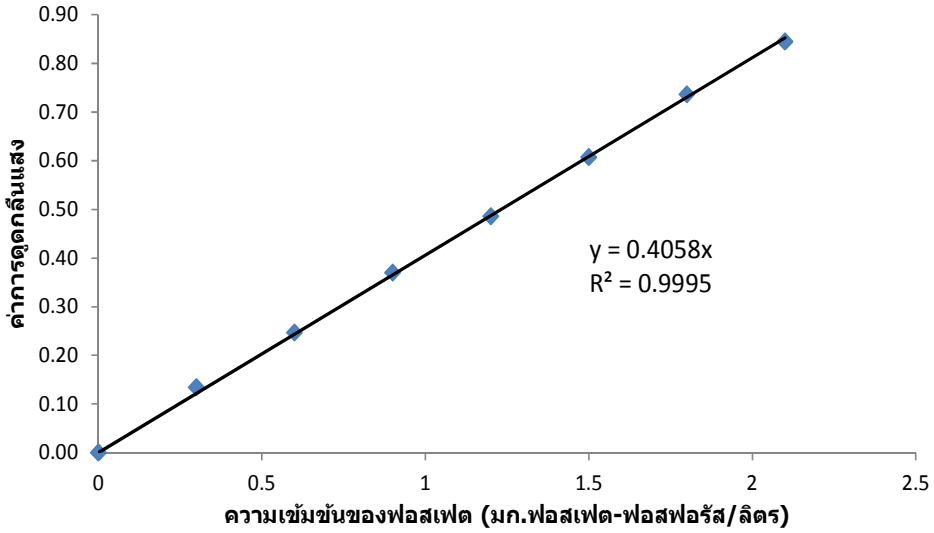
- *การเตรียม Phosphate stock solution* (ความเข้มข้น 500 มก. ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล.)

ชั่ง KH_2PO_4 (anhydrous potassium dihydrogen phosphate) 0.1110 ก. ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มล. เก็บไว้ในขวดสีชาและเก็บรักษาด้วยคลอโรฟอร์มปริมาตร 1 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลองแล้วเติม Mixed reagent ปริมาตร 0.5 มล. เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีแต่ไม่เกิน 2 ชม. (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร สำหรับสารละลายฟอสเฟต

มาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 และ 2.1 มก. ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานไนไทรต์เข้มข้น (ความเข้มข้น 500 มก. ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล.) ดังแสดงในภาคผนวก ก-4)



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (PO_4^{3-}-P)

ก.5 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารออกซิไดซ์ซิงคีรีเอเจนต์ เตรียมโดยละลาย Purified potassium peroxidisulphate ($K_2S_2O_8$) 5 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75 ก. ในน้ำ D.I. จากนั้นปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มล. และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องในขวดพลาสติกที่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม

2. บอเรตบัฟเฟอร์ เตรียมโดยละลายกรดบอริก (H_2BO_3) 15.45 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ก. ในน้ำ D.I. จากนั้นปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มล. และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องในขวดพลาสติกที่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำด้วยวิธีซึ่งดัดแปลงมาจาก Grassholf (1999) โดยการนำน้ำตัวอย่าง (ทั้งที่กรองและไม่ได้กรอง) ปริมาตร 2.5 มล. บรรจุในหลอดทดลอง จากนั้นเติมออกซิไดซ์ซิงคีรีเอเจนต์ปริมาณ 1.25 มล. ปิดฝาให้แน่นก่อนนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclaved) ที่อุณหภูมิ 121 °ซ. เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเติมบอเรตบัฟเฟอร์ ปริมาณ 0.25 มล. และนำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเวลา 15 นาที (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ละ 3 ซ้ำ) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ แล้วจึงวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์โดยวิธีการเดียวกับการวิเคราะห์ไนเทรตที่ความยาวคลื่นแสง 220 และ 275 นาโนเมตร ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ไม่ผ่านการกรองจะเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ส่วนตัวอย่างน้ำที่กรองจะเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด

ก.6 วิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 นอร์มัล โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ก. ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ล. เก็บไว้ในขวดพลาสติกปิดสนิท

2. สารออกซิไดซ์ซิงค์รีเอเจนต์ เตรียมโดยละลาย Purified potassium peroxidisulphate ($K_2S_2O_8$) 10 ก. และกรดบอริค (H_2BO_3) 6 ก. ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 นอร์มัล จำนวน 1 ล. เก็บรักษาสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทในสภาวะอุณหภูมิห้องโดยสามารถเก็บสารละลายไว้ได้เป็นระยะเวลา 7 วัน

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำด้วยวิธีซึ่งดัดแปลงมาจาก Grassholf (1999) โดยการนำน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 2.5 มล. บรรจุในหลอดทดลอง จากนั้นเติมออกซิไดซ์ซิงค์รีเอเจนต์ปริมาณ 0.5 มล. ปิดฝาให้แน่นก่อนนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclaved) ที่อุณหภูมิ 121 °ซ. เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเขย่าตัวอย่างให้ตะกอนขาวละลาย (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ แล้วจึงวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์โดยวิธีการเดียวกับการวิเคราะห์ฟอสเฟตที่ความยาวคลื่นแสง 885 นาโนเมตร

ก.7 วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (2005) โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันทีถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) แล้วแช่ที่อุณหภูมิ 4 °ซ.

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมตสำหรับการย่อยสลาย 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งน้ำหนักโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) (ซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 4.913 ก. แล้วละลายในน้ำกลั่น 500 มล. จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) 167 มล. และเติมเมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$) ตั้งทิ้งให้ละลายและเย็น จากนั้นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มล.

2. สารละลายกรดซัลฟิวริก โดยสามารถเตรียมได้โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 2500 ล. แล้วเติมซิงค์เวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 ก. ตั้งทิ้งไว้ 1 ถึง 2 วัน ให้ Ag_2SO_4ละลาย

3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยละลาย 1,10- ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต 1.485 ก. และเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4.7H_2O$) ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 มล.

4. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต เตรียมโดยบดโปตัสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต ($HOOC_6H_4COOK$) แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 °ซ. ชั่งน้ำหนัก 425 ก. ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับเป็น 1 ล. ($HOOC_6H_4COOK$ 1 ก. มี ซีโอดี 1.176 ก. ออกซิเจน และสารละลายนี้มีซีโอดี 500 มก./ล. ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง)

5. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 นอร์มัล ซึ่งเตรียมโดยการละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$] 39 ก. ในน้ำกลั่น จากนั้นเติม Conc. H_2SO_4 20 มล. ตั้งทิ้งให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ล. (หาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมตทุกครั้งการทดลอง)

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดแก้วทดลองแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมตสำหรับการย่อยสลาย ปริมาตร 3 มล. จากนั้นค่อยๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เกิดชั้นกรดบริเวณก้นหลอด ปิดปากขวดให้แน่นพอดี เขย่าเบาๆ เพื่อให้สารละลายผสมกันดี (ถ้าซีโอดีมากกว่า 500 มก./ล. ให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น) จากนั้นนำหลอดแก้วใส่ในขาตั้งหลอดแล้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 °ซ. เป็นระยะเวลา 2 ชม. แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจึงเติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1 - 2 หยด จากนั้นไตเตรตด้วย 0.10 นอร์มัล เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปคำนวณซีโอดีดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{นอร์มัลลิตีของสารละลาย FAS} = \frac{\text{ปริมาตรของ K2Cr2O7 0.1 N (มล.) x 0.10}}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไตเตรท (มล.)}}$$

$$\text{ซีโอดี} = \frac{(\text{A} - \text{B}) \text{ x N x } 8{,}000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

โดย

A = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทแบลงค์

B = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทน้ำตัวอย่าง

N = นอร์มัลลิตี้ของ FAS

ก.8 วิธีวิเคราะห์สภาพด่าง

วิธีวิเคราะห์สภาพด่างดัดแปลงมาจากวิธีของ ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุมน (2535) โดยการนำน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. ซึ่งมี pH probe จุ่มอยู่ จากนั้นนำมาไตเตรตกับสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมล/ล. จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรตจะนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาสภาพด่าง ดังนี้

$$\text{สภาพด่าง} = \frac{\text{ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ไตเตรต (มล.)} x\ 1{,}000\ x\ 0.01\left(\frac{\text{โมล}}{\text{ล}}.\right) x\ 2\ x50}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

ก.9 วิธีวิเคราะห์ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยวิธีการซึ่งอ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) ก่อนการทดลองต้องเตรียมกระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 มม. โดยการนำมาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรอง ซึ่งต้องจดปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่กรองไว้ จากนั้นนำกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 105 °ซ. เป็นเวลา 24 ชม. เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้อบจะนำมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระดาษกรองเย็นลง จากนั้นนำกระดาษกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ (มก./ล.) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{\text{นน. กระดาษกรองหลังกรองน้ำ} - \text{นน. กระดาษกรองก่อนกรองน้ำ x 10\^6}}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (มล.)}}$$

ก.10 วิธีวิเคราะห์รงควัตถุ

การวิเคราะห์รงควัตถุใช้วิธีการซึ่งดัดแปลงมาจาก Strickland และ Parson (1972) โดยการกรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกระดาษกรอง GF/C ขนาด 25 มม. จากนั้นนำแผ่นกระดาษกรองที่ได้ไปสกัดหารงควัตถุ (หากต้องการเก็บตัวอย่างไว้ให้พับแผ่นกระดาษกรองแล้วห่อด้วยกระดาษอลูมิเนียมแล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ –20°ซ ซึ่งสามารถเก็บตัวอย่างไว้ได้ 2 ถึง 3 สัปดาห์) การสกัดใช้วิธีการนำแผ่นกระดาษกรองแช่ลงในสารละลายอะซีโตน 90 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 5 มล. จากนั้นแช่เย็นไว้ที่อุณหภูมิ 4 °ซ เป็นเวลา 20 ชม. แล้วจึงนำแผ่นกระดาษกรองมาบดจนละเอียด เทสารละลายที่ได้กลับลงในหลอดทดลอง และปรับปริมาตรให้ได้ 5 มล. ด้วยสารละลายอะซีโตน90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำสารละลายมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำสารละลายส่วนใสมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 480 630 645 และ 665 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายอะซีโตน 90 เปอร์เซ็นต์ เป็น Blank ซึ่งการคำนวณหาปริมาณรงควัตถุใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{คลอโรฟิลล์เอ } (\text{มก./ลบ. ม.}) = \frac{[11.6(A-665) - 1.31(A-645) - 0.14(A-630)]x \text{ ปริมาตรอะซีโตน } (\text{มล.})}{\text{ปริมาตรน้ำกรอง } (\text{ล.}) \; x \text{ ความยาวของหลอดคิวเวตที่ใช้วัดตัวอย่าง } (\text{ซม.})}$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำจากการตรวจวัดในการทดลองที่ 4.1 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลอง ในการทดลองที่ 4.1.1 (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2 กก./ลบ.ม.)										
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไทรท์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเทรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ฟอสเฟต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
30/12/2553	0	1.45	0.35	0.12	0.13	0.03	0.98	0.00	0.11	0.01
31/12/2553	1	1.98	0.29	0.13	0.59	0.15	1.10	0.00	0.16	0.04
1/1/2554	2	3.42	0.22	0.11	1.62	0.01	1.57	0.00	0.21	0.05
2/1/2554	3	5.37	0.20	0.07	3.25	0.12	1.92	0.00	0.25	0.05
3/1/2554	4	7.71	0.22	0.17	5.15	0.83	2.35	0.00	0.35	0.05
4/1/2554	5	9.70	0.13	0.08	6.79	0.59	2.77	0.00	0.63	0.15
5/1/2554	6	8.98	0.06	0.02	5.91	0.50	3.01	0.00	0.51	0.03
6/1/2554	7	6.98	0.11	0.03	4.77	0.40	2.10	0.00	0.34	0.08
7/1/2554	8	9.13	0.08	0.02	5.92	0.66	3.12	0.00	0.45	0.09
8/1/2554	9	6.98	0.13	0.03	4.47	0.63	2.38	0.00	0.47	0.08
9/1/2554	10	9.08	0.06	0.01	5.36	1.05	3.66	0.00	0.53	0.11
11/1/2554	12	14.95	0.07	0.01	4.20	2.70	10.69	0.00	0.79	0.09
13/1/2554	14	18.53	0.06	0.01	2.68	2.21	15.79	0.00	1.01	0.47
15/1/2554	16	23.71	0.10	0.06	1.69	0.14	21.93	1.10	1.08	0.07
17/1/2554	18	28.76	0.10	0.05	1.00	0.17	27.66	0.46	1.29	0.19
19/1/2554	20	30.15	0.16	0.04	1.11	0.27	28.88	0.11	2.86	0.32
20/1/2554	21	34.43	0.22	0.02	1.00	0.31	33.20	0.26	3.30	0.44
21/1/2554	22	36.69	0.07	0.04	1.06	0.39	35.55	0.92	3.56	0.31
23/1/2554	24	43.35	0.17	0.05	0.77	0.27	42.41	2.26	4.15	0.23
25/1/2554	26	49.39	0.21	0.08	1.21	0.32	47.96	1.67	4.73	0.22
27/1/2554	28	55.43	0.19	0.15	1.31	0.26	53.93	0.87	5.28	0.15
28/1/2554	29	55.72	2.94	2.33	1.06	0.61	51.72	3.76	5.64	0.64
30/1/2554	31	72.47	4.82	2.21	0.71	0.72	66.94	0.00	7.34	0.48
1/2/2554	33	78.79	6.05	3.45	0.18	0.07	72.56	3.09	10.03	0.26
4/2/2554	36	91.02	9.91	2.57	0.63	0.16	80.48	4.85	10.81	0.42
6/2/2554	38	95.16	11.01	2.95	2.77	0.15	81.38	1.43	10.39	0.27
8/2/2554	40	109.71	15.99	2.72	2.03	0.22	91.68	5.02	11.59	1.34
9/2/2554	41	103.24	15.31	2.44	2.19	0.29	85.74	4.48	10.63	0.67
11/2/2554	43	126.45	25.11	3.10	1.04	0.14	100.31	5.70	11.84	0.90
13/2/2554	45	134.65	23.50	6.30	2.31	1.04	108.85	7.29	10.92	2.99
15/2/2554	47	148.95	30.89	6.38	1.34	0.37	116.72	7.02	11.71	2.54
17/2/2554	49	167.11	28.73	6.02	4.56	1.91	133.82	7.52	11.98	2.79
20/2/2554	52	179.61	6.28	3.66	2.06	1.81	171.27	13.22	11.39	1.69
23/2/2554	55	197.04	0.17	0.08	8.06	3.98	188.81	6.57	10.58	2.13
ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.)										
30/12/2553	0	1.24	0.24	0.02	0.06	0.01	0.94	0.02	0.08	0.02
31/12/2553	1	1.46	0.19	0.03	0.24	0.07	1.02	0.00	0.10	0.02
1/1/2554	2	1.84	0.06	0.03	0.64	0.02	1.14	0.03	0.12	0.02
2/1/2554	3	2.19	0.03	0.01	0.90	0.02	1.26	0.17	0.07	0.01
3/1/2554	4	2.76	0.03	0.01	1.22	0.09	1.50	0.02	0.08	0.02

