



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา สำหรับพื้นที่อยู่อาศัย

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ มณีพงศ์

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

มกราคม 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา
สำหรับพื้นที่อยู่อาศัย

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ มณีพงศ์
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

สนับสนุนโดย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ชื่อโครงการ : การพัฒนาระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาสำหรับพื้นที่อยู่อาศัย
(Development of an Aquaponic System for Urban Area)

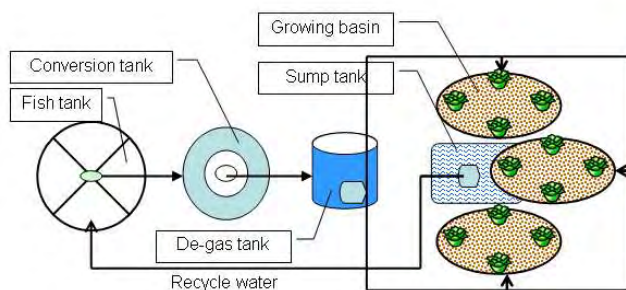
ชื่อผู้วิจัย : รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ มณีพงศ์

ชื่อที่ปรึกษาโครงการ : รองศาสตราจารย์ ดร. กมล เลิศรัตน์

ระยะเวลาดำเนินการ : 1 มกราคม พ.ศ. 2556 – 31 ธันวาคม พ.ศ. 2556

การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมและสังคมของโลก ทำให้ไม่เอื้อต่อการทำการเกษตรแบบดั้งเดิม และมนุษย์จำเป็นต้องเตรียมพร้อมเพื่อเผชิญภัยธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มเกิดบ่อยขึ้นและรุนแรงมากขึ้น การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา (aquaponics) เป็นระบบนิเวศจำลอง ที่คิดค้นขึ้นจากการนำเทคโนโลยีการเลี้ยงปลาในภาชนะ มาเชื่อมโยงกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน เพื่อก่อให้เกิดการเกื้อกูลระหว่างกัน ลดการใช้น้ำและลดการปล่อยน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา ในขณะเดียวกันก็สามารถลดการใช้น้ำในการปลูกพืชได้ด้วย เกษตรกรสามารถได้รับประโยชน์ ทั้งจากการเลี้ยงปลาและปลูกพืช

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบ ติดตั้ง และทดสอบระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่อยู่อาศัย ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบปลูกเลี้ยง 2 ระบบ สำหรับปลูกผักกินใบ (รูปที่ 1) และสำหรับปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร (รูปที่ 2) ระบบทั้งสองมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ถังเลี้ยงปลา ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และภาชนะปลูกผัก ถังเลี้ยงปลาออกแบบเป็นรูปกรวยความจุ 500 ลิตร ระบายของเสียออกทางก้นกรวย ภายในถังแปลงสภาพฯ บรรจุซากปะการังเพื่อใช้เป็นวัสดุยึดเกาะของจุลินทรีย์ และทำหน้าที่ควบคุม pH ของสารละลายภายในระบบไปด้วยในขณะเดียวกัน ระบบปลูกผักกินใบใช้ภาชนะปลูก 3 ภาชนะ เนื่องจากผักมีอายุเก็บเกี่ยวสั้นกว่าเวลาที่ใช้เลี้ยงปลา จึงต้องปลูกผักสลับกัน เพื่อให้มีผักต่างอายุอยู่ในระบบตลอดเวลา ส่วนระบบปลูกผักกินผลมีภาชนะปลูกเพียงภาชนะเดียว



รูปที่ 1 ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาสำหรับปลูกผักกินใบ โครงสร้างของระบบ (ซ้าย) และการทดสอบปลูกผักกินใบต่างอายุในแต่ละภาชนะ (ขวา)



รูปที่ 2 ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาสำหรับปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร โครงสร้างของระบบ (ซ้าย) และการทดสอบปลูกมะเขือเทศร่วมกับกะเพรา (ขวา)

การทดลองปลูกเลี้ยงในระบบที่ออกแบบสำหรับปลูกผักกินใบ โดยการเลี้ยงปลานิล (*Nile tilapia* : *Oreochromis niloticus*) จำนวน 50 ตัว เป็นเวลา 17 สัปดาห์ โดยไม่ถ่ายเทสารละลายออกจากระบบเลย เลี้ยงโดยใช้อาหารสำเร็จรูปที่ผู้ผลิตรับรองว่า มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 30 % ไขมันไม่น้อยกว่า 3 % และกากไม่มากกว่า 8 % เติมสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก (11.3% Fe-DTPA) 15 mg/L และสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุอาหารจุลภาคผสม (DTPA chelated Fe 5.6%, Mn 2.0%, Cu 0.2%, Zn 1.1%, B 0.9%, Mo 0.2%) 15 mg/L ผลการทดลองพบว่า ปลาสามารถเจริญเติบโตได้ดี น้ำหนักเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเดือนแรกจาก 50.8 กรัม/ตัว เป็น 161.5 กรัม/ตัว ในเดือนถัดไป แต่หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นลดลง อัตราการกินอาหารของปลาเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 9 สัปดาห์แรก แต่กลับลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 10 - 11 เนื่องจากอัตราการหมุนเวียนสารละลายลดลงอย่างมากในช่วงดังกล่าว อัตราการกินอาหารเพิ่มขึ้นอีกครั้ง หลังจากแก้ไขปัญหาคือลดต้น และเพิ่มอัตราการหมุนเวียนสารละลายให้สูงขึ้น อัตราการหมุนเวียนสารละลายส่งผลต่อความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 และอัตราการกินอาหารของปลา เมื่อความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 สูงกว่า 2 mg/L ทำให้ปลากินอาหารลดลงอย่างมาก และปลากินอาหารได้ปกติเมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mg/L อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขดังกล่าว คือ ไม่น้อยกว่าสองเท่าของปริมาตรถังเลี้ยงในแต่ละชั่วโมง การปลูกผัก 4 ชนิด คือ ผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า พบว่า ผักเจริญเติบโตได้ดีในระยะ 8 สัปดาห์แรก แม้ว่าการเจริญเติบโตจะช้ากว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน หลังจากนั้น ผักแสดงอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรง และแคระแกร็น การสังเกตอาการและการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลาย พบว่า ผักขาดไนโตรเจน โพแทสเซียม เหล็ก และสังกะสี ในขณะที่ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความต้องการใช้ของผักหรือสะสมเพิ่มขึ้นในระบบ การทดลองบ่งชี้ว่า ผักต้องการเหล็กและสังกะสีเดือนละ 206.2 และ 20.6 mg/m^2 ตามลำดับ ผักบุ้งมีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด รองลงไปคือ ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า ตามลำดับ ความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นจาก 6.0 เข้าสู่สมดุลในเวลา 4

สัปดาห์ หลังจากนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.9 - 7.2 ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการของระบบโดยไม่ต้องเติมกรดหรือด่างเลย แสดงให้เห็นว่า ชากปะการังสามารถควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายในระบบได้ดี สัดส่วนของธาตุอาหารพืชที่เป็นองค์ประกอบในอาหารปลา ไม่สอดคล้องกับความต้องการของผัก และมีความเข้มข้นของโซเดียมสูง ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุให้ผักขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรงหลัง 8 สัปดาห์ ความเข้มข้นของเหล็กในสิ่งขับถ่ายจากปลาสูงถึง 2,786 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) แต่ไม่เพียงพอสำหรับผัก เหล็กในสิ่งขับถ่ายน่าจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายจึงไม่เป็นประโยชน์กับผัก ความเข้มข้นและสมดุลของธาตุอาหารจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้สามารถปลูกผักได้อย่างต่อเนื่อง

การทดลองปลูกเลี้ยงในระบบที่ออกแบบสำหรับปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร ไม่ประสบความสำเร็จ การทดลองเลี้ยงครั้งแรก ผู้วิจัยได้ปล่อยปลาดุกจำนวน 50 ตัว ลงสู่ถังเลี้ยง แต่หลังจากนั้นปลาทยอยตายอย่างรวดเร็ว จนเหลือปลาอยู่เพียง 4 ตัว ในสัปดาห์ที่สอง คาดว่าปลาตายเนื่องจากได้รับสารพิษที่ตกค้างอยู่ในระบบ ผู้วิจัยจึงตัดสินใจยุติการทดลอง หลังจ้างล้างระบบและจำลองเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ นำปลานิลจำนวน 54 ตัว มาปล่อยลงสู่ถังเลี้ยง ปลาเริ่มตายหลังจากเลี้ยงได้ 5 วัน และตายเพิ่มขึ้นทุกวันเหมือนครั้งแรก คาดว่าการตายครั้งนี้เกิดจากโรคระบาด ผู้วิจัยจึงยุติการทดลอง

ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลามีความซับซ้อนด้านการจัดการธาตุอาหาร และเสี่ยงต่อการล่มสลาย ผู้ปลูกเลี้ยงจำเป็นต้องมีความรู้และทักษะทั้งการเลี้ยงปลาและปลูกพืช ดังนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้มีข้อมูลมากเพียงพอ และได้ระบบที่มีเสถียรภาพเหมาะต่อการนำไปใช้