ตารางที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลทุกชุดการทดลอง ในการทดลองที่ 4.1.1 (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (ต่อ)										
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไทรต์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเทรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ฟอสเฟต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
4/1/2554	5	3.21	0.02	0.01	1.35	0.11	1.83	0.01	0.09	0.02
5/1/2554	6	3.34	0.03	0.01	1.03	0.06	2.27	0.13	0.16	0.09
6/1/2554	7	2.66	0.04	0.00	0.84	0.34	1.78	0.00	0.08	0.01
7/1/2554	8	2.97	0.02	0.01	0.88	0.27	2.06	0.04	0.09	0.01
8/1/2554	9	2.69	0.05	0.01	0.54	0.20	2.10	0.00	0.19	0.02
9/1/2554	10	2.95	0.03	0.01	0.49	0.12	2.43	0.15	0.20	0.00
11/1/2554	12	6.61	0.03	0.00	0.32	0.31	6.25	0.27	0.34	0.08
13/1/2554	14	8.11	0.03	0.01	0.19	0.20	7.90	0.59	0.41	0.10
15/1/2554	16	10.89	0.04	0.02	0.11	0.06	10.74	0.82	0.23	0.03
17/1/2554	18	12.25	0.03	0.01	0.03	0.03	12.19	1.35	0.28	0.07
19/1/2554	20	12.22	0.06	0.01	0.09	0.04	12.07	1.37	0.64	0.16
20/1/2554	21	12.88	0.09	0.01	0.17	0.12	12.62	0.98	0.78	0.07
21/1/2554	22	15.12	0.03	0.01	0.15	0.08	14.94	1.14	0.76	0.14
23/1/2554	24	14.46	0.07	0.03	0.06	0.05	14.33	1.27	0.82	0.24
25/1/2554	26	17.55	0.08	0.04	0.16	0.09	17.31	0.64	0.92	0.12
27/1/2554	28	19.51	0.01	0.01	0.16	0.10	19.33	2.24	1.00	0.21
28/1/2554	29	18.05	0.05	0.03	0.21	0.10	17.79	4.19	0.71	0.23
30/1/2554	31	22.15	0.05	0.03	0.17	0.10	21.93	3.93	0.67	0.19
1/2/2554	33	20.33	0.10	0.11	0.17	0.08	20.06	5.01	0.58	0.34
4/2/2554	36	24.47	0.14	0.07	0.14	0.06	24.19	5.85	0.81	0.14
6/2/2554	38	26.60	0.02	0.01	0.27	0.09	26.31	4.30	0.63	0.24
8/2/2554	40	28.76	0.12	0.11	0.27	0.15	28.37	6.37	1.16	0.31
9/2/2554	41	28.10	0.14	0.12	0.25	0.11	27.72	6.09	1.02	0.37
11/2/2554	43	32.72	0.32	0.40	0.46	0.16	31.94	5.45	1.09	0.19
13/2/2554	45	37.37	0.17	0.23	0.34	0.37	36.86	5.82	0.71	0.33
15/2/2554	47	42.77	0.32	0.35	0.38	0.37	42.07	7.90	0.86	0.18
17/2/2554	49	44.69	0.29	0.26	0.45	0.42	43.96	8.28	0.85	0.26
20/2/2554	52	50.89	0.04	0.02	0.22	0.15	50.62	8.35	1.48	0.59
23/2/2554	55	57.17	0.07	0.06	0.23	0.16	56.87	10.07	1.48	0.71

ตารางที่ ข-2 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.1

คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง									
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/12/2553	0	7.03	0.06	120.00	0.00	7.37	0.06	27.27	0.12
1/1/2554	2	6.33	0.06	120.00	0.00	7.47	0.15	27.13	0.31
3/1/2554	4	6.40	0.10	133.33	5.77	7.37	0.06	26.97	0.31
5/1/2554	6	6.33	0.12	130.00	10.00	7.30	0.00	27.70	0.17
7/1/2554	8	6.30	0.00	130.00	0.00	7.30	0.00	27.43	0.21
9/1/2554	10	6.33	0.12	126.67	11.55	8.15	0.04	28.80	0.20
11/1/2554	12	6.33	0.06	123.33	5.77	8.14	0.04	28.70	0.20
13/1/2554	14	6.43	0.06	123.33	5.77	8.14	0.05	28.60	0.20

ตารางที่ ข-2 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.1 (ต่อ)

คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง									
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/1/2554	16	6.40	0.10	123.33	5.77	7.71	0.07	28.73	0.12
17/1/2554	18	6.43	0.06	120.00	0.00	7.70	0.05	28.67	0.15
19/1/2554	20	6.33	0.06	120.00	0.00	7.73	0.07	28.63	0.06
21/1/2554	22	6.47	0.06	120.00	0.00	7.72	0.07	25.00	0.00
23/1/2554	24	6.37	0.06	120.00	0.00	7.69	0.07	28.63	0.06
25/1/2554	26	6.47	0.06	113.33	5.77	7.02	0.26	29.30	0.17
27/1/2554	28	6.60	0.20	120.00	0.00	7.00	0.29	28.63	0.06
29/1/2554	30	6.73	0.21	110.00	0.00	6.70	0.38	28.40	0.10
31/1/2554	32	7.17	0.12	120.00	0.00	6.38	0.17	27.03	0.15
2/2/2554	34	7.27	0.17	120.00	0.00	6.32	0.16	27.60	0.95
9/2/2554	41	7.33	0.20	116.67	5.77	6.02	0.06	30.63	0.42
15/2/2554	47	7.41	0.23	103.33	5.77	5.99	0.30	31.53	0.40
18/2/2554	50	7.45	0.22	140.00	0.00	7.16	0.11	32.37	0.21
21/2/2554	53	7.56	0.11	173.33	11.55	7.86	0.17	31.63	0.42
24/2/2554	56	7.32	0.17	160.00	10.00	7.28	0.12	33.10	0.44
คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ									
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/12/2553	0	7.00	0.00	120.00	0.00	7.37	0.06	27.20	0.10
1/1/2554	2	6.40	0.00	120.00	0.00	7.53	0.12	27.07	0.15
3/1/2554	4	6.47	0.15	130.00	0.00	7.47	0.06	27.07	0.25
5/1/2554	6	6.33	0.06	133.33	5.77	7.60	0.00	27.87	0.06
7/1/2554	8	6.30	0.10	130.00	0.00	7.60	0.00	27.70	0.10
9/1/2554	10	6.33	0.06	133.33	15.28	8.36	0.02	28.90	0.35
11/1/2554	12	6.37	0.12	126.67	5.77	8.36	0.02	28.70	0.10
13/1/2554	14	6.33	0.15	126.67	5.77	8.36	0.01	28.63	0.06
15/1/2554	16	6.40	0.10	120.00	0.00	8.36	0.04	28.77	0.40
17/1/2554	18	6.33	0.12	120.00	0.00	8.36	0.05	28.70	0.44
19/1/2554	20	6.43	0.06	120.00	0.00	8.36	0.05	28.77	0.46
21/1/2554	22	6.40	0.10	120.00	0.00	8.34	0.05	25.00	0.00
23/1/2554	24	6.37	0.06	120.00	0.00	8.33	0.07	28.77	0.46
25/1/2554	26	6.40	0.10	120.00	0.00	8.36	0.05	29.13	0.21
27/1/2554	28	6.47	0.12	120.00	0.00	8.34	0.07	28.77	0.46
29/1/2554	30	6.97	0.29	120.00	0.00	8.32	0.06	28.30	0.20
31/1/2554	32	7.37	0.06	120.00	0.00	8.33	0.09	26.83	0.55
2/2/2554	34	7.88	0.03	120.00	0.00	8.33	0.10	26.93	0.55
9/2/2554	41	7.99	0.03	130.00	10.00	8.32	0.08	30.23	0.32
15/2/2554	47	8.10	0.06	110.00	0.00	8.03	0.12	30.97	0.29
18/2/2554	50	8.16	0.06	130.00	0.00	8.24	0.11	32.03	0.23
21/2/2554	53	8.32	0.09	213.33	5.77	8.46	0.06	31.13	0.21
24/2/2554	56	8.09	0.18	186.67	5.77	8.33	0.10	32.57	0.15

ตารางที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.2

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	หมายเหตุ
30/12/2553	0	2.33	0.33	
31/12/2553	1	5.56	0.84	
1/1/2554	2	6.44	0.84	
2/1/2554	3	9.44	0.19	
3/1/2554	4	21.11	3.56	
4/1/2554	5	36.22	2.50	
5/1/2554	6	52.22	7.90	
6/1/2554	7	41.33	4.58	
7/1/2554	8	44.33	3.18	
8/1/2554	9	33.00	6.03	
9/1/2554	10	60.22	9.67	
11/1/2554	12	64.22	9.53	
13/1/2554	14	102.44	15.91	
16/1/2554	17	110.00	7.29	
19/1/2554	20	135.56	14.44	
20/1/2554	21	151.11	21.20	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
20/1/2554	21	148.52	18.40	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
22/1/2554	23	143.56	5.05	
24/1/2554	25	204.00	14.11	
27/1/2554	28	247.78	6.74	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
27/1/2554	28	181.78	11.50	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
28/1/2554	29	244.44	7.70	
31/1/2554	32	266.67	29.06	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
31/1/2554	32	189.63	15.13	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
1/2/2554	33	229.63	21.58	
4/2/2554	36	257.04	20.16	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
4/2/2554	36	160.00	3.85	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
5/2/2554	37	240.00	17.36	
7/2/2554	39	262.96	6.42	
8/2/2554	40	322.22	8.01	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	264.44	20.00	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
9/2/2554	41	319.26	43.68	
11/2/2554	43	354.81	45.56	
14/2/2554	46	435.56	106.94	
17/2/2554	49	478.89	156.39	
23/2/2554	55	555.56	90.02	

ตารางที่ ข-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.2

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	หมายเหตุ
30/12/2553	0	2.22	0.38	
31/12/2553	1	2.67	0.88	
1/1/2554	2	3.22	0.38	
2/1/2554	3	4.56	0.51	
3/1/2554	4	7.67	1.00	
4/1/2554	5	9.22	1.02	
5/1/2554	6	21.89	0.51	
6/1/2554	7	16.33	1.20	
7/1/2554	8	16.67	5.61	
8/1/2554	9	10.11	2.80	
9/1/2554	10	27.11	3.85	
11/1/2554	12	25.56	2.52	
13/1/2554	14	45.56	2.34	
16/1/2554	17	36.67	2.94	
19/1/2554	20	53.33	1.11	
20/1/2554	21	58.89	2.94	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
20/1/2554	21	57.04	3.57	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
22/1/2554	23	55.11	8.68	
24/1/2554	25	84.44	7.58	
27/1/2554	28	110.56	1.92	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
27/1/2554	28	68.00	9.33	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
28/1/2554	29	78.33	7.64	
31/1/2554	32	105.19	18.90	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
31/1/2554	32	72.59	3.39	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
1/2/2554	33	71.85	15.61	
4/2/2554	36	105.93	13.02	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
4/2/2554	36	62.22	5.88	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
5/2/2554	37	83.41	15.63	
7/2/2554	39	101.48	6.42	
8/2/2554	40	131.85	6.79	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	102.22	11.11	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
9/2/2554	41	121.48	3.39	
11/2/2554	43	112.59	12.83	
14/2/2554	46	138.89	55.51	
17/2/2554	49	177.78	45.38	
23/2/2554	55	255.56	36.72	

ตารางที่ ข-5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.2

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ปริมาตรตะกอน (มล./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	หมายเหตุ
30/12/2553	0	#DIV/0!	#DIV/0!	
1/1/2554	2	0.05	0.00	
3/1/2554	4	0.08	0.00	
5/1/2554	6	0.68	0.02	
7/1/2554	8	0.36	0.02	
9/1/2554	10	0.36	0.07	
11/1/2554	12	0.93	0.14	
13/1/2554	14	1.42	0.23	
16/1/2554	17	2.08	0.52	
19/1/2554	20	3.40	1.17	
20/1/2554	21	2.39	0.25	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
22/1/2554	23	2.78	0.51	
25/1/2554	26	3.89	0.82	
27/1/2554	28	4.67	0.60	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
27/1/2554	28	1.19	0.60	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
30/1/2554	31	2.17	0.88	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
31/1/2554	32	1.54	0.39	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
2/2/2554	34	2.44	0.48	
4/2/2554	36	3.06	0.92	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
4/2/2554	36	1.42	0.37	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	6.56	1.35	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	2.28	0.35	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
11/2/2554	43	6.00	1.44	
14/2/2554	46	10.74	9.39	
17/2/2554	49	18.39	13.55	
23/2/2554	55	38.89	19.53	

ตารางที่ ข-6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.2

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ปริมาตรตะกอน (มล./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	หมายเหตุ
30/12/2553	0	#DIV/0!	#DIV/0!	
1/1/2554	2	#DIV/0!	#DIV/0!	
3/1/2554	4	#DIV/0!	#DIV/0!	
5/1/2554	6	0.26	0.02	
7/1/2554	8	0.22	0.02	
9/1/2554	10	0.16	0.02	
11/1/2554	12	0.28	0.05	

ตารางที่ ข-6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) จากการทดลองที่ 4.1.2 (ต่อ)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ปริมาตรตะกอน (มล./ล.)	ค่าเปรียบเทียบมาตรฐาน	หมายเหตุ
13/1/2554	14	0.39	0.14	
16/1/2554	17	0.72	0.13	
19/1/2554	20	1.26	0.16	
20/1/2554	21	0.79	0.33	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
22/1/2554	23	0.97	0.32	
25/1/2554	26	1.54	0.71	
27/1/2554	28	1.81	1.04	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
27/1/2554	28	0.10	0.00	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
30/1/2554	31	0.52	0.22	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
31/1/2554	32	0.29	0.27	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
2/2/2554	34	0.97	0.35	
4/2/2554	36	1.56	0.38	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
4/2/2554	36	0.26	0.24	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	4.06	0.77	ก่อนนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
8/2/2554	40	0.67	0.30	หลังนำตะกอนออกจากระบบ ร้อยละ 50
11/2/2554	43	4.22	1.11	
14/2/2554	46	3.33	2.91	
17/2/2554	49	7.56	3.86	
23/2/2554	55	23.33	1.67	

ตารางที่ ข-7 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	น.น. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น.น. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น.น. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น.น. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น.น. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	2.3	5.5	3.1	5.5	2.7	5.8	3.1	6.5	5.4	7.5
2	2.4	5.0	2.6	5.0	5.9	7.6	6.2	7.9	3.6	5.9
3	2.5	5.6	3.0	5.5	5.2	7.4	5.6	7.5	6.6	8.0
4	2.6	5.5	2.6	5.4	5.8	7.4	5.9	7.6	9.2	8.6
5	2.3	5.4	3.4	6.4	2.7	5.9	3.4	6.2	4.6	6.8
6	2.5	6.0	3.0	5.7	2.0	5.9	2.5	6.3	5.5	7.0
7	2.5	5.5	3.0	6.0	3.6	6.4	4.2	6.5	8.9	6.5
8	2.4	5.5	3.4	6.2	5.3	6.5	4.5	6.6	4.8	7.6
9	2.4	5.5	2.6	5.0	3.9	6.7	4.2	6.9	6.8	7.9
10	2.4	5.4	3.5	6.3	4.6	7.4	4.5	7.6	7.7	7.0
11	2.5	5.6	3.1	5.5	5.8	5.5	5.6	5.6	5.1	7.9
12	2.6	5.5	3.5	6.0	2.6	6.5	4.2	6.7	6.8	7.5
13	2.8	5.6	3.5	6.4	4.6	7.0	3.8	7.3	6.4	6.9
14	2.8	5.7	3.0	6.2	5.4	5.9	5.6	6.3	5.8	7.2
15	2.8	5.5	2.6	5.7	3.8	6.5	4.1	6.8	5.5	9.0
16	2.7	5.4	3.6	6.2	4.6	6.3	4.3	6.5	11.4	6.2
17	2.5	5.7	2.9	5.0	3.8	5.8	3.7	6.3	3.4	6.0