บทคัดย่อ

การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาเป็นระบบนิเวศจำลอง ที่คิดค้นขึ้นเพื่อประหยัดการใช้น้ำ ลดปริมาณน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา ลดการใช้น้ำในการปลูกพืช และเกษตรกรได้ประโยชน์ทั้งจากพืชและปลา ระบบที่ทำงานอย่างสมบูรณ์จึงสามารถติดตั้งในพื้นที่อยู่อาศัยได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษ ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบปลูกเลี้ยงที่มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ถังเลี้ยงปลา ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง และภาชนะปลูกผัก ทดลองเลี้ยงปลานิล (Nile tilapia : *Oreochromis niloticus*) จำนวน 50 ตัว ในถังเลี้ยงปริมาตร 500 ลิตร เป็นเวลา 17 สัปดาห์ โดยไม่ถ่ายเทสารละลายออกจากระบบเลย เลี้ยงโดยใช้อาหารปลาที่ผู้ผลิตรับรองว่า มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 30 % ไขมันไม่น้อยกว่า 3 % และกากไม่มากกว่า 8 % เติมสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก (11.3% Fe-DTPA) 15 mg/L และสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุอาหารจุลภาคผสม (DTPA chelated Fe 5.6%, Mn 2.0%, Cu 0.2%, Zn 1.1%, B 0.9%, Mo 0.2%) 15 mg/L ผลการทดลองพบว่า ปลาสามารถเจริญเติบโตได้ดี อัตราการหมุนเวียนสารละลายส่งผลต่อความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 และอัตราการกินอาหารของปลา เมื่อความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 สูงกว่า 2 mg/L ทำให้ปลากินอาหารลดลงอย่างมาก และปลากินอาหารได้ปกติเมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mg/L อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขดังกล่าว คือ ไม่น้อยกว่าสองเท่าของปริมาตรถังเลี้ยงในแต่ละชั่วโมง การปลูกผัก 4 ชนิด คือ ผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า หมุนเวียนกันพบว่า ผักเจริญเติบโตได้ดีในระยะ 8 สัปดาห์แรก แม้อัตราการเจริญเติบโตจะช้ากว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน หลังจากนั้น ผักแสดงอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรงและแคระแกร็น การสังเกตอาการและการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุในสารละลาย พบว่า ผักขาดไนโตรเจน โพแทสเซียม เหล็ก และสังกะสี ในขณะที่ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน คลอรีน และโซเดียม มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความต้องการใช้ของผักหรือสะสมเพิ่มขึ้นในระบบ การทดลองบ่งชี้ว่า ผักต้องการเหล็กและสังกะสีเดือนละ 206.2 และ 20.6 mg/m² ตามลำดับ ผักบุ้งมีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด รองลงไปคือ ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า ตามลำดับ ความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นจาก 6.0 เข้าสู่สมดุลในเวลา 4 สัปดาห์ หลังจากนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.9 - 7.2 ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการของระบบโดยไม่ต้องเติมกรดหรือด่างเลย แสดงให้เห็นว่า ซากปะการังสามารถควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายในระบบได้ดี สัดส่วนของธาตุอาหารพืชที่เป็นองค์ประกอบในอาหารปลา ไม่สอดคล้องกับความต้องการของผัก และมีความเข้มข้นของโซเดียมสูง ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุให้ผักขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรงหลัง 8 สัปดาห์ ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลามีความซับซ้อนด้านการจัดการธาตุอาหารและยากต่อการดูแลระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ระบบที่มีเสถียรภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้

คำสำคัญ : ธาตุอาหารพืช การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ไฮโดรโปนิคส์ การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา

Abstract

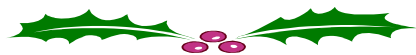
Aquaponic is an artificial ecosystem, which is invented in order to reduce water requirement and waste water from aquaculture. On the same time, it can reduce fertilizer demand for crop cultivation and farmers can acquire benefit both from crops and fishes. A complete system can be installed in urban area without any cause of pollution. A system comprises of three major components: fish tank, nutrient conversion and pH control tank, and growing basin; was installed and tested. Fifty fishes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) were cultivated in the 500 L tank for 17 weeks with completely recycle of solution. The fishes were fed manually with floating pellet feed containing not less than 30 % crude protein, not less than 3 % lipid and not more than 8 % fiber. Each 15 mg/L of Fe-DTPA (11.3 % Fe) and DTPA chelated micronutrients (Fe 5.6%, Mn 2.0%, Cu 0.2%, Zn 1.1%, B 0.9%, Mo 0.2%) were added. All fishes were survival, and fairly growth. Flow rate of the solution affected concentration of NH_4/NH_3 and feed consumption. The fishes consumed very little feed when the concentration was higher than 2 mg/L. The consumption rapidly increased when the concentration was lower than 1 mg/L. The solution should be re-circulated double of fish tank volume in an hour to achieve optimum condition for fish. Water spinach, Daitokyo Bekana, Caisim and Chinese Keli were cultivated alternatively. All of the vegetables grew well only for the first 8 weeks, although their growing rates were lower than those growing by hydroponics. After that they showed severe nutrient deficiency and stunning. Visual observation and solution analysis indicated that the deficiency caused from N, K, Fe and Zn. P, Ca, Mg S, Cl and Na tended to reach equilibrium or accumulation in the system. The vegetables required Fe and Zn monthly of 206.2 and 20.6 mg/m², respectively. Water spinach was the fastest growth and followed by Daitokyo Bekana, Caisim and Chinese Keli, respectively. pH of the solution increased from 6.0 to equilibrium within 4 weeks, and varied between 6.9 - 7.2 after that. The ideal pH can be maintained using dead coral without addition of any chemicals. Ratios of plant nutrients in fish feed differed from vegetable requirement. High Na content in the feed may contributed to severe nutrient imbalance in the solution. Aquaponic is a complicated system for nutrient management, and difficult to maintain. It has to be studied in more detail for a stable system.

Keyword : plant nutrition, soilless culture, hydroponics, aquaponics

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
	● แนวคิดและความสำคัญ	1
	● การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน	1
	● การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา	5
	● วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
	● กิจกรรมของโครงการ	8
	● ผลที่คาดว่าจะได้รับ	8
	● การผลักดันสู่การใช้ประโยชน์	9
	● เอกสารอ้างอิง	9
บทที่ 2	การออกแบบระบบ	
	● โครงสร้างของระบบ	11
	● ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ	14
	● องค์ประกอบของระบบปลูกผักกินใบ	17
	● การทดสอบการทำงานของระบบปลูกผักกินใบ	22
	● องค์ประกอบของระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร	23
	● การทดสอบการทำงานของระบบปลูกผักกินผลและผักสมุนไพร	27
	● เอกสารอ้างอิง	27
บทที่ 3	การทดสอบการปลูกเลี้ยง	
	● การทดสอบเลี้ยงปลาระบบปลูกผักกินใบ	28
	● การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารละลายในระบบปลูกผักกินใบ	32
	● การทดสอบปลูกผักในระบบปลูกผักกินใบ	44
	● การทดสอบปลูกเลี้ยงระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร	51
บทที่ 4	สรุป	
	● สรุป	53

ภาคผนวก 1 : สูตรสารละลายธาตุอาหารเพื่อการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน WU_NS07	55
ภาคผนวก 2 : วิธีวิเคราะห์อาหารปลา สิ่งขับถ่ายจากปลา และพืช	56
ภาคผนวก 3 : วิธีเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์สารละลายในระบบ	58
ภาคผนวก 4 : ส่วนประกอบและต้นทุนของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา : ระบบปลูกผักกินใบ (System 01)	60
ภาคผนวก 5 : ส่วนประกอบและต้นทุนของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา : ระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร (System 02)	61
ภาคผนวก 6 : ประมาณการผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของระบบปลูกผักกินใบ	62



บทที่ 1 บทนำ

1. แนวคิดและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมและสังคมของโลกหลายอย่าง ไม่เอื้อต่อการทำการเกษตรแบบดั้งเดิม เช่น พื้นที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกน้อยลง คุณภาพของดินเสื่อมโทรมลง ผู้บริโภคส่วนใหญ่อยู่ในเมืองซึ่งขาดแคลนพื้นที่เพาะปลูก การขนส่งสินค้าเกษตรจากพื้นที่ห่างไกลเข้าสู่เมืองมีค่าใช้จ่ายสูง ความต้องการบริโภคมีต่อเนื่องตลอดทั้งปีในขณะที่เพาะปลูกได้ดีเพียงบางฤดูกาล ราคาพลังงานและแรงงานสูงขึ้น ไม่เอื้อต่อการจับสัตว์น้ำแบบไล่ล่า การเกิดภาวะโลกร้อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจไม่เอื้อต่อการเกษตรแบบดั้งเดิม การเกิดภัยธรรมชาติขนาดใหญ่ที่ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนอาหารอย่างรุนแรงในบางครั้ง และการขยายพื้นที่ปลูกพืชอุตสาหกรรมและพืชพลังงานที่ส่งผลให้พื้นที่ปลูกพืชอาหารมีน้อยลง เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้ผลักดันให้มนุษย์จำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอาหาร ที่สอดคล้องกับสภาพสังคมและสิ่งแวดล้อมใหม่ รวมทั้งเพื่อเตรียมพร้อมเผชิญภัยธรรมชาติขนาดใหญ่ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ปัจจุบันจึงมีแนวคิดหลายอย่างในด้านการผลิตอาหาร เพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เช่น โครงการ “Food City” ของดูไบ เพื่อสร้างอาคารขนาดใหญ่เพื่อการผลิตอาหารเลี้ยงประชากรทั้งเมืองหรือทั้งประเทศ โครงการ “Food Supermarket” เพื่อผลิตและขายสินค้าอาหารในอาคารเดียวกันในเขตเมืองใหญ่ โครงการ “Plant Factory” เพื่อผลิตพืชด้วยเทคโนโลยีเดียวกับอุตสาหกรรม ทำให้สามารถผลิตพืชปริมาณมากๆ ได้ในเวลาที่ต้องการ โดยใช้พื้นที่และแรงงานมนุษย์น้อยลง

การปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลาเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมอย่างหนึ่ง เนื่องจากไม่ต้องใช้ดิน สามารถปลูกเลี้ยงในพื้นที่อยู่อาศัยหรืออาคารขนาดใหญ่ได้ ให้ผลผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปีทั้งพืชและปลา ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษ รวมทั้งอาจเอื้อประโยชน์ให้สภาพแวดล้อมน่าอยู่อาศัยมากขึ้น และโปรตีนจากปลาให้คุณค่าเชิงโภชนาการสูงกว่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์ แต่เทคโนโลยีด้านนี้ยังมีการวิจัยน้อยสำหรับประเทศไทย ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกเลี้ยงที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยจึงมีความจำเป็น นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีวัสดุธรรมชาติหลายอย่างที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นส่วนประกอบของระบบปลูกได้ เช่น เปลือกมะพร้าว และยางพารา เป็นต้น จึงน่าจะช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผลผลิตมะพร้าวและยางพาราได้เป็นอย่างดี

2. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (soilless culture) ดูเหมือนเป็นเทคโนโลยีแปลกใหม่และทันสมัย แต่แท้จริงมนุษย์รู้จักปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมานานนับพันปีแล้ว ประมาณ 2,500 ปีมาแล้ว มีหลักฐานว่ากษัตริย์เนบูซาดเนสซาร์ที่ 2 (King Nebuchadnezzar II) แห่งอาณาจักรบาบิโลเนียได้สร้างสวนแขวน (“Hanging Gardens”) ขึ้นทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำยูเฟรติส หลายร้อยปีก่อนคริสตกาลชาวอียิปต์โบราณรู้จักปลูกพืชบนพื้นทรายแล้วใช้น้ำจากคอกสัตว์รด ในช่วงคริสตศตวรรษที่ 1 สมัยจักรพรรดิ Tiberius มีหลักฐานว่าชาวโรมันสามารถ

ปลูกแตงกวานอกฤดูสำหรับจักรพรรดิได้ โดยปลูกในโรงเรือนที่มุงด้วยหินโปรงแสง (สันนิษฐานว่าเป็นไมกา) ในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 12-13 มีบันทึกของมาร์โคโพลโล ชาวยุโรปที่เดินทางไปประเทศจีนว่า ได้พบเห็นสวนลอยน้ำ (“Floating Gardens”) ในประเทศจีน สันนิษฐานว่า การปลูกพืชโดยวิธีนี้น่าจะมีมาก่อนที่มาร์โคโพลโลจะเดินทางไปพบเห็นหลายร้อยปีมาแล้ว ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 14 ชาว Aztecs ซึ่งตั้งถิ่นฐานอยู่บริเวณทะเลสาบ Tenochtitlan (ใกล้กรุงเม็กซิโกซิตี ประเทศเม็กซิโกในปัจจุบัน) ได้สร้างสวนสำหรับปลูกผักและไม้ดอกขึ้นบนแพที่พวกเขาเรียกว่า “Chinampas” เนื่องจากพื้นที่บริเวณนั้นเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ ทำให้ขาดแคลนพื้นดินสำหรับปลูกพืช แพที่พวกเขาสร้างขึ้นทำจากพืชจำพวกกกและอ้อปูด้วยตะกอนดินจากก้นทะเลสาบ การปลูกพืชด้วยวิธีนี้ไม่สามารถเรียกว่า “การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน” เนื่องจากพืชได้รับธาตุอาหารจากดินที่อยู่บนแพ เพียงแต่เป็นวิธีปลูกที่แตกต่างไปจากการปลูกตามปกติในยุคนั้น (Rorabaugh, 2006; Jensen, 2006; Hydroponicsonline, 2006; Department of Agriculture, 2006; Rahman, 2002; Nicholls, 1990) การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินยุคโบราณเหล่านี้ ไม่มีบันทึกรายละเอียดเพียงพอให้ผู้คนยุคหลังได้ศึกษา

ปัจจุบันยังคงมีการปลูกพืชบนแพหญ้าในพื้นที่ชุ่มน้ำ (wet land) หลายแห่งของโลก เช่น ที่ทะเลสาบอินเล รัฐฉาน ประเทศพม่า เกษตรกรนำวัชพืชน้ำมาสร้างแพ ยึดแพด้วยไม้ไผ่ แล้วปลูกผักชนิดต่างๆ บนแพ โดยไม่ต้องรดน้ำหรือใส่ปุ๋ย การปลูกที่มีเอกลักษณ์นี้ ทำให้สถานที่แห่งนี้กลายเป็นสถานที่ท่องเที่ยวเชิงเกษตรโดยธรรมชาติ (รูปที่ 1-1) เกษตรกรในประเทศบังคลาเทศประสบปัญหาน้ำท่วมเป็นเวลานานในแต่ละปี จึงนำเอาผักตบชวามาสร้างแพปลูกผักต่างๆ ริมฝั่งแม่น้ำคล้ายกับการปลูกที่ทะเลสาบอินเล (รูปที่ 1-2) การปลูกทั้งสองแบบนี้อาจเรียกว่า การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา (aquaponics) ก็ได้ เพียงแต่ปลาที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเป็นปลาธรรมชาติที่เกษตรกรเพียงแต่จับมาบริโภค และพืชที่ปลูกได้รับธาตุอาหารจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์อื่นๆ ที่ไม่ใช่สิ่งขับถ่ายจากปลาเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 1-1 การปลูกผักบนแพหญ้าที่ทะเลสาบอินเล ประเทศพม่า เกษตรกรเก็บรวบรวมวัชพืชน้ำมาสร้างแพ (ซ้าย) นำดินก้นทะเลสาบมาคลุม ยึดแพด้วยไม้ไผ่ แล้วปลูกผักชนิดต่างๆ (ที่มา <http://inlelake-myanmar.com/interesting-places.html>)



รูปที่ 1-2 การนำผักตบชวามาสร้างแพ แล้วปลูกด้วยดินตะกอนเพื่อใช้ปลูกผักชนิดต่างๆ ในประเทศบังกลาเทศ

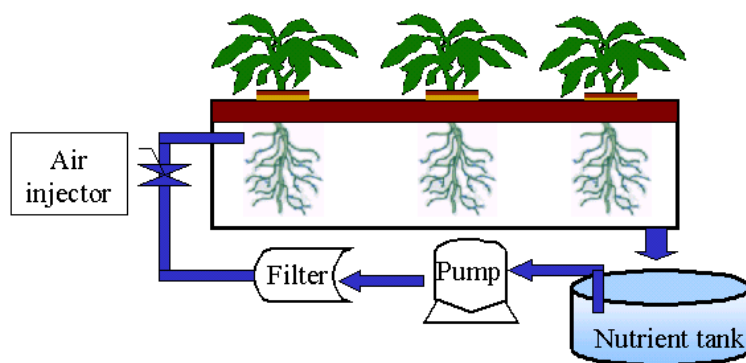
การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในเชิงวิทยาศาสตร์ เริ่มต้นขึ้นเมื่อมีการศึกษาธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช และมีการพัฒนาสูตรสารละลายธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง โดยนักวิทยาศาสตร์ในยุโรปและอเมริกาหลายคน Hoagland และ Arnon (1950) ได้รับการยอมรับว่าเป็นผู้ที่ประสบความสำเร็จในการพัฒนาสูตรสารละลาย เนื่องจากสูตรสารละลายของเขาประกอบขึ้นด้วยธาตุอาหารจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชอย่างครบถ้วน สามารถปลูกพืชได้จริงจนถึงระยะเก็บเกี่ยว และเป็นต้นแบบของสูตรสารละลายในเวลาต่อมา การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินสามารถจำแนกได้เป็น 3 ระบบ คือ

2.1 ระบบรากแช่ (hydroponics) : ระบบรากแช่เป็นการปลูกพืชโดยให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหาร แล้วเติมอากาศลงไปด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เทคนิคการปลูกมีทั้งให้รากพืชแช่ในสารละลายลึก (deep-flow technique) ให้รากพืชสัมผัสสารละลายที่ไหลเป็นฟิล์มบางๆ (nutrient-film technique) และให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายเพียงบางส่วนตามระยะการเจริญเติบโตของพืช (dynamic root floating technique) เป็นต้น โรงงานพืชขนาดใหญ่มักเลือกใช้ระบบนี้ เนื่องจากประหยัดแรงงาน (Jones, 1997; Schwarz, 1995; Mason, 2002; Roberto, 2004) การปลูกระบบนี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ร่วมกับการเลี้ยงปลา แต่จำเป็นต้องดัดแปลงให้มีตัวย่อยสลาย (biofilter) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลาเพิ่มเติมเข้าไปในระบบ