ตารางที่ ข-7 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1) (ต่อ)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
18	2.6	5.6	2.6	5.5	3.8	6.6	4.3	6.8	4.2	8.0
19	2.6	5.5	2.5	5.5	4.3	7.0	4.5	7.5	7.7	7.3
20	2.6	5.5	3.2	6.5	5.8	6.1	5.9	6.6	6.3	6.0
21	2.9	5.3	2.8	5.7	3.6	7.3	3.7	7.5	3.4	7.2
22	2.3	5.4	3.4	6.0	5.3	6.0	5.5	6.5	6.0	7.3
23	2.4	5.4	2.7	6.0	4.2	6.8	4.6	6.9	6.2	5.7
24	2.5	5.5	3.2	6.0	4.7	6.5	4.9	6.6	3.2	8.4
25	2.6	5.2	3.4	6.5	3.2	5.0	3.4	5.5	8.1	6.9
26	2.6	5.3	2.8	5.5	2.4	5.9	2.9	5.6	5.1	7.2
27	2.7	5.4	3.1	6.0	2.7	6.8	2.8	6.9	5.7	5.8
28	2.6	5.3	3.4	6.4	3.8	7.4	3.9	7.8	2.8	6.0
29	2.6	5.4	2.8	5.4	5.6	7.7	5.8	7.6	3.7	8.5
30	2.7	5.2	2.6	5.4	7.8	5.3	8.2	5.8	9.5	8.3
31	2.5	5.3	3.5	6.4	2.8	5.8	3.3	5.9	8.8	6.4
32	2.6	5.3	2.6	5.1	3.2	6.4	3.1	6.9	3.0	6.0
ค่าเฉลี่ย	**2.56**	**5.45**	**3.03**	**5.81**	**4.23**	**6.47**	**4.44**	**6.73**	**5.98**	**7.14**
SD	**0.15**	**0.18**	**0.35**	**0.47**	**1.32**	**0.71**	**1.23**	**0.67**	**2.36**	**0.92**

ตารางที่ ข-8 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	6.7	7.1	14.1	9.5	16.3	11.4	19.8	12.7
2	8.3	8.2	8.3	8.1	10.3	8.9	13.4	10.3
3	12.5	9.9	3.1	6.1	4.2	7.2	6.8	9.3
4	7.6	7.5	11.4	9.0	13.5	10.1	16.7	12.3
5	5.2	6.8	16.6	9.5	18.4	10.4	21.3	11.8
6	6.9	7.9	4.9	6.6	5.8	7.4	8.2	9.8
7	11.3	9.4	7.6	7.9	9.3	8.3	13.2	9.6
8	6.8	7.9	9.0	8.2	10.3	9.1	13.4	10.5
9	10.1	8.5	8.5	7.3	10.5	7.9	14.3	9.2
10	3.3	6.2	13.3	10.2	15.4	11.3	13.2	13.2
11	7.4	7.9	14.4	8.6	16.7	9.2	17.9	11.1
12	3.9	6.3	20.5	10.4	21.5	10.9	25.5	12.3
13	7.4	7.6	9.9	8.7	11.5	9.4	14.2	11.5
14	7.9	8.1	9.9	8.1	11.7	8.9	14.2	10.3
15	9.1	8.5	3.1	5.9	5.3	6.2	7.8	8.4
16	7.5	8.0	9.0	8.0	11.2	8.6	14.5	9.8
17	7.8	7.5	10.9	8.8	13.2	9.3	16.1	10.5
18	5.9	7.1	13.0	9.0	15.3	9.6	18.5	11.3
19	13.1	9.3	9.5	8.2	11.7	8.9	14.2	10.3
20	6.5	7.1	10.6	8.9	13.2	9.4	16.4	10.9
21	8.4	8.4	5.1	7.1	6.9	7.8	8.7	9.3
22	6.6	7.8	16.4	10.0	18.7	10.7	22.2	12.3
23	7.8	7.9	6.4	7.2	8.3	7.8	10.4	9.7

ตารางที่ ข-8 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1) (ต่อ)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
24	11.9	8.8	7.7	7.9	9.6	8.4	14.2	10.2
25	10.8	8.9	10.6	8.4	13.2	8.9	16.7	10.3
26	15.9	10.0	4.7	6.8	6.8	7.5	9.1	9.7
27	2.7	5.7	3.3	5.8	5.2	6.3	7.8	8.2
28	8.3	8.4	9.9	9.0	11.4	9.7	14.6	11.3
29	3.9	6.5	10.6	8.6	12.7	9.4	14.8	11.2
30	2.3	5.7	3.1	6.2	3.9	6.7	6.4	7.8
31	2.7	5.7	10.7	8.9	16.2	9.5	18.9	11.2
32	4.8	6.4	8.9	8.5	8.4	9.1	11.4	11.3
ค่าเฉลี่ย	**7.52**	**7.72**	**9.53**	**8.17**	**11.46**	**8.88**	**14.21**	**10.55**
SD	**3.23**	**1.17**	**4.20**	**1.23**	**4.45**	**1.34**	**4.63**	**1.30**

ตารางที่ ข-9 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	2.4	5.4	3.0	5.9	2.8	6.0	3.1	6.4	5.8	7.5
2	2.3	5.5	3.1	5.8	2.6	5.1	2.9	5.4	7.2	6.0
3	2.7	5.1	2.4	5.4	7.5	7.9	7.7	8.3	5.2	6.9
4	2.7	5.2	3.4	6.0	]6.1	7.2	6.3	7.5	5.5	7.2
5	2.8	5.3	3.2	6.0	4.8	6.9	4.9	7.3	5.5	7.4
6	2.8	5.4	3.3	6.0	3.8	6.2	3.5	6.4	5.3	7.4
7	2.6	5.6	2.8	5.7	4.6	6.3	3.7	6.7	5.2	6.9
8	2.5	5.3	2.4	5.5	4.1	6.3	4.7	6.5	5.6	7.2
9	2.9	5.3	3.2	5.4	2.4	5.7	3.1	6.3	6.5	7.2
10	2.7	5.2	3.3	5.5	4.7	6.7	4.9	6.9	7.1	7.2
11	2.9	5.2	2.7	5.6	5.4	7.0	5.3	7.4	5.5	6.9
12	2.4	5.3	2.5	5.5	3.5	6.0	3.9	6.3	3.1	6.1
13	2.5	5.4	2.5	5.6	3.1	5.9	3.4	6.3	3.2	6.0
14	2.4	5.5	2.2	5.7	2.7	5.4	3.7	6.2	6.8	7.4
15	2.3	5.6	2.6	5.6	4.3	6.6	2.6	6.9	12.9	9.0
16	2.7	5.7	2.8	5.8	2.4	5.4	2.8	5.7	4.9	6.9
17	2.5	5.2	2.2	5.0	2.9	6.4	3.3	6.7	3.2	5.5
18	2.4	5.3	2.7	5.4	3.7	6.5	3.8	6.8	7.5	7.8
19	2.4	5.3	2.6	5.6	3.4	5.4	3.5	5.8	3.2	6.0
20	2.5	5.4	3.1	5.8	5.7	7.0	6.1	7.5	3.6	6.4
21	2.5	5.5	2.7	5.4	2.6	5.9	3.2	6.3	3.7	6.5
22	2.4	5.2	3.1	5.8	3.4	6.4	3.5	6.5	4.0	8.2
23	2.3	5.1	3.1	5.5	3.9	5.9	4.1	6.4	7.1	7.6
24	2.2	5.2	2.6	5.0	3.7	7.0	3.6	7.4	3.6	6.0
25	2.6	5.3	2.4	5.0	3.1	5.9	3.9	6.3	4.8	6.7
26	2.7	5.3	2.8	5.4	3.7	6.0	4.1	6.4	5.2	6.7
27	2.5	5.4	2.4	5.2	3.5	6.2	4.1	6.5	2.8	5.8
28	2.4	5.2	2.2	5.2	2.2	5.2	2.5	5.7	3.0	5.8
29	2.7	5.1	2.2	5.0	3.9	6.3	4.1	6.5	3.5	5.9

ตารางที่ ข-9 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2) (ต่อ)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
30	2.6	5.3	2.8	5.6	2.9	6.1	3.3	6.5	10.5	8.5
31	2.4	5.3	2.5	5.4	5.1	6.9	5.5	7.4	4.1	6.5
32	2.5	5.2	2.8	5.6	3.4	6.0	3.6	6.4	3.8	5.9
ค่าเฉลี่ย	**2.54**	**5.32**	**2.74**	**5.53**	**3.81**	**6.24**	**4.02**	**6.61**	**5.28**	**6.84**
SD	**0.18**	**0.15**	**0.36**	**0.29**	**1.20**	**0.63**	**1.15**	**0.61**	**2.21**	**0.85**

ตารางที่ ข-10 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	3.3	6.5	11.2	9.0	13.6	9.5	16.4	11.6
2	6.4	7.6	9.2	8.4	11.4	8.6	13.5	10.3
3	4.9	6.5	6.8	7.6	8.2	8.3	10.4	10.6
4	8.0	8.0	24.2	10.4	26.3	10.8	29.5	12.4
5	10.2	8.8	8.4	8.1	9.9	9.3	13.2	11.4
6	9.3	8.2	14.6	8.9	16.5	9.6	19.5	11.7
7	6.3	7.7	5.7	7.0	8.3	7.5	11.2	9.3
8	5.8	7.5	11.9	8.6	13.5	9.2	16.4	11.2
9	6.4	7.2	7.4	7.6	9.5	8.3	11.3	10.2
10	6.1	7.5	5.4	6.8	7.2	7.4	10.3	9.5
11	4.0	6.6	4.9	6.9	5.8	7.4	8.9	9.7
12	4.7	6.5	7.1	7.4	8.9	7.8	11.2	9.9
13	9.2	8.7	10.1	8.3	13.2	8.8	16.3	10.2
14	4.9	7.7	10.6	8.6	14.1	9.3	16.6	12.1
15	4.0	6.7	5.8	7.0	6.4	7.4	8.6	9.6
16	7.1	7.9	8.2	7.9	10.4	8.5	13.3	10.2
17	7.4	10.5	10.3	8.5	12.5	9.3	14.6	11.4
18	10.2	8.6	7.5	8.1	9.6	8.7	11.5	10.3
19	4.6	6.7	8.6	8.2	10.4	8.6	13.2	10.4
20	8.3	8.1	13.2	8.9	16.3	9.5	18.7	11.3
21	7.6	8.3	5.8	7.0	9.4	7.6	11.4	9.6
22	13.1	9.4	5.4	7.0	7.3	7.6	9.6	9.8
23	7.8	7.9	4.5	6.9	6.6	7.5	8.8	9.8
24	4.6	6.3	3.6	6.2	5.9	6.8	7.1	8.9
25	6.4	7.2	17.1	10.2	19.3	10.7	21.4	12.4
26	3.7	6.5	4.6	6.8	6.7	7.5	8.5	9.8
27	3.6	6.2	10.3	8.9	12.4	9.4	14.3	12.3
28	5.1	7.1	6.1	7.0	8.3	7.4	10.1	9.5
29	3.2	6.2	8.0	8.1	10.5	8.7	12.2	10.4
30	6.9	7.9	7.9	8.0	9.8	8.5	12.3	10.2
31	3.4	6.6	4.8	6.9	6.4	7.3	8.2	9.7
32	3.7	6.8	4.2	6.1	6.1	6.7	9.3	7.2
ค่าเฉลี่ย	**6.26**	**7.50**	**8.54**	**7.85**	**10.65**	**8.42**	**13.06**	**10.40**
SD	**2.41**	**1.01**	**4.28**	**1.04**	**4.44**	**1.05**	**4.63**	**1.14**

ตารางที่ ข-11 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	1.7	4.7	1.8	4.5	2.2	5.4	2.5	5.8	3.0	5.9
2	1.9	4.8	1.9	5.0	2.8	5.8	3.2	5.9	3.6	6.4
3	2.0	4.3	2.4	5.5	4.0	6.3	4.2	6.5	2.0	5.2
4	1.9	4.4	2.0	5.0	1.7	5.0	2.2	5.6	1.6	5.0
5	2.0	4.5	1.7	4.8	2.3	5.0	2.5	5.4	9.2	8.0
6	1.7	4.3	1.7	4.8	2.4	5.1	2.6	5.3	6.5	7.4
7	2.0	4.5	2.6	5.6	1.8	5.2	2.9	5.7	4.2	6.5
8	1.9	4.6	2.5	5.5	2.6	5.5	2.1	5.6	2.1	5.1
9	1.9	4.2	1.7	4.5	3.9	4.9	4.3	5.4	4.8	7.0
10	1.8	4.1	2.1	4.8	2.8	6.0	2.7	6.7	4.9	7.2
11	1.8	4.8	2.1	5.1	2.4	5.7	2.6	5.4	3.8	6.2
12	2.0	4.9	1.9	5.0	2.5	5.5	2.9	5.6	4.9	6.9
13	2.3	5.2	2.0	5.2	2.1	5.2	2.5	5.3	3.7	6.3
14	1.8	5.4	1.6	4.5	6.3	7.5	5.5	7.9	4.3	6.4
15	1.9	5.2	1.9	5.0	4.2	6.1	6.7	6.4	2.4	5.4
16	1.8	5.1	1.7	4.6	3.1	5.7	3.4	6.0	3.0	5.8
17	1.7	5.2	1.6	4.6	3.5	6.5	3.3	6.7	6.8	7.5
18	1.7	4.7	1.6	4.6	3.2	6.5	3.4	6.8	5.2	7.0
19	1.6	4.8	2.4	5.0	2.3	5.9	3.1	6.2	2.1	5.5
20	1.6	4.2	2.3	5.0	4.8	5.4	2.4	5.7	2.2	5.2
21	1.5	5.4	2.4	5.2	4.9	5.4	4.8	5.7	5.6	6.9
22	1.7	4.6	2.5	5.1	2.7	5.4	3.1	5.6	4.1	6.3
23	1.9	4.7	1.8	4.9	2.6	5.8	3.2	5.9	3.0	5.8
24	2.0	4.6	1.6	4.5	4.1	6.5	4.3	6.9	1.8	5.2
25	2.1	4.7	1.6	4.8	1.7	5.0	2.3	5.6	3.7	6.0
26	2.1	4.9	2.4	5.4	1.8	5.0	2.1	5.3	3.2	6.2
27	1.9	4.6	2.2	5.2	2.9	5.9	3.3	6.4	3.5	6.2
28	1.6	4.5	2.2	5.0	1.7	4.9	2.1	5.4	2.1	5.2
29	1.7	4.6	1.6	4.8	3.1	6.0	3.2	6.4	2.2	5.3
30	1.8	4.7	2.4	5.2	3.4	6.1	3.5	6.4	3.6	6.2
31	1.9	4.9	1.9	5.1	2.5	5.5	3.1	5.7	6.6	7.4
32	1.6	4.8	1.8	4.6	3.2	6.0	3.6	6.7	2.2	5.4
33	1.7	4.9	1.8	4.6	2.9	5.7	3.2	5.3	1.7	4.9
34	1.8	4.6	1.8	5.0	2.6	5.9	3.1	5.8	4.2	6.7
35	1.9	4.4	1.6	5.0	2.7	5.9	3.1	6.1	2.2	5.4
36	1.9	4.4	2.1	5.0	3.1	6.0	3.3	6.2	3.2	6.1
37	1.9	4.5	1.6	5.0	2.1	5.6	2.4	6.1	2.1	5.5
38	1.8	4.5	1.7	4.5	2.3	5.4	2.3	5.7	1.7	4.9
39	1.7	4.3	1.6	5.0	2.7	5.2	2.8	5.4	2.1	5.3
40	1.7	4.4	1.5	4.5	1.6	4.5	2.3	4.9	4.4	6.4
41	1.6	4.4	1.8	5.0	2.1	5.5	2.5	5.7	2.2	5.0
42	1.6	4.5	2.2	5.0	1.9	5.0	2.1	5.3	1.7	4.9
43	1.8	4.7	2.4	5.4	2.1	5.4	2.3	5.5	3.4	6.8
44	1.9	4.6	2.0	5.0	1.8	4.5	2.3	5.3	3.5	6.4
45	1.8	4.5	1.6	4.5	1.7	4.5	2.1	5.2	2.9	5.5
ค่าเฉลี่ย	**1.82**	**4.66**	**1.95**	**4.93**	**2.78**	**5.57**	**3.05**	**5.88**	**3.49**	**6.04**
SD	**0.16**	**0.31**	**0.32**	**0.30**	**0.98**	**0.59**	**0.94**	**0.59**	**1.63**	**0.82**

ตารางที่ ข-12 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 2.0 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	3.9	6.2	10.3	8.5	12.5	8.9	15.3	10.3
2	7.6	7.9	7.2	7.5	9.6	8.1	13.2	10.4
3	9.2	7.8	9.6	8.4	11.4	8.8	13.7	10.6
4	3.7	6.2	6.8	7.5	8.2	7.9	10.4	9.8
5	6.0	7.4	4.9	7.0	6.3	7.5	8.5	10.2
6	2.9	6.0	13.1	8.8	16.3	9.5	18.5	13.2
7	6.7	7.8	17.7	10.0	19.3	10.6	21.7	12.1
8	2.4	5.5	8.3	8.0	10.1	8.6	12.3	10.2
9	12.3	9.1	2.3	5.2	5.2	5.9	7.8	7.5
10	1.8	4.9	9.2	8.1	11.5	8.6	14.3	10.2
11	3.4	6.3	12.4	8.9	14.1	9.6	16.3	10.8
12	4.2	6.9	10.5	8.1	12.1	8.6	14.3	10.3
13	2.4	5.4	5.6	7.1	7.3	7.6	9.6	9.6
14	9.2	8.5	3.9	6.1	6.2	6.7	8.4	8.3
15	5.0	7.0	5.4	7.7	7.3	8.5	9.4	10.5
16	2.3	5.7	4.2	6.9	6.4	7.6	8.5	9.7
17	2.6	7.2	6.9	7.9	9.4	7.5	12.1	9.3
18	2.2	6.5	3.0	5.7	5.2	6.4	7.3	8.3
19	2.8	6.9	9.2	8.4	11.5	8.8	14.4	10.2
20	4.8	7.9	9.9	8.6	11.6	9.5	13.6	11.5
21	5.5	6.6	6.9	7.1	8.2	7.6	10.4	9.5
22	4.5	7.3	7.2	7.6	8.7	8.5	10.6	10.3
23	5.7	8.6	4.0	6.3	6.2	6.9	8.4	8.5
24	7.1	6.7	4.0	6.2	6.4	6.8	8.6	9.2
25	5.2	7.4	2.5	5.6	4.7	6.4	7.4	8.5
26	5.9	7.6	8.6	8.3	10.3	9.3	12.3	11.4
27	9.3	6.9	3.5	6.1	5.8	6.9	7.5	8.4
28	4.9	7.3	2.3	5.5	5.2	6.3	7.6	8.8
29	6.4	6.9	8.2	8.0	10.4	8.5	12.7	10.2
30	7.9	6.9	2.3	5.0	4.2	5.6	6.5	8.2
31	4.8	5.6	2.7	5.7	4.9	6.3	7.3	8.5
32	6.1	5.7	13.1	8.7	16.3	9.4	18.6	11.3
33	5.1	5.3	7.7	7.9	9.4	8.6	11.4	10.6
34	2.8	5.9	8.2	8.0	10.4	8.6	13.2	10.8
35	4.3	6.4	3.9	6.1	5.8	6.8	7.7	8.7
36	2.3	6.4	6.3	7.0	8.4	7.6	10.1	9.6
37	2.7	5.5	3.8	6.5	5.9	7.3	7.8	9.7
38	3.4	5.7	3.9	6.7	6.1	7.4	8.4	9.6
39	2.7	6.1	6.2	7.1	8.2	7.8	10.4	9.7
40	2.8	5.9	3.7	6.1	4.9	6.7	6.4	8.4
41	1.8	6.0	5.8	7.1	8.2	7.8	10.2	9.9
42	1.9	4.8	4.1	6.1	6.5	6.8	8.4	8.8
43	2.1	5.0	2.6	5.6	4.8	6.4	6.2	9.2
44	2.9	5.0	2.7	5.7	4.6	6.3	6.4	8.6
45	5.1	5.6	2.1	5.1	4.2	5.8	6.3	8.1
ค่าเฉลี่ย	**4.64**	**6.54**	**6.37**	**7.10**	**8.45**	**7.72**	**10.68**	**9.72**
SD	**2.40**	**1.04**	**3.53**	**1.21**	**3.53**	**1.19**	**3.66**	**1.17**

ตารางที่ ข-13 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	2.1	4.6	1.8	5.0	2.6	6.2	2.3	6.4	2.8	5.6
2	1.8	4.7	1.7	5.1	3.9	6.5	2.9	6.7	3.4	6.1
3	1.6	4.8	2.1	5.0	2.4	5.5	4.2	5.7	4.8	6.6
4	1.7	4.6	1.6	4.8	3.0	6.0	3.5	6.3	4.3	6.2
5	1.7	5.1	2.2	5.5	4.1	6.5	3.7	6.8	2.7	5.6
6	1.8	5.2	2.2	5.5	1.8	5.0	2.1	5.3	3.8	6.3
7	1.8	4.8	2.4	5.2	2.3	5.6	2.4	5.8	7.2	7.8
8	1.9	4.9	2.2	5.0	2.9	5.9	3.3	6.3	6.1	7.1
9	1.9	4.9	2.3	5.0	2.1	5.4	2.3	5.7	1.8	5.1
10	1.7	4.8	1.8	4.8	2.7	5.3	2.9	5.6	3.9	6.5
11	1.9	4.7	2.4	5.4	2.6	5.5	2.7	5.9	2.4	5.2
ค่าเฉลี่ย	**1.81**	**4.83**	**2.03**	**5.12**	**2.76**	**5.76**	**2.94**	**6.05**	**3.93**	**6.19**
SD	**0.14**	**0.19**	**0.29**	**0.25**	**0.70**	**0.49**	**0.67**	**0.48**	**1.62**	**0.81**

ตารางที่ ข-14 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 1)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	9.2	8.3	2.9	5.4	5.1	6.2	7.3	8.4
2	6.0	7.9	6.9	7.2	7.9	7.8	9.7	9.5
3	6.4	7.7	6.3	7.3	8.4	7.8	9.9	9.7
4	2.8	5.8	11.5	8.7	13.4	9.3	14.8	11.2
5	4.9	6.9	5.1	7.0	7.3	7.5	10.2	8.6
6	5.1	7.2	7.2	7.7	7.5	8.3	9.6	10.3
7	4.6	6.7	4.4	6.7	6.9	7.4	8.4	8.7
8	3.7	6.8	2.4	5.2	4.5	5.9	6.5	7.3
9	3.1	5.7	5.9	7.4	7.4	8.2	8.9	9.6
10	2.4	5.3	2.8	5.9	6.4	6.6	8.5	7.9
11	2.7	5.5	3.2	5.9	5.2	6.8	7.2	7.8
ค่าเฉลี่ย	**4.63**	**6.71**	**5.33**	**6.76**	**7.27**	**7.44**	**9.18**	**9.00**
SD	**2.04**	**1.03**	**2.68**	**1.07**	**2.38**	**1.00**	**2.22**	**1.17**

ตารางที่ ข-15 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	2.6	5.3	3.1	5.8	4.9	7.0	5.3	7.4	3.8	6.6
2	2.4	5.3	2.4	5.5	2.9	5.9	3.3	6.3	7.8	8.2
3	2.4	5.1	2.9	5.6	5.3	7.0	4.9	7.4	4.2	6.6
4	2.5	5.2	3.0	5.6	3.4	6.0	3.7	6.3	4.3	6.2
5	2.4	5.1	3.2	5.6	2.5	5.3	2.7	5.6	7.1	8.0
6	2.4	4.8	2.7	5.4	2.8	5.4	2.9	5.8	6.4	8.0

ตารางที่ ข-15 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2) (ต่อ)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)
7	2.4	4.9	2.1	5.0	4.2	6.3	5.3	6.4	4.1	6.8
8	2.4	4.8	2.4	5.6	4.8	6.9	5.2	7.2	3.8	6.6
9	2.5	5.1	2.8	5.8	3.4	6.0	3.9	6.3	3.6	6.2
10	2.5	4.6	2.1	5.4	3.2	6.0	3.5	6.2	3.1	5.9
11	2.4	4.5	1.9	4.9	3.4	6.0	3.7	6.4	5.2	7.2
ค่าเฉลี่ย	**2.45**	**4.98**	**2.60**	**5.47**	**3.71**	**6.16**	**4.04**	**6.48**	**4.85**	**6.94**
SD	**0.07**	**0.27**	**0.44**	**0.29**	**0.94**	**0.59**	**0.97**	**0.60**	**1.56**	**0.80**

ตารางที่ ข-16 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 2)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	4.2	6.5	9.4	8.8	11.4	9.4	13.4	10.8
2	10.7	9.0	12.8	9.7	14.9	10.8	16.4	12.4
3	5.1	6.8	9.6	8.6	11.9	9.4	13.6	11.5
4	3.6	6.4	5.3	6.9	7.4	7.6	9.5	9.4
5	6.4	7.3	4.7	6.5	6.3	7.3	8.4	8.8
6	6.6	7.5	4.1	6.3	6.2	7.4	8.5	9.6
7	4.4	6.6	7.7	8.0	9.5	8.6	11.3	9.3
8	9.1	8.6	6.2	7.2	10.2	7.9	12.5	9.5
9	3.7	5.9	7.5	7.2	9.3	7.8	11.6	9.7
10	8.5	8.1	4.9	6.9	6.9	7.6	8.2	8.9
11	4.4	6.4	4.8	6.6	7.3	7.4	9.2	9.7
ค่าเฉลี่ย	**6.06**	**7.19**	**7.00**	**7.52**	**9.21**	**8.29**	**11.15**	**9.96**
SD	**2.42**	**1.00**	**2.71**	**1.10**	**2.74**	**1.13**	**2.65**	**1.13**

ตารางที่ ข-17 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 28 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28	
(ตัว)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	1.6	4.5	1.7	4.5	2.1	5.4	2.3	5.7	5.0	7.2
2	1.6	4.4	2.2	5.0	1.9	5.0	2.4	5.3	4.1	6.4
3	1.7	4.8	1.8	4.9	3.2	6.0	3.5	6.2	2.9	5.8
4	1.8	4.8	1.9	5.0	1.6	4.9	2.1	5.3	6.1	7.3
5	1.9	4.5	1.8	5.0	1.9	5.3	2.3	5.3	1.4	4.6
6	2.1	4.6	2.4	5.5	2.2	5.5	2.6	5.7	2.2	5.6
7	2.0	4.6	1.7	4.8	2.1	5.1	2.3	5.5	5.8	7.3
8	1.9	4.7	1.8	5.0	3.4	6.0	3.6	6.3	2.7	5.6
9	1.6	4.8	1.6	4.5	1.7	4.5	2.1	4.8	2.6	5.5
10	1.6	4.4	1.7	4.7	3.8	6.7	4.3	7.1	1.6	5.0
11	1.7	4.7	1.9	4.9	3.1	6.0	3.2	6.3	2.2	5.2
ค่าเฉลี่ย	**1.77**	**4.62**	**1.86**	**4.89**	**2.45**	**5.49**	**2.79**	**5.77**	**3.33**	**5.95**
SD	**0.18**	**0.15**	**0.24**	**0.28**	**0.77**	**0.63**	**0.74**	**0.65**	**1.76**	**0.96**

ตารางที่ ข-18 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 0.5 กก./ลบ.ม. ในวันที่ 35 42 49 และ 56 จากการทดลอง 4.1.3 (ถังที่ 3)

จำนวน	วันที่ 35		วันที่ 42		วันที่ 49		วันที่ 56	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	2.9	2.9	9.0	9.0	11.7	11.7	13.5	13.5
2	6.1	6.5	10.0	10.0	13.2	13.2	15.3	15.3
3	4.9	4.9	5.7	5.7	7.9	7.9	9.5	9.5
4	3.7	3.7	2.3	2.3	5.2	5.2	7.3	7.3
5	2.1	2.1	7.4	7.4	9.3	9.3	11.4	11.4
6	6.8	7.6	3.5	3.5	5.2	5.2	7.6	7.6
7	2.5	1.7	4.2	4.2	6.3	6.3	8.5	8.5
8	2.6	2.6	3.8	3.8	5.6	5.6	7.2	7.2
9	6.7	6.7	2.4	2.4	5.1	5.1	6.9	6.9
10	2.6	2.1	3.5	3.5	6.1	6.1	7.8	7.8
11	2.8	2.8	2.2	2.2	4.8	4.8	6.7	6.7
ค่าเฉลี่ย	**3.97**	**6.36**	**4.91**	**6.55**	**7.31**	**7.22**	**9.25**	**9.30**
SD	**2.11**	**1.10**	**2.75**	**1.15**	**2.89**	**1.17**	**2.91**	**1.19**

ตารางที่ ข-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลองเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ความหนาแน่นสูง		ความหนาแน่นต่ำ	
		ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)
31/12/2553	1	4.08	4.08	1.11	1.11
1/1/2554	2	4.08	8.16	1.11	2.21
2/1/2554	3	4.08	12.25	1.11	3.32
3/1/2554	4	4.08	16.33	1.11	4.42
4/1/2554	5	4.08	20.41	1.11	5.53
5/1/2554	6	4.08	24.49	1.11	6.63
6/1/2554	7	4.08	28.57	1.11	7.74
7/1/2554	8	4.54	33.11	1.18	8.91
8/1/2554	9	4.54	37.65	1.18	10.09
9/1/2554	10	4.54	42.18	1.18	11.27
10/1/2554	11	4.54	46.72	1.18	12.44
11/1/2554	12	4.54	51.26	1.18	13.62
12/1/2554	13	4.54	55.79	1.18	14.80
13/1/2554	14	4.54	60.33	1.18	15.97
14/1/2554	15	6.38	66.71	1.64	17.61
15/1/2554	16	6.38	73.09	1.64	19.25
16/1/2554	17	6.38	79.47	1.64	20.88
17/1/2554	18	6.38	85.85	1.64	22.52
18/1/2554	19	6.38	92.23	1.64	24.16
19/1/2554	20	6.38	98.61	1.64	25.79
20/1/2554	21	6.38	104.99	1.64	27.43

ตารางที่ ข-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลองเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.) (ต่อ)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ความหนาแน่นสูง		ความหนาแน่นต่ำ	
		ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)
28/1/2554	29	8.62	159.51	2.22	41.92
29/1/2554	30	8.62	168.13	2.22	44.14
30/1/2554	31	8.62	176.76	2.22	46.36
31/1/2554	32	8.62	185.38	2.22	48.58
1/2/2554	33	8.62	194.00	2.22	50.80
2/2/2554	34	8.62	202.63	2.22	53.02
3/2/2554	35	8.62	211.25	2.22	55.24
4/2/2554	36	10.82	222.07	2.69	57.93
5/2/2554	37	10.82	232.90	2.69	60.62
6/2/2554	38	10.82	243.72	2.69	63.31
7/2/2554	39	10.82	254.54	2.69	66.00
8/2/2554	40	10.82	265.37	2.69	68.69
9/2/2554	41	10.82	276.19	2.69	71.38
10/2/2554	42	10.82	287.01	2.69	74.07
11/2/2554	43	14.42	301.43	3.16	77.23
12/2/2554	44	14.42	315.85	3.16	80.39
13/2/2554	45	14.42	330.27	3.16	83.55
14/2/2554	46	14.42	344.69	3.16	86.71
15/2/2554	47	14.42	359.11	3.16	89.87
16/2/2554	48	14.42	373.53	3.16	93.03
17/2/2554	49	14.42	387.95	3.16	96.19
18/2/2554	50	18.13	406.08	4.36	100.56
19/2/2554	51	18.13	424.21	4.36	104.92
20/2/2554	52	18.13	442.33	4.36	109.28
21/2/2554	53	18.13	460.46	4.36	113.65
22/2/2554	54	18.13	478.59	4.36	118.01
23/2/2554	55	18.13	496.71	4.36	122.37
24/2/2554	56	18.13	514.84	4.36	126.74

ตารางที่ ข-20 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (0.5 กก./ลบ.ม.) และความหนาแน่นสูง (2.0 กก./ลบ.ม.)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ความหนาแน่นสูง		ความหนาแน่นต่ำ	
		ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
30/12/2553	0	0.000	0.000	0.000	0.000
17/1/2554	18	21.974	3.293	28.276	1.003
4/2/2554	36	46.942	2.866	57.016	1.994
11/2/2554	43	89.080	0.930	79.399	3.344
23/2/2554	55	70.683	5.851	76.629	1.794

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการตรวจวัดการเติบโตของผักกวางตุ้งในการทดลอง 4.2 ของการทดลองปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุตัวกลางเม็ดดินเผาและปลูกในดินเพาะปลูก