รูปที่ 1-3 องค์ประกอบของการปลูก

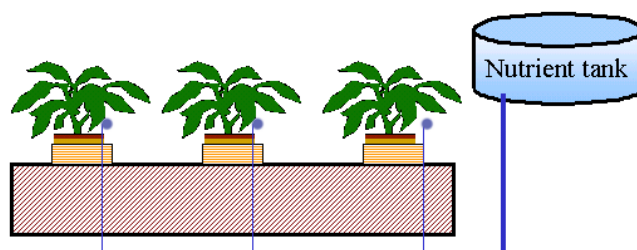
พืชระบบรากแช่ แบบ

หมุนเวียนสารละลาย



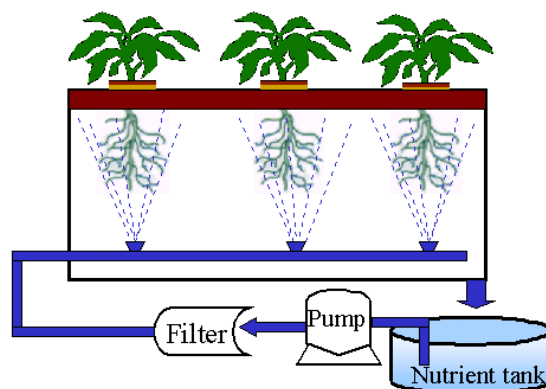
2.2 ระบบรากยัด (aggregate culture) : ระบบรากยัดมีวิธีปลูกคล้ายกับการปลูกโดยใช้ดิน และง่ายต่อการจัดการสารละลาย วัสดุปลูกมีหลายชนิด ได้แก่ กรวด ทราช เพอร์ไลต์ เวอร์มิคูไลต์ ฟองน้ำสังเคราะห์ ร็อควูล อีฐเม็ด ถ่าน แกลบ ขุยมะพร้าว เปลือกไม้ และขี้เลื่อย เป็นต้น ระบบนี้นิยมใช้ปลูกพืชที่มีอายุเก็บเกี่ยวยาวนาน เช่น มะเขือเทศ แตงกวา แตงแคนตาลูป และสตรอเบอรี่ เป็นต้น และเป็นระบบที่ไม่ต้องการสารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูง การจ่ายสารละลายไปยังเครื่องปลูกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น จ่ายแบบหยด (drip irrigation) จ่ายเป็นคาบเวลา จ่ายให้ท่วมแล้วระบายออก (flood and drain) และจ่ายได้วัสดุ (wick irrigation) เป็นต้น (Jones, 1997; Schwarz, 1995; Mason, 2002; Roberto, 2004) ระบบรากยัดจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ร่วมกับการเลี้ยงปลา โดยจะต้องเลือกชนิดของวัสดุที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของสารละลายมากนัก ในกรณีที่ต้องการหมุนเวียนสารละลายกลับไปเลี้ยงปลาอีกครั้ง

รูปที่ 1-4 องค์ประกอบของการปลูกพืชระบบรากยัด



2.3 ระบบรากแขวน (aeroponics) : ระบบรากแขวนคิดค้นขึ้นโดย Dr. Franco Massantini แห่งมหาวิทยาลัย Pia ประเทศอิตาลี ระบบนี้ปลูกโดยให้รากของพืชแขวนอยู่ในอากาศ แล้วพ่นสารละลายเป็นละอองขนาดเล็ก (mist) หรือหมอก (fog) ไปยังรากพืช ระบบนี้ใช้สารละลายน้อย แต่สิ้นเปลืองพลังงานมาก ทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการปลูกพืชเพื่อการค้า แต่เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ต้องพึ่งพาแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชในอวกาศ นอกจากนี้ยังต้องการสารละลายที่ปราศจากสารแขวนลอย เพื่อลดปัญหาการอุดตันของหัวพ่น (Jones, 1997; Schwarz, 1995; Mason, 2002; Roberto, 2004) ระบบนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ร่วมกับการเลี้ยงปลา

รูปที่ 1-5 องค์ประกอบของการปลูกพืชระบบรากแขวน



3. การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา

การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาเป็นแนวคิดที่น่าจะเกิดขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1985 โดยองค์การการบินและอวกาศ (NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดทำโครงการ Biosphere II ขึ้นที่มลรัฐอริโซนา เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการย้ายถิ่นฐานของมนุษย์ไปยังดาวดวงอื่น ทำให้จำเป็นต้องหาวิธีการใช้น้ำอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากโครงการสิ้นสุดลงแล้ว นักวิจัยจำนวนไม่น้อยยังคงให้ความสนใจกับแนวคิดนี้ และนำมาประใช้กับสถานการณ์ต่างๆ รวมทั้งทำการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคต่างๆ อย่างต่อเนื่อง

การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาเป็นแนวคิดที่ต้องการใช้พืชมาปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ใช้เลี้ยงปลา ในขณะเดียวกันพืชก็ได้รับธาตุอาหารที่เกิดจากการสลายตัวของของเสียที่เกิดจากปลา ทำให้สามารถลดชนิดและปริมาณของปุ๋ยลงได้ หรืออาจไม่จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยเลย ปลากินอาหารที่เป็นสารอินทรีย์และขับถ่ายของเสียส่วนหนึ่งในรูปสารอินทรีย์ ในขณะที่พืชต้องการอาหารที่เป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้น จึงต้องมีกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์ก่อน จึงจะสามารถนำไปปลูกพืชได้ ความต้องการอาหารที่แตกต่างกันนี้ ทำให้จำเป็นต้องปรับปริมาณและสัดส่วนของสารอาหารและธาตุอาหารให้สมดุล เพื่อให้ทั้งปลาและพืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ สารละลายที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี ควรมีสสมบัติและความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 1-1

อาหารปลาโดยทั่วไปประกอบด้วยโปรตีน 18 - 50 % คาร์โบไฮเดรต 15 - 20 % ไขมัน 10 - 25 % เกล็ดน้อยกว่า 8.5 % ความชื้นน้อยกว่า 10 % และมีวิตามินและแร่ธาตุอีกเล็กน้อย ปลาที่เลี้ยงในภาชนะไม่สามารถหาอาหารตามธรรมชาติได้ ผู้เลี้ยงจำเป็นต้องให้อาหารที่มีส่วนประกอบของสารอาหารอย่างครบถ้วน ความต้องการโปรตีนขึ้นอยู่กับชนิด อายุ คุณภูมิ และคุณภาพน้ำ ปลากินเนื้อต้องการอาหารที่มีโปรตีนสูง ในขณะที่ปลากินพืชต้องการอาหารที่มีโปรตีนต่ำ ปลาอายุน้อยต้องการโปรตีนมากกว่าปลาที่มีอายุมาก โปรตีนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 16 % ปลาอาจขับถ่ายไนโตรเจนที่กินเข้าไปในรูปโปรตีนกลับสู่สิ่งแวดล้อมมากถึง 65 % โดยส่วนใหญ่ขับถ่ายออกมาในรูป NH_3 ผ่านเหงือก และประมาณ 10 % ขับออกมาในรูปของแข็ง พืชโดยทั่วไปต้องการ NO_3^- ดังนั้น จึงต้องมี Bio-filtration ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ทำหน้าที่เปลี่ยนไนโตรเจนในรูปต่างๆ เป็น NO_3^- ก่อนนำน้ำที่ใช้เลี้ยงปลาไปปลูกพืช (Craig and Helfrich, 2012)

ตารางที่ 1-1 สมบัติและความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลายที่ใช้ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (ที่มา : Schwarz, 1995; Jones, 1997)

	หน่วย	พิสัย
pH		5.5 - 7.5
Electrical conductivity	mS/cm	1.5 - 2.5
Dissolved oxygen	mg/L	> 1.5
NO ₃ -N	mg/L	50 - 200
NH ₄ -N	mg/L	0 - 150
P	mg/L	15 - 190
K	mg/L	60 - 350
Ca	mg/L	80 - 200
Mg	mg/L	24 - 60
S	mg/L	50 - 220
Fe	mg/L	1 - 5
Mn	mg/L	0.1 - 1.0
Cu	mg/L	0.02 - 0.8
Zn	mg/L	0.05 - 0.5
Mo	mg/L	0.01 - 0.1
Cl	mg/L	1 - 35
B	mg/L	0.1 - 1.0

ปลาต้องการแร่ธาตุหลายชนิดในการเจริญเติบโต เช่น Na, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Cr, Co, I, Cl, F, Mo, Pb, Ni, V, Li, Si และ Se เป็นต้น แร่ธาตุดังกล่าว ปลาอาจได้รับจากอาหารหรือจากน้ำโดยตรงผ่านเหงือกและผิวหนัง (Watanabe et al., 1997; Davis and Gatlin, 1996) ในขณะที่พืชต้องการน้อยชนิดกว่า พืชไม่ต้องการ Na, Cr, Co (ยกเว้นพืชตระกูลถั่ว), I, F, Pb, V, Li, Si (ยกเว้นพืชตระกูลหญ้า) และ Se น้ำที่มี Na สูงกว่า 70 mg/L ส่งผลต่อการดูดใช้ธาตุอาหารที่อยู่ในรูปแคทไอออนของพืช ถึงแม้พืชต้องการ Cl⁻ แต่เมื่อความเข้มข้นของ Cl⁻ สูงกว่า 350 mg/L ก็ส่งผลต่อการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่นของพืช

ความถี่และอัตราการให้อาหารปลาขึ้นอยู่กับช่วงอายุ ปลาวัยอ่อนต้องการพลังงานสูง และกินอาหารเกือบตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องให้อาหารเกือบทุกชั่วโมง เมื่อปลาโตขึ้นความถี่ในการกินอาหารลดลง ปลาที่เลี้ยงอย่างหนาแน่นในโรงเรือน จำเป็นต้องให้อาหารวันละประมาณ 5 ครั้ง อัตราการให้อาหารโดยทั่วไปประมาณ 1 - 4 % ของน้ำหนักตัว (Craig and Helfrich, 2012) ความถี่และอัตราการให้อาหารเปลี่ยนไปตามขนาดปลา ทำให้ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นแตกต่างกันตามไปด้วย ในขณะที่พืชต้องการธาตุอาหารค่อนข้างคงที่ ทั้งสัดส่วนและความเข้มข้น พืชโดยทั่วไปต้องการความเข้มข้น 0.5 - 1.0 mS/cm ในระยะต้นกล้า และต้องการ 1.5 - 2.5 mS/cm ในระยะพัฒนา (vegetative growth) ผักกินผลต้องการไนโตรเจนลดลงเมื่อเข้าสู่ระยะติดผล และต้องการธาตุอาหารโดยรวมลดลงปลายระยะเก็บเกี่ยว (Jones, 1997; Schwarz, 1995) การจัดการอาหารปลาและธาตุอาหารพืชให้สมดุลจึงเป็นปัจจัยสำคัญของระบบ