ตารางที่ ค-1 สุ่มตัวอย่างตรวจวัดน้ำหนักและความสูงของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนดินเพาะปลูกในวันที่ 7 14 21 28 และ 45 จากการทดลอง 4.2.1

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28		วันที่ 45	
	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)
1	0.08	7.0	0.36	8.0	0.25	9.0	0.79	8.5	1.68	17.54
2	0.09	7.0	0.16	7.2	0.24	8.0	0.87	8.5	1.82	17.56
3	0.13	8.0	0.18	10.0	0.30	9.8	0.71	8.5	1.76	17.54
4	0.06	6.8	0.22	6.8	0.42	8.0	0.61	9.5	1.78	17.46
5	0.09	6.2	0.11	8.0	0.26	7.0	0.41	9.4	1.89	17.55
6	0.09	8.0	0.13	6.9	0.30	7.5	0.91	10.5	1.74	17.51
7	0.07	9.0	0.20	5.6	0.18	6.0	0.51	6.2	1.68	17.54
8	0.05	5.5	0.06	5.4	0.14	6.5	0.62	6.8	1.68	17.57
9	0.05	6.9	0.06	6.0	0.18	6.0	0.26	8.5	1.74	17.54
10	0.06	5.7	0.15	8.5	0.15	7.4	0.51	7.2	1.75	17.55
11	0.05	4.7	0.11	7.1	0.21	6.8				
12	0.05	6.5	0.23	6.6	0.18	6.3				
13	0.08	6.5	0.21	6.9	0.22	5.4				
14	0.07	5.8	0.11	5.5	0.13	6.5				
15	0.07	5.6	0.14	5.0						
16	0.06	5.4	0.09	5.5						
17	0.07	5.7	0.19	4.9						
18	0.08	6.4	0.08	4.6						
19	0.06	5.5	0.06	6.0						
20	0.06	5.0	0.08	7.0						
ค่าเฉลี่ย	**0.07**	**6.36**	**0.15**	**6.58**	**0.23**	**7.16**	**0.62**	**8.36**	**1.75**	**17.54**
SD	**0.02**	**1.09**	**0.08**	**1.36**	**0.08**	**1.23**	**0.21**	**1.31**	**0.35**	**2.14**

ตารางที่ ค-2 สุ่มตัวอย่างตรวจวัดน้ำหนักและความสูงของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผาในวันที่ 7 14 21 28 และ 45 จากการทดลอง 4.2.1

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28		วันที่ 45	
	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)	นน. (กรัม)	ความสูง (ซม.)
1	0.05	4.4	0.10	5.2	0.13	5.4	0.13	4.8	1.50	9.0
2	0.04	3.5	0.09	5.1	0.09	4.5	0.26	4.2	1.70	10.3
3	0.03	4.5	0.07	4.7	0.20	5.8	0.26	5.8	1.30	10.5
4	0.03	4.5	0.12	5.1	0.23	4.5	0.25	5.7	1.50	8.5
5	0.02	4.0	0.12	4.5	0.15	5.0	0.23	4.9	0.90	12.6
6	0.03	3.8	0.10	4.8	0.16	5.0	0.22	4.7	1.60	14.5
7	0.02	4.0	0.09	4.6	0.16	4.8	0.42	6.7	1.40	14.2
8	0.04	3.7	0.10	4.8	0.19	6.7	0.21	4.9	1.50	10.0
9	0.04	3.8	0.12	4.9	0.18	4.7	0.42	5.6	1.30	10.0
10	0.04	4.1	0.09	4.5	0.15	6.0	0.34	5.3	0.90	9.7
11	0.05	4.1	0.13	4.6	0.07	4.0				

ตารางที่ ค-2 สุ่มตัวอย่างตรวจวัดน้ำหนักและความสูงของผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผาในวันที่ 7 14 21 28 และ 45 จากการทดลอง 4.2.1 (ต่อ)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 28		วันที่ 45	
	น.น. (กรัม)	ความสูง(ซม.)	น.น. (กรัม)	ความสูง(ซม.)	น.น. (กรัม)	ความสูง(ซม.)	น.น. (กรัม)	ความสูง(ซม.)	น.น. (กรัม)	ความสูง(ซม.)
12	0.05	4.0	0.08	4.8	0.17	4.4				
13	0.04	3.8	0.09	4.8	0.16	5.8				
14	0.02	3.8	0.09	4.7	0.12	4.8				
15	0.06	3.8	0.09	4.6	0.09	4.4				
16	0.03	4.0	0.13	4.3						
17	0.02	3.8	0.10	4.7						
18	0.04	4.0	0.12	5.2						
19	0.04	3.7	0.08	4.8						
20	0.04	3.8	0.13	4.5						
ค่าเฉลี่ย	**0.04**	**3.96**	**0.10**	**4.76**	**0.15**	**5.05**	**0.27**	**5.26**	**1.36**	**10.93**
SD	**0.01**	**0.27**	**0.02**	**0.25**	**0.04**	**0.74**	**0.09**	**0.71**	**0.27**	**2.10**

ตารางที่ ค-3 ค่าความเข้มแสงระหว่างการปลูกผักกวางตุ้งตลอดการทดลอง

วันที่	วัน	ความเข้มแสงภายใต้โรงเรือน (ลักซ์) ตรวจวัดเวลา 13.00 น.
31/12/2553	0	19,250
1/1/2554	1	15,090
5/1/2554	5	10,970
7/1/2554	7	4,870
12/1/2554	12	18,730
20/1/2554	20	7,540
23/1/2554	23	10,530
27/1/2554	27	5,380
2/2/2554	33	37,240
7/2/2554	38	6,530
12/2/2554	43	9,860
15/2/2554	45	13,540

ภาคผนวก ง

จากข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำในการทดลองที่ 4.3 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) จากการทดลองที่ 4.3.1 (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไทรต์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเทรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ฟอสเฟต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5/7/2554	0	0.86	0.06	0.02	0.03	0.00	0.77	0.03	0.30	0.23
6/7/2554	1	3.53	0.21	0.11	0.11	0.01	3.21	0.29	1.17	0.36
7/7/2554	2	5.34	0.31	0.12	0.32	0.04	4.71	0.49	1.90	0.54
8/7/2554	3	5.91	0.08	0.06	0.13	0.04	5.70	0.36	1.64	0.19
9/7/2554	4	6.94	0.06	0.01	0.17	0.05	6.71	0.58	1.45	0.37
10/7/2554	5	8.11	0.02	0.02	0.16	0.09	7.92	0.77	1.47	0.11
11/7/2554	6	7.89	0.06	0.00	0.15	0.02	7.67	0.67	3.01	0.13
12/7/2554	7	8.44	0.06	0.03	0.22	0.08	8.16	0.93	3.17	0.05
13/7/2554	8	9.63	0.04	0.01	0.19	0.07	9.41	0.41	2.08	0.04
14/7/2554	9	10.09	0.02	0.01	0.15	0.05	9.91	0.81	2.07	0.06
15/7/2554	10	10.71	0.05	0.00	0.12	0.04	10.53	2.48	2.72	0.01
16/7/2554	11	11.78	0.05	0.00	0.11	0.03	11.62	2.84	3.30	0.13
17/7/2554	12	12.62	0.04	0.00	0.08	0.02	12.50	2.80	2.29	0.16
18/7/2554	13	16.02	0.12	0.05	0.38	0.25	15.52	3.14	2.57	0.10
19/7/2554	14	15.99	0.07	0.02	0.27	0.19	15.65	2.37	2.56	0.33
20/7/2554	15	16.30	0.08	0.02	0.13	0.03	16.10	3.44	2.68	0.33
21/7/2554	16	16.65	0.05	0.03	0.25	0.20	16.35	3.12	2.36	0.08
22/7/2554	17	16.90	0.04	0.02	0.13	0.09	16.73	6.24	2.32	0.06
23/7/2554	18	17.17	0.08	0.01	0.11	0.04	16.98	2.60	2.21	0.13
24/7/2554	19	17.44	0.10	0.01	0.11	0.04	17.23	0.55	2.51	0.15
25/7/2554	20	17.82	0.10	0.02	0.07	0.03	17.65	1.43	2.54	0.24
26/7/2554	21	18.22	0.11	0.01	0.19	0.13	17.92	1.78	2.65	0.20
27/7/2554	22	19.08	0.11	0.01	0.13	0.05	18.85	3.52	2.40	0.27
28/7/2554	23	19.25	0.17	0.03	0.22	0.09	18.86	2.54	2.53	0.25
29/7/2554	24	19.25	0.19	0.04	0.20	0.04	18.87	1.11	2.62	0.23
30/7/2554	25	19.12	0.10	0.01	0.09	0.01	18.94	0.85	2.83	0.36
31/7/2554	26	19.27	0.07	0.01	0.06	0.01	19.14	0.99	3.38	0.09
1/8/2554	27	19.59	0.16	0.03	0.11	0.03	19.33	0.63	3.62	0.58
2/8/2554	28	20.01	0.13	0.04	0.11	0.04	19.77	3.55	2.83	0.28
3/8/2554	29	20.91	0.06	0.01	0.06	0.01	20.79	1.78	3.74	0.34
4/8/2554	30	20.66	0.10	0.01	0.09	0.02	20.47	1.74	3.64	0.46
5/8/2554	31	22.13	0.07	0.01	0.13	0.07	21.92	2.42	3.98	0.71
6/8/2554	32	22.55	0.08	0.02	0.10	0.03	22.37	4.76	3.74	0.42
7/8/2554	33	23.53	0.08	0.01	0.14	0.10	23.31	4.12	3.69	0.30
8/8/2554	34	24.74	0.16	0.02	0.12	0.03	24.46	4.45	3.81	0.34
9/8/2554	35	26.93	0.13	0.04	0.14	0.01	26.66	3.69	4.04	0.47

ตารางที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) จากการทดลองที่ 4.3.1 (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1										
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไทรต์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเทรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ฟอสเฟต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5/7/2554	0	0.79	0.03	0.00	0.02	0.00	0.73	0.03	0.03	0.00
6/7/2554	1	2.00	0.73	0.10	0.03	0.01	1.24	0.14	2.23	1.51
7/7/2554	2	2.74	1.07	0.23	0.21	0.03	1.46	0.18	1.59	1.69
8/7/2554	3	4.74	1.22	0.30	0.81	0.04	2.72	0.48	0.66	0.47
9/7/2554	4	6.80	0.56	0.02	2.21	0.04	4.03	0.73	0.30	0.11
10/7/2554	5	10.11	0.16	0.11	3.84	0.76	6.12	1.00	0.59	0.17
11/7/2554	6	11.21	0.03	0.01	3.04	0.90	8.14	1.16	2.34	0.31
12/7/2554	7	12.78	0.02	0.00	2.04	0.50	10.71	0.77	2.58	0.26
13/7/2554	8	18.17	0.04	0.07	0.71	0.28	17.42	2.34	1.60	0.23
14/7/2554	9	21.35	0.02	0.02	0.02	0.01	21.31	2.41	1.99	0.49
15/7/2554	10	22.53	0.03	0.01	0.04	0.01	22.47	1.05	3.98	0.71
16/7/2554	11	23.96	0.02	0.01	0.02	0.01	23.92	0.91	3.91	0.62
17/7/2554	12	27.42	0.03	0.01	0.03	0.01	27.36	2.11	3.32	0.34
18/7/2554	13	29.99	0.03	0.01	0.04	0.01	29.93	1.79	4.52	0.05
19/7/2554	14	31.85	0.05	0.01	0.06	0.01	31.74	1.80	5.05	0.22
20/7/2554	15	32.83	0.04	0.01	0.09	0.05	32.70	2.08	5.56	0.13
21/7/2554	16	37.98	0.02	0.01	0.12	0.06	37.84	1.05	6.08	0.16
22/7/2554	17	43.49	0.00	0.00	0.09	0.04	43.40	1.47	6.38	0.39
23/7/2554	18	48.27	0.04	0.01	0.09	0.03	48.14	1.90	6.35	0.44
24/7/2554	19	57.29	0.04	0.01	0.30	0.16	56.95	0.62	6.64	0.94
25/7/2554	20	62.17	0.05	0.01	0.17	0.05	61.95	1.50	6.52	0.43
26/7/2554	21	67.29	0.03	0.01	0.18	0.03	67.08	1.52	5.10	0.35
27/7/2554	22	72.40	0.02	0.01	0.15	0.09	72.23	0.42	6.13	0.67
28/7/2554	23	73.70	0.02	0.01	0.19	0.15	73.49	1.62	6.10	0.55
29/7/2554	24	74.83	0.03	0.01	0.13	0.10	74.67	1.00	6.31	0.57
30/7/2554	25	76.19	0.02	0.01	0.19	0.21	75.98	0.50	6.67	0.54
31/7/2554	26	78.74	0.03	0.00	0.10	0.08	78.61	0.20	6.64	0.05
1/8/2554	27	79.38	0.05	0.01	0.17	0.13	79.17	1.78	7.09	0.44
2/8/2554	28	81.09	0.04	0.01	0.07	0.03	80.98	2.82	6.40	0.41
3/8/2554	29	81.41	0.03	0.00	0.06	0.02	81.32	3.54	7.08	0.33
4/8/2554	30	84.85	0.03	0.01	0.07	0.03	84.75	1.41	6.80	0.35
5/8/2554	31	86.04	0.02	0.01	0.05	0.02	85.97	2.64	7.09	0.51
6/8/2554	32	88.86	0.04	0.00	0.04	0.02	88.78	0.97	7.31	0.10
7/8/2554	33	92.80	0.03	0.01	0.04	0.03	92.72	4.79	7.42	0.26
8/8/2554	34	93.45	0.11	0.03	0.04	0.03	93.29	3.82	8.58	0.18
9/8/2554	35	100.48	0.06	0.03	0.05	0.05	100.37	5.59	8.83	0.40

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) จากการทดลองที่ 4.3.1 (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสเฟตในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-2										
วันที่	วันที่ของการทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไทรท์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเทรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ฟอสเฟต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5/7/2554	0	0.90	0.08	0.00	0.03	0.00	0.79	0.02	0.05	0.00
6/7/2554	1	3.03	0.21	0.08	0.12	0.01	2.70	0.07	1.07	0.49
7/7/2554	2	5.10	0.31	0.04	0.27	0.03	4.53	0.35	1.27	0.35
8/7/2554	3	7.76	0.09	0.02	0.10	0.02	7.56	0.73	1.48	0.15
9/7/2554	4	8.38	0.07	0.03	0.15	0.07	8.15	0.24	1.24	0.26
10/7/2554	5	10.48	0.05	0.01	0.37	0.27	10.06	0.33	1.31	0.09
11/7/2554	6	11.23	0.06	0.01	0.86	0.11	10.30	0.67	2.88	0.14
12/7/2554	7	15.38	0.06	0.02	0.77	0.23	14.55	1.31	2.94	0.18
13/7/2554	8	17.25	0.04	0.02	0.39	0.09	16.81	3.06	1.67	0.37
14/7/2554	9	18.93	0.03	0.03	0.19	0.06	18.71	1.43	1.71	0.17
15/7/2554	10	22.27	0.04	0.00	0.18	0.03	22.05	1.45	2.35	0.22
16/7/2554	11	24.77	0.07	0.01	0.21	0.08	24.49	1.76	2.89	0.29
17/7/2554	12	26.56	0.05	0.01	0.14	0.02	26.37	1.27	1.64	0.20
18/7/2554	13	32.19	0.10	0.03	0.52	0.13	31.57	1.27	1.80	0.15
19/7/2554	14	32.89	0.08	0.02	0.39	0.14	32.42	0.82	1.99	0.46
20/7/2554	15	35.35	0.09	0.03	0.34	0.13	34.93	1.62	2.15	0.36
21/7/2554	16	35.72	0.15	0.14	0.20	0.08	35.38	2.95	2.03	0.22
22/7/2554	17	35.99	0.07	0.04	0.14	0.03	35.78	3.05	1.75	0.37
23/7/2554	18	36.40	0.11	0.02	0.12	0.04	36.18	1.19	1.82	0.39
24/7/2554	19	36.70	0.11	0.01	0.10	0.03	36.50	1.07	1.93	0.26
25/7/2554	20	37.37	0.13	0.06	0.14	0.06	37.10	0.95	1.96	0.10
26/7/2554	21	38.94	0.10	0.02	0.15	0.04	38.69	0.98	2.00	0.29
27/7/2554	22	39.62	0.08	0.02	0.16	0.02	39.38	4.39	2.42	0.79
28/7/2554	23	40.48	0.11	0.01	0.22	0.07	40.14	4.34	2.12	0.11
29/7/2554	24	40.84	0.15	0.02	0.25	0.06	40.44	4.16	2.16	0.32
30/7/2554	25	41.21	0.08	0.01	0.15	0.03	40.98	4.38	1.99	0.28
31/7/2554	26	43.04	0.06	0.01	0.07	0.01	42.91	4.34	2.50	0.07
1/8/2554	27	42.93	0.11	0.01	0.27	0.01	42.55	3.70	2.52	0.30
2/8/2554	28	43.86	0.08	0.03	0.24	0.03	43.53	3.18	2.08	0.05
3/8/2554	29	44.32	0.05	0.01	0.09	0.01	44.18	2.90	2.78	0.08
4/8/2554	30	44.43	0.09	0.03	0.15	0.01	44.19	2.51	2.63	0.13
5/8/2554	31	44.83	0.09	0.04	0.18	0.03	44.55	3.97	2.78	0.14
6/8/2554	32	45.47	0.07	0.02	0.18	0.06	45.21	2.89	2.89	0.12
7/8/2554	33	46.19	0.11	0.05	0.13	0.03	45.95	1.90	3.16	0.03
8/8/2554	34	46.55	0.18	0.06	0.13	0.03	46.23	3.50	3.05	0.26
9/8/2554	35	47.59	0.17	0.01	0.18	0.05	47.24	4.10	3.21	0.06

ตารางที่ ง-4 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/7/2554	0	7.23	0.06	160.00	0.00	8.47	0.01	28.63	0.45
9/7/2554	4	7.37	0.06	146.67	5.77	8.54	0.05	28.67	0.70
12/7/2554	7	7.27	0.06	130.00	10.00	8.40	0.03	27.60	0.00
15/7/2554	10	7.53	0.12	123.33	5.77	8.35	0.01	27.00	0.00
19/7/2554	14	7.53	0.12	130.00	10.00	8.39	0.03	27.77	0.06
23/7/2554	18	7.63	0.06	126.67	5.77	8.32	0.05	28.23	0.06
27/7/2554	22	7.73	0.12	120.00	0.00	8.24	0.03	27.97	0.21
31/7/2554	26	8.73	0.21	140.00	0.00	8.29	0.03	26.60	0.10
6/8/2554	32	7.83	0.06	120.00	17.32	8.27	0.08	27.73	0.21
9/8/2554	35	7.70	0.10	146.67	11.55	8.38	0.03	28.37	0.12

ตารางที่ ง-5 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/7/2554	0	7.17	0.06	160.00	0.00	8.43	0.04	28.30	0.10
9/7/2554	4	7.13	0.06	153.33	5.77	8.55	0.02	30.07	0.21
12/7/2554	7	7.07	0.06	133.33	11.55	8.39	0.01	28.53	0.06
15/7/2554	10	7.37	0.06	126.67	5.77	8.27	0.06	28.37	0.06
19/7/2554	14	7.33	0.06	130.00	10.00	8.39	0.02	27.00	0.26
23/7/2554	18	7.27	0.06	143.33	23.09	8.44	0.09	29.50	0.10
27/7/2554	22	7.27	0.12	163.33	5.77	8.42	0.04	28.70	0.10
31/7/2554	26	7.33	0.15	140.00	0.00	8.24	0.04	26.83	0.06
6/8/2554	32	8.07	0.15	100.00	0.00	8.24	0.07	27.73	0.21
9/8/2554	35	7.70	0.10	140.00	0.00	8.32	0.05	28.50	0.10

ตารางที่ ง-6 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		สภาพด่าง (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/7/2554	0	7.20	0.00	160.00	0.00	8.48	0.01	28.07	0.06
9/7/2554	4	7.33	0.06	146.67	5.77	8.52	0.04	27.33	0.25
12/7/2554	7	7.40	0.10	140.00	0.00	8.53	0.02	27.40	0.00
15/7/2554	10	7.60	0.00	126.67	11.55	8.42	0.04	26.67	0.15
19/7/2554	14	7.67	0.12	130.00	10.00	8.42	0.05	27.70	0.17
23/7/2554	18	7.73	0.06	156.67	25.17	8.44	0.08	28.30	0.17
27/7/2554	22	7.67	0.12	150.00	17.32	8.42	0.06	27.77	0.15
31/7/2554	26	9.07	0.23	140.00	30.00	8.26	0.05	26.50	0.10
6/8/2554	32	8.10	0.10	150.00	26.46	8.23	0.06	27.40	0.26
9/8/2554	35	7.83	0.06	150.00	10.00	8.39	0.04	28.50	0.10

ตารางที่ ง-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ชุดทดลอง (มก./ล.)		ชุดควบคุม-1 (มก./ล.)		ชุดควบคุม-2 (มก./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/7/2554	0	12.56	2.17	12.11	1.07	14.89	2.41
8/7/2554	3	6.67	1.53	50.67	1.20	4.89	0.84
11/7/2554	6	16.44	3.50	105.19	6.70	7.89	1.07
14/7/2554	9	6.89	1.68	167.41	13.89	3.67	1.76
17/7/2554	12	9.56	1.68	193.33	17.56	8.00	2.31
20/7/2554	15	36.89	7.19	230.00	16.41	6.22	1.02
23/7/2554	18	35.11	8.80	244.44	22.75	16.44	5.43
26/7/2554	21	42.00	6.67	220.56	21.10	13.33	2.40
31/7/2554	26	31.11	4.44	212.78	17.02	11.33	0.67
5/8/2554	31	45.78	7.67	318.89	41.94	10.22	2.52
9/8/2554	35	55.00	22.55	352.22	56.01	46.11	8.55
หมายเหตุ : เกาะติดกับเม็ดดินเผา (มก./ถัง)		3,548.89	229.23	-	-	3,222.22	163.89

ตารางที่ ง-8 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ชุดทดลอง (มก./ล.)		ชุดควบคุม-1 (มก./ล.)		ชุดควบคุม-2 (มก./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/7/2554	0	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.000	#DIV/0!	#DIV/0!
8/7/2554	3	0.244	0.084	0.422	0.019	0.244	0.038
12/7/2554	7	0.200	0.058	2.611	0.096	0.178	0.051
15/7/2554	10	0.211	0.038	3.156	0.126	0.189	0.019
18/7/2554	13	0.444	0.117	3.789	0.069	0.356	0.051
21/7/2554	16	0.656	0.234	4.778	0.255	0.456	0.069
26/7/2554	21	0.989	0.135	5.722	0.536	0.700	0.173
30/7/2554	25	0.578	0.077	9.667	1.364	0.489	0.038
4/8/2554	30	0.389	0.069	12.944	1.836	0.256	0.117
9/8/2554	35	0.478	0.107	13.000	4.359	0.344	0.038

ตารางที่ ง-9 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (ถังที่ 1)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	9.80	8.60	10.80	9.00	10.70	8.70	14.70	9.50	19.20	10.20
2	10.70	8.50	11.70	9.00	16.80	10.10	20.10	10.00	25.70	10.30
3	9.50	8.50	11.30	9.10	16.00	9.90	18.60	10.10	28.70	12.00
4	8.60	8.00	9.10	8.50	11.50	8.70	14.20	9.10	18.50	10.20
5	9.60	8.50	12.00	9.40	14.30	9.60	11.90	8.80	24.80	11.00
6	9.20	8.30	10.10	8.60	11.40	8.90	14.20	9.40	32.50	12.50
7	8.60	8.90	10.10	8.80	12.60	9.40	20.10	10.60	15.00	9.60
8	10.70	9.00	9.10	8.40	10.00	8.80	11.30	8.70	11.90	8.70
9	9.70	8.40	12.10	9.20	16.90	10.20	22.70	10.60	12.30	9.60
ค่าเฉลี่ย	**9.60**	**8.52**	**10.70**	**8.90**	**13.36**	**9.37**	**16.42**	**9.64**	**20.98**	**10.46**
SD	**0.76**	**0.30**	**1.17**	**0.34**	**2.70**	**0.61**	**4.04**	**0.72**	**7.38**	**1.20**

ตารางที่ ง-10 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (ถังที่ 2)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	12.40	9.00	13.70	9.80	15.10	10.10	16.40	9.90	29.30	11.90
2	11.10	9.00	12.10	9.40	19.90	10.60	18.90	10.50	23.50	10.70
3	11.90	9.40	14.20	10.00	18.30	10.40	20.00	10.60	27.90	12.00
4	12.80	9.40	13.70	9.70	16.60	9.90	24.10	11.00	22.30	10.70
5	11.70	8.70	13.50	9.30	15.00	9.70	20.20	10.20	22.80	10.00
6	12.10	9.00	13.80	9.50	14.00	9.50	16.70	10.30	25.20	10.70
7	11.80	9.20	13.10	9.60	16.80	10.30	18.80	10.60	35.00	12.20
ค่าเฉลี่ย	**11.97**	**9.10**	**13.44**	**9.61**	**16.53**	**10.07**	**19.30**	**10.44**	**26.57**	**11.17**
SD	**0.54**	**0.25**	**0.68**	**0.24**	**2.06**	**0.40**	**2.58**	**0.35**	**4.55**	**0.85**

ตารางที่ ง-11 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) (ถังที่ 3)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	11.90	8.90	13.60	9.60	20.80	10.70	27.70	11.50	30.00	12.20
2	12.90	9.00	14.60	9.70	19.50	10.50	24.10	11.10	27.10	11.70
3	12.80	9.00	15.00	9.60	19.10	10.60	24.70	11.50	41.60	13.00
4	13.20	9.30	14.30	9.90	19.30	10.50	24.30	11.30	32.10	12.50
5	12.20	9.10	16.40	9.00	17.90	10.20	21.90	11.00	30.10	12.20
6	11.80	9.00	12.50	9.50	17.00	10.40	24.30	10.90	35.90	12.70
7	11.60	9.00	12.70	9.60	19.70	10.20	22.80	10.70	41.60	13.00
ค่าเฉลี่ย	**12.34**	**9.04**	**14.16**	**9.56**	**19.04**	**10.44**	**24.26**	**11.14**	**34.06**	**12.47**
SD	**0.62**	**0.13**	**1.36**	**0.28**	**1.24**	**0.19**	**1.82**	**0.31**	**5.80**	**0.48**

ตารางที่ ง-12 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (ถังที่ 1)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	17.50	10.20	21.00	10.60	26.90	11.10	29.50	12.20	35.90	12.00
2	17.30	10.40	20.20	11.10	22.80	10.90	28.60	11.50	37.90	13.30
3	17.40	10.00	21.10	10.90	26.20	11.20	31.70	12.20	32.40	12.30
4	17.00	10.10	20.80	11.10	27.30	11.50	30.50	12.00	40.60	13.00
5	17.10	10.00	20.10	11.00	28.10	11.80	27.10	11.80	40.90	12.50
ค่าเฉลี่ย	**17.26**	**10.14**	**20.64**	**10.94**	**26.26**	**11.30**	**29.48**	**11.94**	**37.54**	**12.62**
SD	**0.21**	**0.17**	**0.46**	**0.21**	**2.05**	**0.35**	**1.76**	**0.30**	**3.53**	**0.53**

ตารางที่ ง-13 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (ถังที่ 2)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	13.50	10.10	16.10	10.00	22.60	10.90	22.70	12.40	26.00	11.40
2	13.10	9.60	16.70	10.50	22.60	10.90	20.80	10.60	25.20	11.60
3	15.60	10.00	17.50	10.20	21.70	11.20	21.60	11.40	23.10	10.70
4	14.30	10.60	15.90	10.50	21.70	11.20	23.60	10.70	26.20	11.60
5	16.50	9.90	17.60	10.50	22.60	11.10	22.80	10.50	22.70	11.00
ค่าเฉลี่ย	**14.60**	**10.04**	**16.76**	**10.34**	**22.24**	**11.06**	**22.30**	**11.12**	**24.64**	**11.26**
SD	**1.43**	**0.37**	**0.78**	**0.23**	**0.49**	**0.15**	**1.10**	**0.80**	**1.64**	**0.40**

ตารางที่ ง-14 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) (ถังที่ 3)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	16.90	10.10	19.10	9.50	22.90	10.10	23.90	11.00	23.50	11.20
2	16.30	9.40	18.20	10.60	22.90	11.40	26.20	10.50	25.80	11.30
3	17.60	9.50	17.90	10.50	21.20	10.80	24.50	11.60	29.50	12.00
4	18.40	10.00	18.70	11.00	23.20	11.20	25.60	11.90	27.00	11.00
5	16.20	9.50	17.30	10.50	21.10	11.00	25.70	11.60	24.70	12.00
ค่าเฉลี่ย	**17.08**	**9.70**	**18.24**	**10.42**	**22.26**	**10.90**	**25.18**	**11.32**	**26.10**	**11.50**
SD	**0.93**	**0.32**	**0.70**	**0.55**	**1.02**	**0.50**	**0.95**	**0.56**	**2.30**	**0.47**

ตารางที่ ง-15 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (ถังที่ 1)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	13.50	9.00	17.70	10.70	17.70	9.70	20.10	10.60	37.60	12.70
2	13.30	9.10	14.00	9.50	17.80	10.10	22.10	11.30	29.70	11.70
3	14.10	9.10	15.10	9.90	16.90	10.00	21.10	10.60	22.20	10.20
4	13.30	9.10	14.70	9.50	18.60	10.10	26.30	11.50	25.60	11.60
5	13.70	9.40	15.90	9.60	18.10	10.10	20.50	10.30	27.10	12.00
6	14.60	9.20	13.50	9.10	18.30	10.40	22.90	10.90	20.90	10.40
ค่าเฉลี่ย	**13.75**	**9.15**	**15.15**	**9.72**	**17.90**	**10.07**	**22.17**	**10.87**	**27.18**	**11.43**
SD	**0.51**	**0.14**	**1.50**	**0.55**	**0.59**	**0.23**	**2.27**	**0.46**	**6.03**	**0.96**

ตารางที่ ง-16 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (ถังที่ 2)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	15.70	9.50	14.70	10.10	21.00	11.00	21.80	11.20	30.70	11.50
2	15.80	9.50	16.00	10.00	19.50	11.00	20.90	10.70	23.20	11.00
3	15.50	9.30	19.80	10.50	16.90	10.50	21.40	11.00	26.70	12.00
4	15.30	9.60	16.80	9.80	21.00	10.20	26.30	11.50	24.30	11.80
5	15.60	10.00	16.80	10.60	19.40	11.00	23.90	10.90	27.80	12.20
ค่าเฉลี่ย	**15.58**	**9.58**	**16.82**	**10.20**	**19.56**	**10.74**	**22.86**	**11.06**	**26.54**	**11.70**
SD	**0.19**	**0.26**	**1.87**	**0.34**	**1.68**	**0.37**	**2.24**	**0.31**	**2.97**	**0.47**

ตารางที่ ง-17 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในถังเลี้ยงในวันเริ่มต้น 7 14 21 และ 35 ของชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (ถังที่ 3)

จำนวน	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 7		วันที่ 14		วันที่ 21		วันที่ 35	
(ตัว)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว(ซม.)
1	16.20	9.60	19.40	10.70	26.10	11.00	26.20	11.80	37.50	13.30
2	16.90	9.10	20.10	9.90	24.50	11.60	31.90	12.70	29.50	12.50
3	15.90	10.00	16.80	10.50	30.50	11.50	27.10	12.10	33.10	13.00
4	16.50	9.80	16.80	10.60	24.80	11.20	28.70	12.60	31.90	12.30
5	15.60	9.80	19.80	11.00	24.00	11.00	28.90	11.80	29.20	12.00
ค่าเฉลี่ย	**16.22**	**9.66**	**18.58**	**10.54**	**25.98**	**11.26**	**28.56**	**11.20**	**32.24**	**12.62**
SD	**0.51**	**0.34**	**1.64**	**0.40**	**2.64**	**0.28**	**2.18**	**0.43**	**3.36**	**0.53**