พืชโดยทั่วไปเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายที่เป็นกรดเล็กน้อย (pH ประมาณ 6.3) แต่ในทางปฏิบัติพบว่า pH ในช่วง 5.0 - 7.5 ก็เพียงพอที่จะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ตามปกติ ในขณะที่ปลาโดยทั่วไปเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายที่เป็นกลางหรือด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 6.5 - 8.5) หาก pH ต่ำเกินไปจะทำให้แอมโมเนียสะสมในน้ำจนถึงระดับที่เป็นพิษต่อปลา จุลินทรีย์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรต (nitrifying bacteria) ก็เจริญเติบโตได้ดีในสารละลายที่เป็นกลางหรือด่างเช่นเดียวกัน (pH ประมาณ 6.8 - 9.0) การปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลาจึงจำเป็นต้องควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่แคบมากขึ้น (ประมาณ 6.5 - 7.0) (Rakocy, 2007; Nelson, 2008)

เทคนิคการปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันมีเทคนิคการปลูกเลี้ยงหลายแบบ ได้แก่

- การปลูกเลี้ยงระบบปิด (total recycle technique หรือ recirculating technique) : หมายถึงการปลูกเลี้ยงที่ควบคุมให้สารละลายทั้งหมดหมุนเวียนอยู่ในระบบ เป็นเทคนิคที่สอดคล้องกับแนวคิดมากที่สุด แต่หากการปลูกพืชหรือเลี้ยงปลาเกิดปัญหา ย่อมส่งผลกระทบต่อทั้งระบบ (Lennard, 2004; Pantanella, 2010; Wahap et al., 2010)
- การปลูกเลี้ยงระบบเปิด (non-recycle technique) : หมายถึงการปลูกเลี้ยงที่นำน้ำจากการเลี้ยงปลาไปใช้ปลูกพืชก่อนปล่อยทิ้ง เป็นเทคนิคที่ช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสี่ยงภัยทั้งระบบ
- การปลูกเลี้ยงในภาชนะรวม : หมายถึงการปลูกเลี้ยงทั้งพืชและปลาในภาชนะเดียวกัน ช่วยให้ระบบไม่ซับซ้อน แต่น่าจะเหมาะกับระบบขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ และใช้ได้เฉพาะกรณีของปลาที่ไม่กินพืชเป็นอาหาร
- การปลูกเลี้ยงแบบแยกส่วน : หมายถึงการปลูกเลี้ยงที่แยกส่วนประกอบต่างๆ ของระบบออกจากกัน ช่วยให้การควบคุมระบบทำได้ง่ายขึ้น ตะกอนบางส่วนจากถังเลี้ยงปลาอาจถ่ายเทออกจากระบบ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเน่าเสีย เทคนิคการปลูกเลี้ยงแบบนี้ น่าจะเหมาะกับระบบขนาดใหญ่ และการปลูกเลี้ยงเพื่อการวิจัย (Savidov, 2005; O'Brien, 2007; Lennard, 2010)
- การปลูกเลี้ยงผสมหลายช่วงอายุปลา : หมายถึงการปลูกเลี้ยงที่เลี้ยงปลาหลายช่วงอายุหมุนเวียนกัน โดยเลี้ยงปลาแต่ละช่วงอายุแยกถังกัน เพื่อให้ของเสียที่เกิดจากปลามีปริมาณไม่แปรปรวนมากนัก ช่วยให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างสม่ำเสมอ (Rakocy, 2007)
- การปลูกเลี้ยงผสมหลายชนิดสัตว์น้ำ : หมายถึงการปลูกเลี้ยงที่เลี้ยงสัตว์น้ำหลายชนิดผสมกัน การเลี้ยงแบบนี้มีความยุ่งยากในการจัดการ แต่ทำให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำหลากหลายชนิด ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคมากกว่าการเลี้ยงเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง การเลี้ยงจำเป็นต้องคัดเลือกชนิดสัตว์น้ำที่สามารถอาศัยร่วมกันได้อย่างเหมาะสม เช่น ชอบอาศัยต่างความลึกกัน มีพฤติกรรมการกินอาหารต่างกัน หรือไม่เป็นเหยื่อและผู้ล่าต่อกัน เป็นต้น การเลี้ยงในถังแยกจากกัน หรือมีวัสดุหลบภัยให้สัตว์น้ำที่ถูกคุกคาม ก็น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีด้วยเช่นกัน (Maetan, 2008)

การปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา นอกจากปลูกเลี้ยงในน้ำจืดแล้ว ระบบนี้ยังสามารถใช้กับน้ำเค็มได้ด้วย พืชที่ปลูกได้ในน้ำเค็มคือสาหร่ายชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ การปลูกเลี้ยงในน้ำเค็มเหมาะกับพื้นที่ชายฝั่งและเกาะต่างๆ ซึ่งโดยปกติมักหาน้ำจืดได้ยาก (Wilson, 2005)

4. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ

- 4.1 ออกแบบและติดตั้งระบบการปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่จัดการได้ง่าย และเหมาะสมสำหรับพื้นที่อยู่อาศัย
- 4.2 ทดสอบการทำงานของระบบ ทั้งการทำงานพื้นฐานขณะที่ไม่มีการปลูกเลี้ยง และขณะปลูกเลี้ยง

5. กิจกรรมของโครงการ

โครงการนี้มีกิจกรรมหลัก และแผนการปฏิบัติงานของกิจกรรมต่างๆ ดังตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 กิจกรรมของโครงการตามที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการ

กิจกรรม	เวลานับจากเริ่มโครงการ (เดือน)					
	2	4	6	8	10	12
ออกแบบรายละเอียดระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา						
สร้างและติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ						
ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ						
ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของระบบก่อนปลูกเลี้ยง						
ทดสอบการปลูกเลี้ยง						
วิเคราะห์และทดสอบน้ำ สารละลาย และอาหารปลา						
เก็บข้อมูลต่างๆ ของระบบ						
วิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำรายงาน						

6. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลประโยชน์ที่จะเกิดจากโครงการนี้ มีดังนี้

- 6.1 ได้ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่สามารถนำไปปรับใช้กับการปลูกเลี้ยงในพื้นที่อยู่อาศัย
- 6.2 ได้ทราบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

6.3 ได้ข้อมูลเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกเลี้ยง

6.4 ได้พัฒนาหัวข้อวิจัยหรือวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการวิจัยในอนาคต

7. การผลักดันสู่การใช้ประโยชน์

เมื่อเสร็จสิ้นโครงการนี้ คาดว่าจะได้ระบบการปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่สามารถนำไปใช้ได้จริง รวมทั้งนำไปปรับใช้ทั้งในเชิงพาณิชย์ และเพื่อการบริโภคภายในครัวเรือน การผลักดันสู่การใช้ประโยชน์ที่คาดว่าจะดำเนินการมีดังนี้

- ใช้เป็นสถานที่จัดการเรียนการสอนและการวิจัยของนักศึกษา
- ใช้เป็นหน่วยสาธิตและจัดแสดงให้แก่บุคคลทั่วไปได้เข้ามาศึกษาดูงาน
- เผยแพร่ผลงานต่อสาธารณะผ่าน website <http://agri.wu.ac.th/msomsak/soilless/>
- เผยแพร่ผลงานต่อสาธารณะผ่านวิทยุชุมชน หรือโทรทัศน์ท้องถิ่น
- เผยแพร่ผลงานโดยการเขียนบทความวิจัยลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

8. เอกสารอ้างอิง

Craig, S. and Helfrich, L.A. 2012. Understanding fish nutrition, feeds, and feeding. Virginia

Cooperative Extension, Access on 12 August 2012 from <http://pubs.ext.vt.edu/420/420-256/420-256.html>.

Davis, D.A. and Gatlin, D.M. 1996. Dietary mineral requirements of fish and marine crustaceans.

Fisheries Science. 4:75-99.

Department of Agriculture, visited 2 December 2006. Soilless Culture. http://www.agridept.gov.lk/Techinformations/Hponics/H_text.htm

Hoagland, D.R. and Arnon, D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil.

Circ. 347. University of California Agricultural Experiment Station, Berkeley.

Hydroponiconline. visited 6 December 2006. Hydroponics: Past, Present, Future.

<http://www.hydroponiconline.com/lessons/History/lesson2-1history.htm>.

Jensen, M. visited 3 December 2006. What is Hydroponics? <http://ag.arizona.edu/ceac/CEAC/WhatIsHydroponics.htm>

Jones, Jr. J.B. 1997. Hydroponics : A Practical Guide for the Soilless Grower. St. Lucie Press. Boca Raton, Florida.

Lennard, W.A. 2004. Aquaponics research at RMIT University, Melbourn, Australia. Aquaponics Journal. 35:18-24.