ตารางที่ ง-18 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงรงควัตถุ (คลอโรฟิลล์เอ) ในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-1		ชุดควบคุม-2	
		คลอโรฟิลล์เอ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	คลอโรฟิลล์เอ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	คลอโรฟิลล์เอ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5/7/2554	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19/7/2554	14	2.78	0.29	14.75	1.01	3.84	1.02
9/8/2554	35	8.29	0.71	30.40	4.24	10.11	0.89

ตารางที่ ง-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-1		ชุดควบคุม-2	
		ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน
5/7/2554	0	4.28	4.28	4.32	4.32	4.06	4.03
6/7/2554	1	4.28	8.55	4.32	8.64	4.06	8.06
7/7/2554	2	4.28	12.83	4.32	12.96	4.06	12.09
8/7/2554	3	4.28	17.11	4.32	17.28	4.06	16.12
9/7/2554	4	4.28	21.38	4.32	21.60	4.06	20.15
10/7/2554	5	4.28	25.66	4.32	25.92	4.06	24.18
11/7/2554	6	4.28	29.94	4.32	30.24	4.06	28.21
12/7/2554	7	4.28	34.21	4.32	34.56	4.06	32.24
13/7/2554	8	4.83	39.04	4.64	39.20	4.65	36.71
14/7/2554	9	4.83	43.87	4.64	43.83	4.65	41.18
15/7/2554	10	4.83	48.70	4.64	48.47	4.65	45.65
16/7/2554	11	4.83	53.53	4.64	53.11	4.65	50.12
17/7/2554	12	4.83	58.36	4.64	57.74	4.65	54.59
18/7/2554	13	4.83	63.19	4.64	62.38	4.65	59.06
19/7/2554	14	4.83	68.02	4.64	67.02	4.47	63.53
20/7/2554	15	6.16	74.18	5.90	72.92	5.59	69.12
21/7/2554	16	6.16	80.34	5.90	78.82	5.59	74.70
22/7/2554	17	6.16	86.49	5.90	84.72	5.59	80.29
23/7/2554	18	6.16	92.65	5.90	90.62	5.59	85.88
24/7/2554	19	6.16	98.81	0.00	90.62	5.59	91.46
25/7/2554	20	6.16	104.96	0.00	90.62	5.59	97.05
26/7/2554	21	6.16	111.12	0.00	90.62	5.59	102.64
27/7/2554	22	6.16	117.28	0.00	90.62	5.59	108.22
28/7/2554	23	7.55	124.82	0.00	90.62	4.12	112.35
29/7/2554	24	5.08	129.91	6.42	97.03	6.50	118.85
30/7/2554	25	0.00	129.91	0.00	97.03	0.00	118.85
31/7/2554	26	7.55	137.45	6.42	103.45	6.50	125.35
1/8/2554	27	7.55	145.00	0.00	103.45	4.12	129.48

ตารางที่ ง-19 ปริมาณอาหารที่ให้ในการเลี้ยงปลานิลและปริมาณอาหารสะสมเฉลี่ยของแต่ละวันตลอดการทดลองของชุดการทดลอง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ชุดควบคุม-1 (เลี้ยงปลาเพียงอย่างเดียว) และชุดควบคุม-2 (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง) (ต่อ)

วันที่	วันที่ของการทดลอง	ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-1		ชุดควบคุม-2	
		ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน)	ปริมาณอาหาร (กรัม/วัน)	อาหารสะสม (กรัม/วัน
2/8/2554	28	0.00	145.00	0.00	103.45	0.00	129.48
3/8/2554	29	7.55	152.55	6.42	109.87	6.50	135.98
4/8/2554	30	7.55	160.09	6.42	116.28	6.50	142.48
5/8/2554	31	7.55	167.64	4.32	120.60	6.50	148.99
6/8/2554	32	7.55	175.19	2.46	123.06	6.50	155.49
7/8/2554	33	7.55	182.73	2.46	125.51	6.50	161.99
8/8/2554	34	7.55	190.28	2.46	127.97	6.50	168.50
9/8/2554	35	10.22	200.50	7.36	135.33	7.62	176.12

ตารางที่ ง-20 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	7.20	6.70	7.50	7.90	7.60
2	7.80	6.80	8.20	7.20	8.30
3	8.40	6.80	8.40	7.80	7.80
4	7.20	7.10	7.30	8.30	8.60
5	7.60	6.80	8.20	7.60	7.80
6	6.80	7.80	8.00	7.60	8.90
7	6.40	7.30	8.80	7.40	7.20
8	6.20	6.90	7.20	6.90	8.40
9	5.80	8.40	7.60	7.10	8.20
10	6.70	8.70	7.20	8.50	7.50
11	6.70	7.20	7.40	8.30	7.40
12	5.40	8.70	8.20	8.10	7.30
13	5.30	8.40	7.30	7.60	8.90
14	5.60	7.90	8.40	7.90	7.90
15	7.40	7.60	8.20	8.20	9.30
16	6.50	7.50	7.60	7.50	7.80
17	6.50	7.80	7.40	7.60	7.50
18	7.20	8.30	7.50	7.80	10.20
19	6.20	8.80	7.20	8.40	7.40
20	6.40	8.60	7.20	8.20	8.60
ค่าเฉลี่ย	**6.67**	**7.71**	**7.71**	**7.80**	**8.13**
SD	**0.81**	**0.74**	**0.54**	**0.45**	**0.78**

ตารางที่ ง-21 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	7.50	5.80	7.40	7.60	7.80
2	7.60	6.40	6.80	8.30	8.40
3	7.40	6.40	7.60	8.50	8.60
4	6.80	7.30	6.60	8.70	11.20
5	6.20	7.60	8.30	7.40	9.70
6	7.20	6.50	7.40	7.30	7.60
7	5.80	6.30	7.20	6.80	10.70
8	6.50	5.80	6.90	7.40	10.80
9	6.40	6.40	6.60	8.60	8.70
10	5.80	6.20	7.20	5.90	9.60
11	6.20	5.90	7.40	6.40	7.80
12	7.20	5.70	6.50	6.50	8.30
13	6.60	7.50	5.70	7.20	6.90
14	6.80	7.50	6.40	7.50	6.50
15	5.60	7.30	6.20	6.90	7.40
16	5.90	6.90	6.30	6.90	7.30
17	6.30	6.80	7.20	7.40	7.10
18	6.50	6.80	7.10	8.40	7.70
19	6.70	7.10	6.40	8.30	5.90
20	6.40	7.30	5.90	8.10	7.30
ค่าเฉลี่ย	**6.57**	**6.68**	**6.86**	**7.51**	**8.27**
SD	0.59	0.62	0.63	0.80	1.47

ตารางที่ ง-22 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	5.50	7.50	7.20	7.60	8.70
2	7.40	7.00	6.80	7.40	9.30
3	6.20	6.00	6.50	8.40	11.20
4	7.50	7.50	7.40	8.60	8.40
5	6.20	7.80	6.80	6.80	6.80
6	5.80	6.70	7.60	7.60	8.50
7	5.70	6.20	7.40	8.20	7.40
8	5.20	6.10	8.20	7.40	7.20
9	5.30	7.20	7.30	7.30	7.80
10	6.30	7.40	7.40	7.60	6.90
11	6.40	6.70	7.20	8.10	6.80
12	5.40	6.50	7.30	7.40	7.30
13	5.30	6.40	7.10	7.30	7.10
14	4.70	6.80	6.80	7.10	7.30

ตารางที่ ง-22 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความสูงของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3) (ต่อ)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
15	4.80	6.30	6.50	7.90	7.50
16	5.40	6.80	6.40	6.80	6.90
17	5.10	6.30	6.30	7.20	6.40
18	4.90	6.60	6.60	7.50	6.40
19	4.60	5.80	5.90	7.40	8.10
20	5.40	6.20	6.50	6.50	8.40
ค่าเฉลี่ย	**5.66**	**6.69**	**6.96**	**7.51**	**7.72**
SD	**0.81**	**0.56**	**0.54**	**0.53**	**1.15**

ตารางที่ ง-23 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	4.80	6.50	7.90	9.80	17.20
2	5.20	7.10	8.80	11.70	17.80
3	4.60	6.90	8.30	15.40	11.30
4	4.40	8.20	7.20	10.90	9.80
5	5.30	6.80	7.00	9.80	14.70
6	4.60	7.80	6.80	7.90	12.60
7	4.50	7.60	8.40	8.30	14.40
8	5.30	5.80	8.50	8.50	10.20
9	4.40	5.60	8.20	9.70	8.60
10	4.60	6.50	7.80	8.70	10.90
11	4.20	5.80	7.90	8.40	12.20
12	3.80	5.30	8.10	7.60	8.90
13	3.70	5.70	7.60	6.80	8.70
14	4.20	6.80	6.90	7.90	7.90
15	4.10	6.30	7.30	8.30	7.70
16	4.60	6.60	7.50	9.20	12.30
17	4.50	5.40	7.30	8.50	12.60
18	4.30	5.60	7.20	8.40	6.90
19	3.70	5.70	6.50	6.90	6.80
20	4.30	6.40	6.90	7.50	8.70
ค่าเฉลี่ย	**4.46**	**6.42**	**7.61**	**9.01**	**11.01**
SD	**0.46**	**0.83**	**0.65**	**1.94**	**3.21**

ตารางที่ ง-24 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	5.40	5.40	8.50	11.50	8.80
2	4.50	7.50	7.40	14.80	18.70
3	4.80	5.60	7.20	10.70	11.20
4	4.60	5.80	7.10	13.10	12.00
5	5.20	6.30	6.80	9.80	10.80
6	5.40	4.90	5.90	8.80	8.70
7	5.60	5.60	6.90	8.90	10.20
8	4.20	6.20	7.20	7.80	10.20
9	4.80	5.60	7.20	10.20	16.70
10	4.60	5.80	7.20	10.80	9.80
11	4.50	5.40	7.00	10.40	8.90
12	4.20	5.30	6.90	11.50	9.70
13	3.90	5.70	7.00	9.40	7.80
14	3.80	6.30	7.10	8.50	9.50
15	4.20	6.70	7.40	7.90	6.90
16	4.10	6.10	6.90	8.30	10.30
17	5.30	5.50	6.60	9.60	12.30
18	5.20	4.60	7.20	7.80	12.20
19	4.80	4.90	7.40	7.40	10.30
20	4.30	5.40	6.40	8.30	11.30
ค่าเฉลี่ย	**4.67**	**5.73**	**7.07**	**9.78**	**10.82**
SD	0.54	0.66	0.50	1.91	2.76

ตารางที่ ง-25 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	4.50	6.40	7.50	11.00	19.70
2	2.80	7.00	8.20	12.20	12.30
3	4.20	5.20	6.40	14.80	23.20
4	3.60	5.40	8.10	12.20	14.50
5	3.30	4.80	6.70	10.50	12.30
6	3.40	5.40	7.40	9.80	10.50
7	3.50	6.20	7.30	8.60	14.30
8	3.50	6.80	8.30	8.70	16.10
9	4.50	6.60	7.60	9.40	11.40
10	4.60	5.40	7.20	9.20	12.30
11	3.60	6.20	7.30	9.70	9.80
12	4.20	6.30	7.60	8.50	10.20

ตารางที่ ง-25 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3) (ต่อ)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
13	5.20	6.40	6.80	8.90	10.50
14	4.20	6.20	6.60	9.10	11.10
15	3.80	5.40	6.90	9.30	11.70
16	3.50	5.60	7.20	7.90	9.70
17	3.50	5.10	7.40	8.50	8.90
18	3.20	6.30	7.20	8.20	7.80
19	3.40	6.10	7.20	7.90	10.30
20	3.70	5.90	6.80	10.40	12.50
ค่าเฉลี่ย	**3.81**	**5.94**	**7.29**	**9.74**	**12.45**
SD	**0.58**	**0.61**	**0.52**	**1.73**	**3.69**

ตารางที่ ง-26 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 1)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	1.30	2.10	2.10	3.30	3.40
2	1.40	2.20	2.20	3.90	4.80
3	1.60	1.80	2.50	3.10	3.90
4	1.50	1.90	2.70	2.60	3.50
5	1.50	2.30	1.90	2.70	3.50
6	1.20	1.90	2.30	2.50	2.80
7	1.20	2.20	2.20	2.70	2.40
8	1.10	2.10	2.10	2.60	2.20
9	0.80	2.00	2.00	2.80	3.20
10	1.40	1.60	2.10	3.10	3.70
11	1.20	2.10	2.20	3.00	3.40
12	1.40	1.80	2.10	2.80	3.50
13	1.40	1.60	1.90	2.70	2.90
14	1.30	1.70	2.00	2.20	2.70
15	1.20	2.20	1.80	2.30	2.60
16	0.90	2.10	2.20	2.50	3.30
17	1.20	1.70	2.10	2.80	3.20
18	1.10	1.80	2.20	3.10	3.00
19	1.20	1.80	2.40	2.30	4.00
20	1.30	2.00	2.40	1.90	3.20
ค่าเฉลี่ย	**0.20**	**1.95**	**2.17**	**2.75**	**3.26**
SD	**1.26**	**0.21**	**0.22**	**0.44**	**0.60**

ตารางที่ ง-27 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 2)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	1.20	1.90	2.00	3.00	3.10
2	1.00	1.50	2.00	2.70	3.20
3	1.10	2.10	2.10	2.50	2.80
4	1.40	2.20	2.20	1.90	2.70
5	1.30	2.40	2.00	2.90	2.90
6	0.80	2.20	1.90	2.70	2.50
7	0.90	1.60	2.00	2.80	3.70
8	1.10	1.80	1.80	2.70	3.90
9	1.20	1.80	2.00	3.20	3.60
10	1.40	1.90	1.80	2.60	3.70
11	1.20	1.80	2.00	2.40	3.40
12	1.30	2.00	2.10	2.30	3.80
13	1.20	2.10	2.20	2.40	3.20
14	1.10	1.80	2.20	2.50	3.30
15	1.30	1.70	2.10	1.80	3.40
16	1.20	1.50	2.30	1.90	3.60
17	1.10	1.90	2.30	2.00	3.10
18	1.20	2.00	1.80	2.20	2.60
19	1.30	1.80	1.90	2.50	2.80
20	1.20	2.20	2.00	2.40	3.00
ค่าเฉลี่ย	**1.18**	**1.91**	**2.04**	**2.47**	**3.22**
SD	0.15	0.24	0.15	0.38	0.42

ตารางที่ ง-28 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
1	1.30	2.10	2.50	4.00	4.10
2	1.00	1.80	2.50	3.90	4.50
3	0.80	1.70	2.50	3.50	4.00
4	0.80	1.50	2.40	3.10	4.20
5	0.90	2.00	2.20	3.20	3.60
6	1.20	1.80	2.30	3.00	3.50
7	1.40	2.20	2.40	2.60	3.20
8	1.00	2.10	2.50	3.10	3.40
9	1.40	2.10	2.40	3.30	2.80
10	1.60	1.80	2.30	2.40	2.60
11	1.20	1.60	2.20	2.70	2.30
12	1.30	1.70	2.10	2.50	2.80

ตารางที่ ง-28 การสุ่มตัวอย่างตรวจวัดความกว้างของใบผักกวางตุ้งที่ปลูกบนเม็ดดินเผา (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ในวันที่ 7 14 21 28 และ 35 (ถังที่ 3) (ต่อ)

จำนวน (ต้น)	วันที่ 7 (ซม.)	วันที่ 14 (ซม.)	วันที่ 21 (ซม.)	วันที่ 28 (ซม.)	วันที่ 35 (ซม.)
13	1.40	1.90	2.30	2.30	2.60
14	1.40	2.00	2.30	2.00	2.90
15	1.60	2.10	2.40	2.10	3.10
16	1.10	2.20	1.70	2.20	3.40
17	1.20	1.90	2.00	2.50	2.80
18	1.20	1.60	2.10	2.40	3.50
19	1.30	2.00	2.10	2.80	3.60
20	1.40	1.80	1.90	2.90	3.00
ค่าเฉลี่ย	**1.23**	**1.90**	**2.26**	**2.83**	**3.30**
SD	**0.23**	**0.21**	**0.22**	**0.57**	**0.59**