- Lennard, W. 2010. A new look at NFT aquaponics. *Aquaponics Journal*. 56:16-19.
- Mason, J. 2002. *Commercial Hydroponics*. Kangaroo Press. Sydney.
- Maetan, E. 2008. Polyculture of fishes in aquaponics and recirculating aquaculture. *Aquaponics Journal*. 48:28-33.
- Nelson, R.L. 2008. *Aquaponic Food Production*. Raising fish and plant for food and profit. Nelson and Pade Inc. Montello.
- Nicholls, R.E. 1990. *Beginning Hydroponics Soilless Gardening*. Running Press. London.
- Nihonshisetsu engeikyokai, 2002. *New Manual of Nutrient Culture*. Seibundo. Tokyo. (in Japanese)
- O'Brien, C. 2007. An aquaponics project in the Bahamas. *Aquaponics Journal*. 45:16-19.
- Pantarella, E. 2010. New aquaponics in Italy. *Aquaponics Journal*. 56:25-27.
- Rahman, M.F. visited. 17 July 2002. Crop Production by Hydroponics. <http://www.np.edu.sg/~dept-bio/sssc/lecture/content.html>.
- Rakocy, J. 2007. Ten guidelines for aquaponic system. *Aquaponics Journal*. 46:14-17.
- Roberto, K. 2004. *How-to Hydroponics*, 4th ed. The Futuregarden Press. New York.
- Rorabaugh, P. visited 2 December 2006. Hydroponic CEA Crop Production. <http://ag.arizona.edu/ceac/CEACeducation/PLS217.htm>.
- Savidov, N. 2005. Evaluation of aquaponics technology in Alberta, Canada. *Aquaponics Journal*. 37:20-25.
- Schwarz, M. 1995. *Soilless Culture Management*. Springer-Verlag. New York.
- Wahap, N., Estim, A. and Kian, A.Y.S. 2010. Producing organic fish and mint in an aquaponic system. *Aquaponics Journal*. 58:28-33.
- Watanabe, T., Kiron, V. and Satoh, S. 1997. Trace minerals in fish nutrition. *Aquaculture*. 151:185-207.
- Wilson, G. 2005. Seaweed is the common denominator in exciting saltwater aquaponics. *Aquaponics Journal*. 36:12-16.

บทที่ 2 การออกแบบระบบ

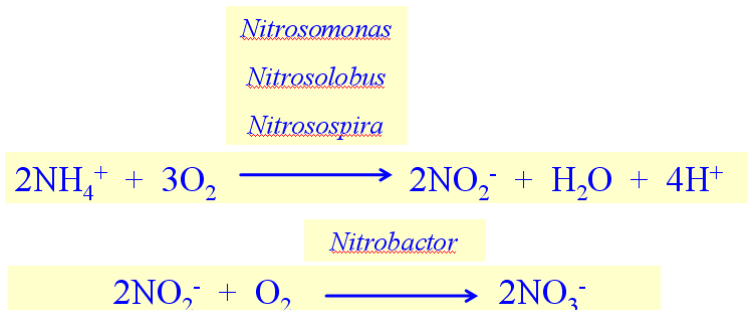
1. โครงสร้างของระบบ

การปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลา (aquaponics) ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 5 ส่วน คือ

1.1 **ถังเลี้ยงปลา (fish tank)** : เป็นส่วนที่ใช้เลี้ยงปลาและผลิตของเสียจากปลา ทั้งในรูปของแข็ง สารละลาย และแก๊ส ถังเลี้ยงจำเป็นต้องหมุนเวียนสารละลายจึงควรออกแบบให้สามารถถ่ายเทสารละลาย และของเสียออกจากถังได้ง่าย เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือตกค้างในถังจนส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ และการดำรงชีวิตของปลา ถังเลี้ยงปลาอาจมีเพียงถังเดียวหรือมีหลายถังเชื่อมต่อกันในระบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ปลูกเลี้ยง ระบบที่มีถังเลี้ยงเพียงถังเดียวจำเป็นต้องหยุดพักหลังจับปลาแต่ละครั้ง ผู้ปลูกเลี้ยงสามารถใช้ช่วงเวลานี้เพื่อทำความสะอาด และซ่อมแซมปรับปรุงแก้ไขระบบ ผู้ปลูกเลี้ยงมักเริ่มเลี้ยงปลา ขนาดปานกลาง และเลี้ยงไปจนถึงขนาดที่สามารถจับขายได้ โดยไม่เคลื่อนย้ายปลาออกจากถัง ระบบที่มีถังเลี้ยงหลายถังอยู่ในระบบ ผู้ปลูกเลี้ยงนิยมเลี้ยงปลาอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดพัก และอาจเลี้ยงปลาตั้งแต่ขนาดเล็กต่อเนื่องไปจนถึงขนาดที่สามารถจับขายได้ โดยลดความหนาแน่นของปลาลงเมื่อเลี้ยงไปถึงระยะหนึ่ง Savidov (2005) รายงานว่า เขาเลี้ยงปลานิล 600 ตัว ในระบบปลูกเลี้ยงซึ่งใช้ถังขนาด 5.6 m^3 จำนวน 4 ถัง (107 ตัว/m^3) เริ่มเลี้ยงเมื่อปลา มีน้ำหนักเฉลี่ย 100 กรัม/ตัว และจับขายเมื่อหนักเฉลี่ย 700 กรัม/ตัว O'Brien (2007) รายงานว่า เขาเลี้ยงปลานิลความหนาแน่น 88 ตัว/ m^3 ในระบบปลูกเลี้ยงซึ่งใช้ถังขนาด 750 แกลลอน (2,839 ลิตร) จำนวน 2 ถัง Rakocy และคณะ (2006) รายงานการเลี้ยงปลานิลโดยระบบปลูกเลี้ยงของ University of the Virgin Islands ซึ่งประกอบด้วยถังเลี้ยงขนาด 2,060 แกลลอน (7,798 ลิตร) จำนวน 4 ถัง โดยใช้ความหนาแน่น 77 ตัว/ m^3 เริ่มเลี้ยงจากปลาขนาดเฉลี่ย 79.2 กรัม/ตัว ไปจนถึงขนาดเฉลี่ย 813.8 กรัม/ตัว ในบางครั้งผู้ปลูกเลี้ยงอาจเลี้ยงสัตว์น้ำมากกว่า 1 ชนิด ในภาชนะเดียวกัน โดยเลือกชนิดที่สามารถเลี้ยงร่วมกันได้ง่าย เนื่องจากการเลี้ยงเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง มักเกิดปัญหาการระบาดของโรคหลังจากเลี้ยงไประยะหนึ่ง (Martan, 2008)

1.2 **ถังแปลงสภาพสารอาหาร (nutrient conversion tank)** : ปลากินสารอินทรีย์เป็นอาหาร และขับถ่ายของเสียส่วนหนึ่งออกมาในรูปสารอินทรีย์ ในขณะที่พืชต้องการอาหารที่เป็นสารอนินทรีย์ ระบบปลูกเลี้ยงจึงจำเป็นต้องมีการแปลงสภาพสารอาหาร สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบเอมีน (R-NH_2) คาร์บอนไดออกไซด์ และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กหลายชนิดโดย heterotrophic microorganism ต่อจากนั้นสารประกอบเอมีนจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบแอมโมเนียมและแอมโมเนีย (NH_3) นอกจากนี้ปลายังขับถ่ายของเสียที่เกิดจากเมตาโบลิซึมของโปรตีนออกมาในรูปแก๊ส NH_3 โดยตรง ซึ่งหากความเข้มข้นสูงเกินไป ก็เป็นพิษกับปลา น้ำที่ใช้เลี้ยงปลาควรมี NH_3 ไม่เกิน 0.04 mg-N/L และมี NH_4^+ ไม่เกิน 1.0 mg-N/L ดังนั้น $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็น NO_3^- ซึ่งเป็นพิษต่อปลาที่ความเข้มข้นสูงกว่ามาก (ประมาณ 300 - 400 mg-N/L) และพืชต้องการมากกว่า (Connolly and Trebic, 2010) กระบวนการเปลี่ยน $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ เป็น

NO_3^- เกิดขึ้น 2 ขั้นตอน และอาศัยจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน โดยมี NO_2^- เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ การเปลี่ยน $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 2 โมล ไปเป็น NO_3^- 2 โมล ทำให้เกิด H^+ ขึ้น 4 โมล และต้องใช้ O_2 5 โมล กระบวนการนี้จึงทำให้ pH ของสารละลายลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ลดลงด้วยในเวลาเดียวกัน ดังนั้น การควบคุม pH ไม่ให้ต่ำเกินไปจึงมีความจำเป็น