ตารางที่ ง-29 ค่าความเข้มแสงระหว่างการปลูกผักกวางตุ้ง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ตลอดการทดลอง

วันที่	วัน	ความเข้มแสงภายใต้โรงเรือน (ลักซ์)	
		ตรวจวัดเวลา 10.00 น.	ตรวจวัดเวลา 15.00 น.
5/7/2554	0	18,680	590
6/7/2554	1	18,720	620
7/7/2554	2	18,860	570
8/7/2554	3	20,400	1,080
9/7/2554	4	18,830	1,900
10/7/2554	5	8,890	1,290
11/7/2554	6	19,810	1,910
12/7/2554	7	18,220	1,410
13/7/2554	8	7,440	460
14/7/2554	9	5,440	310
15/7/2554	10	3,440	1,560
16/7/2554	11	1,640	1,700
17/7/2554	12	6,630	1,830
18/7/2554	13	4,410	1,470
19/7/2554	14	4,360	1,110
20/7/2554	15	6,570	2,380
21/7/2554	16	980	1,140
22/7/2554	17	3,700	800
23/7/2554	18	17,460	1,700
24/7/2554	19	5,690	1,630
25/7/2554	20	1,840	1,030
26/7/2554	21	17,700	1,020
27/7/2554	22	12,450	1,370

ตารางที่ ง-29 ค่าความเข้มแสงระหว่างการปลูกผักกวางตุ้ง (เลี้ยงปลา+ตัวกลาง+ปลูกผัก) ตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	วัน	ความเข้มแสงภายใต้โรงเรือน (ลักซ์)	
		ตรวจวัดเวลา 10.00 น.	ตรวจวัดเวลา 15.00 น.
28/7/2554	23	24,600	1,730
29/7/2554	24	9,740	1,640
30/7/2554	25	2,110	2,170
31/7/2554	26	1,020	1,880
1/8/2554	27	1,390	1,230
2/8/2554	28	1,560	1,390
3/8/2554	29	23,400	1,320
4/8/2554	30	19,760	1,370
5/8/2554	31	25,410	980
6/8/2554	32	23,280	870
7/8/2554	33	1,960	680
8/8/2554	34	1,070	560
9/8/2554	35	3,430	2,180

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุ ไนโตรเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน รวมทั้งความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในตัวอย่าง ในการทดลองที่ 4.1.4 และ 4.2.2

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (FW1017A)
254 อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 1268/54

วันที่รับตัวอย่าง : 2 พฤษภาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 2 พฤษภาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวทรงสุดา พรหมทอง

วันที่ทำการทดสอบ : 4, 9-10 พฤษภาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างถึง WI-RES-CHNS-O-001

เครื่องมือทดสอบ : CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy

เทคนิคการทดสอบ : Dynamic Flash Combustion

สภาวะการทดสอบ :

Left Furnace temperature :	900 °C	Oven temperature :	65 °C
Carrier flow :	130 mL/min	Reference flow :	100 mL/min
Oxygen flow :	250 mL/min		

รายละเอียดตัวอย่าง : ผงเนื้อเดียวกัน **จำนวน :** 21 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ (%RSD)		
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน
1	Fish (Pre-test)	9.40 (1.52)	38.76 (1.37)	5.56 (1.82)
2	Fish tank 1 (Post-test)	9.33 (1.06)	37.39 (1.11)	5.50 (0.81)
3	Fish tank 2 (Post-test)	8.70 (1.66)	42.28 (0.11)	6.41 (0.38)
4	Fish tank 3 (Post-test)	8.54 (1.09)	42.72 (1.56)	6.67 (1.61)
5	Fish tank 4 (Post-test)	8.58 (0.21)	33.33 (0.85)	5.23 (0.54)
6	Fish tank 5 (Post-test)	9.29 (1.69)	35.99 (1.03)	5.58 (0.31)
7	Fish tank 6 (Post-test)	9.61 (1.45)	40.92 (1.07)	6.04 (0.81)
8	Biofloc tank 1	1.79 (0.74)	32.25 (1.62)	4.31 (1.85)
9	Biofloc tank 2	1.56 (0.92)	34.07 (1.32)	4.46 (1.11)
10	Biofloc tank 3	2.19 (0.60)	34.60 (0.99)	4.56 (0.48)

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

ผลการทดสอบ : (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ (%RSD)		
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน
11	Biofloc tank 4	1.67 (0.26)	34.85 (0.10)	4.51 (0.10)
12	Biofloc tank 5	2.35 (1.76)	33.99 (1.11)	4.36 (1.11)
13	Biofloc tank 6	1.30 (0.35)	24.77 (1.69)	3.14 (0.39)
14	Chinese cabbage 7 days (Sample)	2.35 (1.14)	35.21 (1.29)	4.82 (1.49)
15	Chinese cabbage 7 days (Control)	3.73 (0.85)	34.10 (1.45)	4.71 (1.60)
16	Chinese cabbage 35 days (Control)	6.77 (0.31)	31.51 (0.44)	4.35 (0.48)
17	Chinese cabbage 35 days (Sample)	5.96 (1.83)	31.85 (0.67)	4.41 (0.41)
18	feed	5.61 (2.09)	42.71 (0.59)	6.12 (0.62)
19	Organic fertilizer	1.66 (0.53)	15.06 (0.53)	1.46 (0.53)
20	Expanded clay (Pre-test)	น้อยกว่า 0.01	0.18 (0.31)	0.11 (0.31)
21	Expanded clay (Post-test)	น้อยกว่า 0.01	0.17 (0.89)	0.09 (4.42)

ข้อมูลดิบถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ 1268-54

LOQ=ขีดจำกัดต่ำสุดของการทดสอบเชิงปริมาณเท่ากับ 0.01 %

(นางรุสนี กูลวิจิตร)
หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์
19 พฤษภาคม 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (FW1017A)
254 อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 1340/54

วันที่รับตัวอย่าง: 10 พฤษภาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ: 10 พฤษภาคม 2554

ผู้ทดสอบ: นายเวียงชัย จงศรีรัตนกุล

วันที่ทำการทดสอบ: 25 – 26 พฤษภาคม 2554

วิธีการทดสอบ: ICP-OES อ้างอิง WI-RES-ICP-OES-001

เครื่องมือทดสอบ: Optical Emission Spectrometer , Optima 4300 DV, Perkin Elmer Instruments, USA

เทคนิคการทดสอบ: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

สภาวะการทดสอบ: ความยาวคลื่น P = 213.617 nm

รายละเอียดตัวอย่าง: ผงเนื้อเดียวกัน **จำนวน:** 11 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส (mg/kg) (%RSD)
1.	Fish (Pre-test)	3,848.35 (2.02)
2.	Fish tank 3 (Post-test)	3,116.91 (1.28)
3.	Fish tank 5 (Post-test)	4,085.86 (0.61)
4.	Biofloc tank 2	1,402.67 (0.51)
5.	Biofloc tank 4	1,393.94 (0.79)
6.	Chinese cabbage 35 days (Control)	247.13 (6.69)
7.	Chinese cabbage 35 days (Sample)	246.73 (2.59)
8.	Feed	1,067.81 (1.02)
9.	Organic fertilizer	178.51 (2.96)
10.	Expanded clay (Pre-test)	55.99 (0.38)
11.	Expanded clay (Post-test)	50.90 (1.59)

* ขีดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOQ) ; P = 0.005 mg/L
* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ 1340-54

(นางรุสนี กุลวิจิตร)
หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์
17 พฤษภาคม 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก ฉ

ผลการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุ ไนโตรเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน รวมทั้งความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในตัวอย่าง ในการทดลองที่ 4.3.5 และ 4.3.6

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (FW1017A)
254 อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2602/54

วันที่รับตัวอย่าง : 26 สิงหาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 26 สิงหาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวทรงสุดา พรหมทอง

วันที่ทำการทดสอบ : 26-28 สิงหาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างถึง WI-RES-CHNS-O-001

เครื่องมือทดสอบ : CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy

เทคนิคการทดสอบ : Dynamic Flash Combustion

สภาวะการทดสอบ :

Left Furnace temperature :	900 °C	Oven temperature :	65 °C
Carrier flow :	130 mL/min	Reference flow :	100 mL/min
Oxygen flow :	250 mL/min		

รายละเอียดตัวอย่าง : ผงเนื้อเดียวกัน **จำนวน :** 30 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ (%RSD)		
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน
1	Fish (Pre-test)	10.32 (1.87)	40.06 (1.22)	5.91 (1.16)
2	Fish tank 1 (Post-test)	8.94 (1.56)	45.71 (1.75)	6.70 (1.64)
3	Fish tank 3 (Post-test)	9.77 (1.44)	46.19 (1.19)	6.74 (0.90)
4	Fish tank 4 (Post-test)	9.40 (0.27)	39.23 (0.27)	5.75 (0.27)
5	Fish tank 5 (Post-test)	9.87 (0.80)	41.27 (1.24)	5.96 (1.70)
6	Fish tank 6 (Post-test)	10.21 (1.91)	43.93 (1.04)	6.42 (0.73)
7	Fish tank 7 (Post-test)	9.71(1.51)	44.09 (1.43)	6.50 (1.25)
8	Fish tank 8 (Post-test)	9.26 (1.58)	48.31 (1.84)	7.02 (1.75)
9	Fish tank 9 (Post-test)	10.35 (1.76)	41.18 (0.79)	6.00 (1.21)
10	Biofloc attachment clay tank 1	2.39 (2.19)	26.27 (1.12)	3.41 (2.96)

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

ผลการทดสอบ : (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ (%RSD)		
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน
11	Biofloc attachment clay tank 2	2.23 (1.89)	23.41 (1.62)	2.92 (1.65)
12	Biofloc attachment clay tank 3	2.08 (0.63)	22.37 (1.72)	2.89 (1.29)
13	Biofloc attachment clay tank 4	2.70 (0.77)	23.53 (1.37)	3.26 (2.27)
14	Biofloc attachment clay tank 5	2.50 (1.74)	22.02 (1.81)	3.02 (1.68)
15	Biofloc attachment clay tank 6	2.76 (2.49)	22.72 (1.66)	3.16 (2.67)
16	Biofloc fish tank 1	3.23 (0.45)	25.57 (1.94)	3.52 (0.49)
17	Biofloc fish tank 2	3.38 (1.69)	25.44 (1.98)	3.49 (1.30)
18	Biofloc fish tank 3	3.49 (0.85)	27.27 (1.76)	3.81 (1.39)
19	Biofloc fish tank 4	3.40 (1.52)	25.96 (1.16)	3.66 (1.29)
20	Biofloc fish tank 5	2.86 (1.28)	22.39 (1.14)	3.07 (2.25)
21	Biofloc fish tank 6	3.26 (0.15)	24.56 (0.56)	3.45 (0.20)
22	Biofloc fish tank 7	3.96 (0.55)	35.61 (0.56)	4.88 (0.67)
23	Biofloc fish tank 8	3.58 (1.89)	32.17 (0.39)	4.53 (0.02)
24	Biofloc fish tank 9	3.05 (0.29)	31.88 (0.53)	4.31 (0.43)
25	feed	5.40 (1.22)	42.79 (0.40)	6.35 (0.58)
26	Expanded clay (Pre-test)	น้อยกว่า 0.01	0.08 (2.54)	0.04 (1.06)
27	Expanded clay (Post-test) set 1	น้อยกว่า 0.01	0.07 (1.20)	0.04 (1.54)
28	Expanded clay (Post-test) set 2	น้อยกว่า 0.01	0.08 (4.14)	0.03 (5.70)
29	Chinese cabbage 7 days	1.39 (2.08)	33.11 (1.42)	4.84 (1.88)
30	Chinese cabbage 35 days	4.66 (0.46)	30.85 (1.00)	4.51 (1.07)

ข้อมูลดิบถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ 2602-54
LOQ=ขีดจำกัดต่ำสุดของการทดสอบเชิงปริมาณต่ำกับ 0.01 %
*RSD = % Relative standard deviation

(นายเวียงชัย จงศรีรัตนกุล)
ผู้ช่วยหัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์
31 สิงหาคม 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (FW1017A)
254 อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2623/54

วันที่รับตัวอย่าง : 29 สิงหาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 29 สิงหาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นางสาวณิชนันทน์ นันทกาญล

วันที่ทำการทดสอบ : 20 -25 กันยายน 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างถึง WI-RES-ICP-OES-001

เครื่องมือทดสอบ : Optical Emission Spectrometer, Optima 4300 DV, Perkin Elmer Instruments, USA

เทคนิคการทดสอบ : Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometr

สภาวะการทดสอบ : ความยาวคลื่น P = 214.914 nm

รายละเอียดตัวอย่าง : ผงเนื้อเดียวกัน **จำนวน :** 30 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณฟอสฟอรัส (mg/kg)	%RSD
1	fish (Pre-test)	5703.38	1.50
2	fish tank 1 (Post-test)	4143.59	2.67
3	fish tank 3 (Post-test)	4981.79	3.25
4	fish tank 4 (Post-test)	6121.88	2.59
5	fish tank 5 (Post-test)	5727.61	3.61
6	fish tank 6 (Post-test)	5414.20	3.23
7	fish tank 7 (Post-test)	5151.38	1.79
8	fish tank 8 (Post-test)	4082.25	2.20
9	fish tank 9 (Post-test)	5860.45	0.94
10	Biofloc attachment clay tank 1	3940.99	1.07
11	Biofloc attachment clay tank 2	3869.99	2.21
12	Biofloc attachment clay tank 3	3898.06	3.48
13	Biofloc attachment clay tank 4	5444.48	6.93
14	Biofloc attachment clay tank 5	5757.89	0.42
15	Biofloc attachment clay tank 6	6012.70	0.69
16	Biofloc fish tank 1	12691.64	4.29

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

ผลการทดสอบ : (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณฟอสฟอรัส (mg/kg)	%RSD
17	Biofloc fish tank 2	7151.38	4.39
18	Biofloc fish tank 3	10514.95	1.10
19	Biofloc fish tank 4	9162.52	3.39
20	Biofloc fish tank 5	10399.94	1.48
21	Biofloc fish tank 6	7630.51	3.41
22	Biofloc fish tank 7	6236.92	6.03
23	Biofloc fish tank 8	7905.12	0.47
24	Biofloc fish tank 9	7356.17	5.55
25	feed	2875.28	1.24
26	Expanded clay (Pre-test)	79.95	7.64
27	Expanded clay (Post-test) set 1	94.59	7.17
28	Expanded clay (Post-test) set 2	64.02	3.50
29	chinese cabbage 7 days	1292.22	7.03
30	chinese cabbage 35 days	967.55	4.16

* ขีดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOQ): P = 0.625 mg/L
* ข้อมูลถูกจัดเก็บในไฟล์: 2623-54
* % RSD = Relative Standard Deviation

(นางรุสนี กุลวิจิตร)
หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์
25 กันยายน 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์ เกิดเมื่อวันที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดชลบุรี ได้รับการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนมกุฎเมืองราชวิทยาลัย จังหวัดระยอง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี เมื่อปีการศึกษา 2551 และได้รับการคัดเลือกเข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 โดยขณะที่ศึกษานั้นได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2554 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต และทุนวิจัยเพิ่มเติมจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ FW1017A)

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

เอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์, สรวิศ เผ่าทองศุข, และวิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี. (2554) บทบาทของตะกอนแขวนลอยต่อคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลานิลระบบปิด. **การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22**, ณ อาคารวชิรานุสรณ์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร, วันที่ 6 - 7 ตุลาคม 2554 (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)

Aeknarin Thanakitpairin, Wiboonluk Pungrasmi and Sorawit Powtongsook. (2012) Nitrogen and Phosphorus Removal in the Recirculating Aquaculture System by Baked Clay Beads and Chinese Cabbage Tank. **11th National Environmental Conference**, Phowadol Resort & Spa, Chiang Rai, Thailand. March 21 – 23, 2012. (Oral presentation)