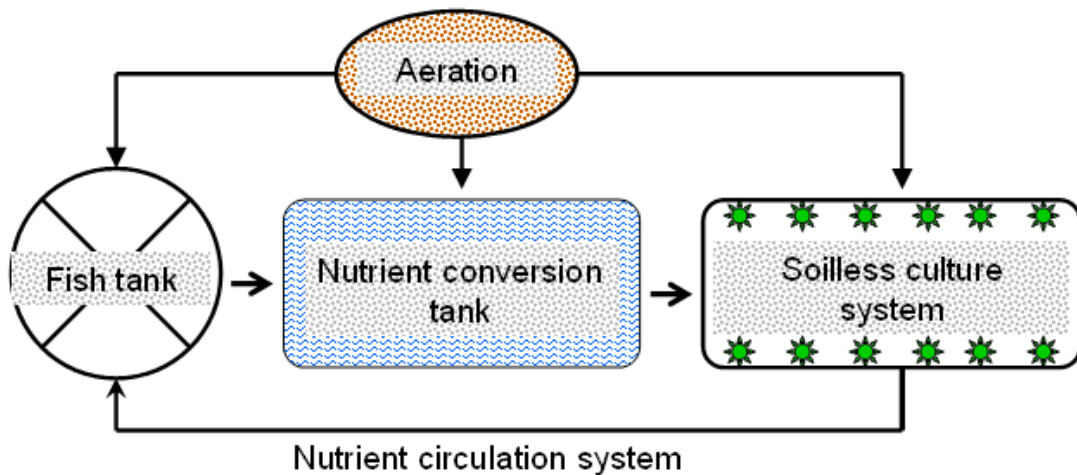
ระบบปลูกเลี้ยงขนาดเล็กอาจมีถังแปลงสภาพเพียงถังเดียว และอาจใช้ร่วมกับภาชนะปลูก (Lennard, 2004; Hughey, 2005) ในขณะที่ระบบขนาดใหญ่อาจแยกถังแปลงสภาพออกเป็น ถังตกตะกอน (clarifier) ถังกรองชีวภาพ (bio-filtration tank) ถังแยกแก๊ส (degassing tank) และถังเติมด่าง (base addition tank) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจัดการระบบ ถังตกตะกอนช่วยแยกตะกอนหนักทิ้งไป เพื่อป้องกันไม่ให้ไหลไปอุดตันท่อ ถังกรองชีวภาพทำหน้าที่หลักในการเปลี่ยน $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ เป็น NO_3^- และเปลี่ยนสารอินทรีย์แขวนลอยเป็นสารอินทรีย์ ถังแยกแก๊สทำหน้าที่กำจัดแก๊สต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระบบ เช่น CO_2 , NH_3 , N_2 , H_2S และ CH_4 เป็นต้น ส่วนถังเติมด่างมีไว้เพื่อเติมสารปรับค่า pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Savidov, 2005; Rakocy, et al., 2006; O'Brien, 2007)

1.3 ระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (soilless culture system) : ระบบปลูกที่เหมาะสมน่าจะเป็นระบบรากแช่ (hydroponics) และระบบรากยัด (aggregate culture) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่ปลูก ระบบรากแช่เหมาะสำหรับผักกินใบที่มีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 30 - 40 วัน เนื่องจากกำจัดรากพืชได้สะดวกเมื่อถึงระยะเก็บเกี่ยว ส่วนระบบรากยัดเหมาะสำหรับพืชที่มีอายุเก็บเกี่ยวยาวนาน ลำต้นหรือทรงพุ่มมีขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้ควรมีความพรุนสูง เพื่อให้สารละลายไหลเวียนได้ดี และเป็นวัสดุที่เสถียร ไม่เน่าเปื่อยหรือส่งผลกระทบใดๆ ต่อสมบัติสารละลาย O'Brien (2007) เลือกใช้ระบบรากแช่แบบไหลลึก (deep-flow hydroponic system) วางปลูกกว้าง 2 ฟุต ครึ่ง ยาว 12 ฟุต ความลึกของสารละลายในราง 4 นิ้ว Lennard (2010) ศึกษาการปลูกด้วยระบบรากแช่แบบไหลตื้น (NFT hydroponic system) เขาพบว่า พืชเจริญเติบโตได้ดีอย่างน่าพอใจ

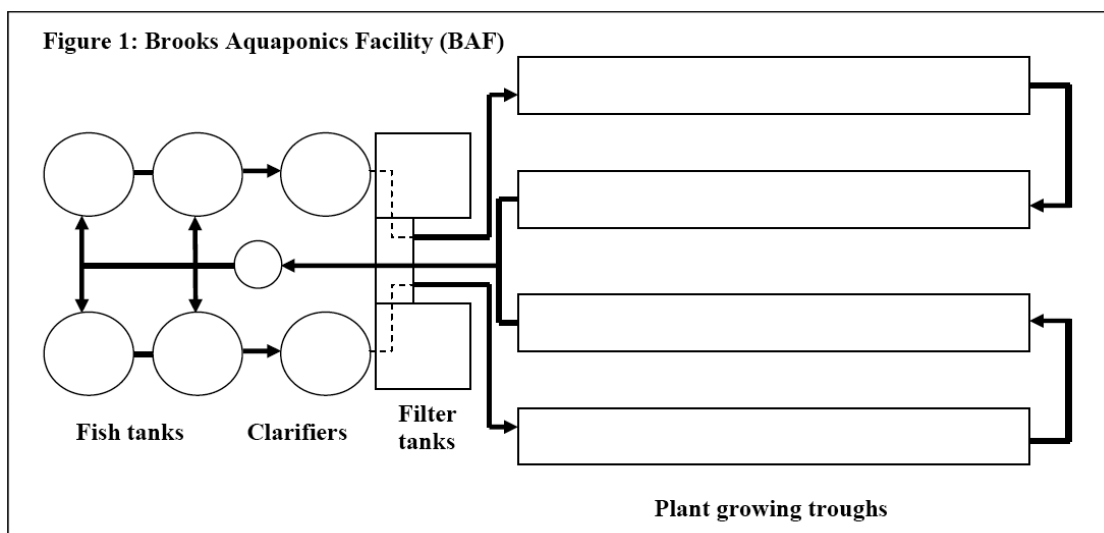
1.4 ระบบหมุนเวียนสารละลาย : ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาจำเป็นต้องมีการหมุนเวียนสารละลายจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำของเสียที่เกิดขึ้นจากปลาไปผ่านการบำบัด และไหลเวียนกลับมายังถังเลี้ยงปลาอีกครั้ง สารละลายที่ผ่านในแต่ละส่วนอาจมีองค์ประกอบไม่เหมือนกัน เช่น สารละลายที่ไหลออกจากถังเลี้ยงปลาจะมีทั้งของแข็งขนาดใหญ่ และสารแขวนลอยขนาดเล็ก การออกแบบจึงจำเป็นต้องใช้ท่อขนาดใหญ่และมีส่วนโค้งงอเล็กน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการอุดตัน การหมุนเวียนสารละลายโดย

อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จำเป็นต้องออกแบบให้ต่างระดับอย่างเหมาะสม สารละลายที่ไหลผ่านถังซึ่งมีกระบวนการของจุลินทรีย์เกิดขึ้นภายใน ควรไหลด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ

1.5 ระบบเติมอากาศ : ปลา รากพืช และจุลินทรีย์ ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิต การเติมอากาศ ($21\% \text{ O}_2$) จึงจำเป็นสำหรับระบบปลูกเลี้ยง วิธีเติมอากาศทำได้โดยพ่นอากาศลงไป สารละลายโดยตรง หรือทำให้สารละลายสัมผัสกับอากาศก็ได้



รูปที่ 2-1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา



รูปที่ 2-2 ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาของ Savidov (2005) ที่รัฐแอลเบอร์ต้า ประเทศแคนาดา ระบบประกอบด้วยถังเลี้ยงปลาขนาด 5600 ลิตร จำนวน 4 ถัง ถังแยกตะกอน 2 ถัง ถังกรองชีวภาพ 2 ถัง วางปลูกพืชระบบรากแช่แบบไหลลึกจำนวน 4 รวง วางปลูกแต่ละรวงยาว 30.5 เมตร กว้าง 0.90 เมตร ลึก 0.45 เมตร จุสารละลาย 9,000 ลิตร

2. ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

2.1 **ความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย** : ปลาส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 7.5 - 8.0 ปลานิลทนต่อการเปลี่ยนแปลง pH ได้ดี โดย pH ควรอยู่ในช่วง 6.0 - 9.0 พืชโดยทั่วไปเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.0 - 6.5 ในขณะที่จุลินทรีย์แปลงสภาพไนโตรเจน (nitrifying bacteria) ทำงานได้ดีในช่วง pH 6.8 - 9.0 ดังนั้น ช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาจึงแคบมาก โดยทั่วไปมักควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 6.5 - 7.0 pH ที่สูงหรือต่ำเกินไปทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนังและเหงือกของปลา ทำให้การละลายและการดูดใช้ธาตุอาหารของพืชมีปัญหา กระบวนการแปลงสภาพ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ก่อให้เกิด H^+ ขึ้นในระบบ ดังนั้น pH ของสารละลายจึงมีแนวโน้มลดลง ทำให้ต้องเติมด่าง เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ KOH เป็นระยะๆ (Connolly and Trebic, 2010)

2.2 **ธาตุอาหารที่ต้องเพิ่มเข้าสู่ระบบ** : ระบบปลูกเลี้ยงมีการให้อาหารปลาเข้าสู่ระบบตามความต้องการของปลา อาหารปลาได้รับการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับปลา ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช Rakocy (2007) แนะนำว่า โพแทสเซียม แคลเซียม และเหล็ก มักไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงจำเป็นต้องเติมโพแทสเซียม และแคลเซียมในรูปแบบที่ใช้เพิ่ม pH ของสารละลาย ส่วนเหล็กเติมโดยตรงในรูปแบบสารประกอบเชิงซ้อน (chelated-Fe) ให้มีความเข้มข้น 2 mg-Fe/L

2.3 **อุณหภูมิของสารละลาย** : อุณหภูมิของสารละลายส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของปลา พืช จุลินทรีย์ และส่งผลต่อการละลายของออกซิเจน ปลานิลเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 11 - 12 °C ไปจนถึง 42 °C แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 31 - 36 °C (FAO, 2013) พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิสารละลายสูงสุดไม่ควรเกิน 25 °C อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ออกซิเจนละลายได้น้อยลง ส่งผลให้ปลา รากพืช และจุลินทรีย์ขาดออกซิเจนได้ง่ายขึ้น การควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้ต่ำกว่า 30 °C เป็นเรื่องยากสำหรับพื้นที่เขตร้อน

2.4 **แสงสว่าง** : พืชต้องการแสงสว่างในการเจริญเติบโต ในขณะที่ปลาไม่จำเป็นต้องมีแสงสว่าง ภาชนะปลูกพืชจึงจำเป็นต้องติดตั้งในบริเวณที่ได้รับแสง ในขณะที่ถังเลี้ยงปลาเหมาะที่จะติดตั้งในที่ร่ม สารละลายที่ไหลเวียนอยู่ในระบบมีสารอาหารที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี สาหร่ายที่เกิดขึ้นต้องการสารอาหารและออกซิเจนเช่นเดียวกับพืช ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารอาหารลดลง และความต้องการออกซิเจนของระบบมากขึ้น จึงจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้อาหารละลายได้รับแสง จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ nitrification ไม่ต้องการแสงด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้น ถังแปลงสารอาหารควรติดตั้งในร่ม

ตารางที่ 2-1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของผักชนิดต่างๆ (°C)

ชนิดผัก	กลางวัน		กลางคืน		สารละลาย		
	สูงสุด	เหมาะสม	ต่ำสุด	เหมาะสม	ต่ำสุด	เหมาะสม	สูงสุด
มะเขือเทศ	25	20-27	5	8-13	13	15-23	25
มะเขือยาว	35	23-27	10	13-18	13	18-23	25
พริกหวาน	35	25-30	12	15-20	13	18-23	25
แตงกวา	35	23-28	8	10-15	13	18-23	25
แตงโม	35	25-30	15	18-23	13	18-23	25
สตรอเบอรี่	30	15-25	5	5-10	13	15-20	25
สปีเนส	30	15-25	5	5-10	13	16-20	25
มิชีปะ	30	15-25	5	5-10	13	18-22	25
หอมต้น	35	15-25	5	5-10	13	16-22	25
ผักกาดหอม	30	15-25	5	5-10	13	18-22	25

2.5 ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย : ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาโดยทั่วไปควรมีค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย (dissolved oxygen : DO) ประมาณ 80% ของค่าอิ่มตัว หรือ 6 - 7 mg/L ปลาสามารถทนต่อการขาดออกซิเจนได้ถึง 0.5 mg/L ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3 - 10 mg/L ปลาชนิดเจริญเติบโตได้ดีเมื่อ DO สูงกว่า 5 mg/L เมื่อ DO ต่ำเกินไปปลาจะอ้าปากหายใจบริเวณผิวน้ำบ่อยขึ้น รวมทั้งบริเวณที่น้ำมีค่า DO สูง เช่น ใกล้หัวพ่นอากาศ หรือบริเวณที่น้ำไหลลงถัง

พืชโดยทั่วไปเจริญเติบโตได้ดีเมื่อ DO สูงกว่า 40% ของค่าอิ่มตัว เมื่อค่า DO ต่ำกว่า 1.5 mg/L การดูใช้ธาตุอาหารของรากจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อค่า DO ต่ำกว่า 0.5 mg/L รากจะหยุดการเจริญเติบโต ปริมาณความต้องการออกซิเจนของรากพืชขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโต ปริมาณราก และอัตราการสังเคราะห์แสงของพืช พืชที่มีปริมาณรากมากย่อมต้องการออกซิเจนมากตามไปด้วย รากพืชต้องการออกซิเจนในเวลากลางวันมากกว่ากลางคืน เมื่อรากขาดออกซิเจนอย่างรุนแรง รากจะเน่าและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และอาจสังเกตเห็นรากอากาศเกิดขึ้นเหนือผิวน้ำ หากรักษาระดับ DO ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของปลา พืชก็สามารถเจริญเติบโตได้เช่นเดียวกัน

2.6 อัตราการหมุนเวียนสารละลาย : อัตราเร็วควรมากพอที่จะทำให้จุลินทรีย์และพืชสามารถกำจัดของเสียที่เกิดจากปลาได้มากที่สุด Endut และคณะ (2010) รายงานว่า อัตราที่เหมาะสมที่สุดควรเป็น 1.6 ลิตร/นาที่ อัตราที่ช้าเกินไปทำให้ของเสียสะสมในถังเลี้ยงปลาจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพปลา อัตราที่เร็วเกินไปทำให้จุลินทรีย์และพืชไม่มีเวลามากพอที่จะบำบัด ของเสียที่ออกจากถังเลี้ยงปลา ก็จะถูกหมุนเวียนกลับมาใหม่ Connolly and Trebic (2010) แนะนำว่า ระบบปลูกเลี้ยงขนาดเล็ก ควรมีอัตราการหมุนเวียน 2 เท่า ของ

ปริมาณถังเลี้ยงปลาในแต่ละชั่วโมง กล่าวคือ ระบบที่มีถังเลี้ยงปลาขนาด 100 ลิตร ควรมีอัตราการหมุนเวียน 200 ลิตร/ชั่วโมง

2.7 ชนิดของปลาและพืช : ชนิดของปลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ ความสามารถในการจัดหาพันธุ์ปลาและอาหารปลา หากพืชที่ปลูกเป็นพืชผักโดยทั่วไปไม่ใช่พืชทนเค็ม ปลาที่เลี้ยงควรเป็นปลาน้ำจืด ระบบปลูกเลี้ยงที่วางแผนจะเต็มปยุลงไปให้เพียงพอกับความต้องการของพืช ควรเลือกปลาที่เจริญเติบโตได้ดีในระดับความเข้มข้นของปุ๋ยที่ต้องการ ปลาไม่ควรมีนิสัยดุร้ายต่อผู้กันเอง หรือทำร้ายปลาต่างชนิดที่เลี้ยงร่วมกัน และชอบอยู่รวมกันเป็นฝูง ปลาที่มีผู้รายงานว่าเป็นปลาน้ำจืดที่สามารถเลี้ยงในระบบปลูกเลี้ยงได้ ได้แก่ tilapia, trout, perch, blue gill, largemouth bass, channel catfish, koi carp, goldfish, barramundi, murray cod, jade perch, rainbow trout และ pacu เป็นต้น (Connolly and Trebic, 2010) งานวิจัยนี้ใช้ปลาเพียงชนิดเดียว คือ ปลานิลพันธุ์จิตรลดา 3

ชนิดของพืชที่เหมาะสมคล้ายกับพืชที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน ได้แก่ ผักสลัดชนิดต่างๆ ผักกวางตุ้ง ผักบุ้ง ผักฮ่องเต้ ผักกาดขาว ผักโขม ผักน้ำ คะน้า มะเขือ มะเขือเทศ แตงกวา กระเจียบเขียว โหระพา และกะเพรา เป็นต้น ผักที่ต้องการความเข้มข้นของธาตุอาหารสูง อาจจำเป็นต้องเติมปุ๋ยลงไปในสารละลาย

2.8 อาหารและอัตราการให้อาหารปลา : อาหารปลาควรมีสัดส่วนสมดุลของสารอาหารทั้ง โปรตีน กรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ และวิตามิน อาหารสำเร็จรูปมักเป็นทางเลือกที่ดี แล้วเสริมด้วยอาหารธรรมชาติตามชนิดของปลา เช่น สาหร่าย แหน ผักผลไม้ หนอน และแมลงขนาดเล็ก เป็นต้น อาหารเลี้ยงปลาโดยทั่วไปประกอบด้วยโปรตีน 18 - 50% ไขมัน 10 - 25% คาร์โบไฮเดรต 15 - 20% ปลากินพืช (herbivorous fish) ต้องการอาหารโปรตีนต่ำ ปลากินพืชและสัตว์ (omnivorous fish) ต้องการอาหารโปรตีนปานกลาง ส่วนปลากินเนื้อ (carnivorous fish) ต้องการอาหารโปรตีนสูง อาหารปลานิลควรมีโปรตีนอยู่ในช่วง 38 - 42% ปลาที่เลี้ยงในถังต้องการอาหารน้อยกว่าปลาที่เลี้ยงในบ่อ เนื่องจากมีพื้นที่เคลื่อนไหวจำกัด ปริมาณอาหารขึ้นอยู่กับขนาดของปลา ปลานิลขนาดเล็กต้องการอาหารมากเมื่อเทียบกับน้ำหนัก สัดส่วนของอาหารลดลงเมื่อปลามีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับปลานิลควรให้อาหารตามสัดส่วนดังตารางที่ 2-2 อัตราแนะนำอยู่ในช่วงกว้าง การให้อาหารโดยสังเกตพฤติกรรมความต้องการของปลา ช่วยให้สามารถให้อาหารในอัตราที่เหมาะสมได้ การให้อาหารมากเกินไป ทำให้อาหารเหลือ ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเสีย แต่หากให้อาหารน้อยเกินไป ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้า และอาจเกิดปัญหากับสุขภาพปลา (Connolly and Trebic, 2010; Craig and Helfrich, 2013) โปรตีนประกอบด้วยคาร์บอน 50% ไนโตรเจน 16% ออกซิเจน 21.5% และไฮโดรเจน 6.5% ปลาสามารถกินอาหารที่มีโปรตีนสูงได้ แต่อาจขับถ่ายออกมามากถึง 65% ไนโตรเจนส่วนใหญ่ถูกขับออกมาในรูป NH_3 ผ่านทางเหงือก และอีกประมาณ 10% ขับถ่ายออกมาในรูปของแข็ง

2.9 ความต้องการพลังงาน : ระบบปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลาต้องการพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร เพื่อการสังเคราะห์แสงของพืช ต้องการพลังงานไฟฟ้าสำหรับปั๊มน้ำ ปั๊มลม และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ระบบที่ดีควรใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด ใช้แรงโน้มถ่วงและพลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ระบบไม่ควรเกิดปัญหาเมื่อกระแสไฟฟ้าขัดข้อง

ตารางที่ 2-2 อัตราการให้อาหารปลานิลในแต่ละวัน

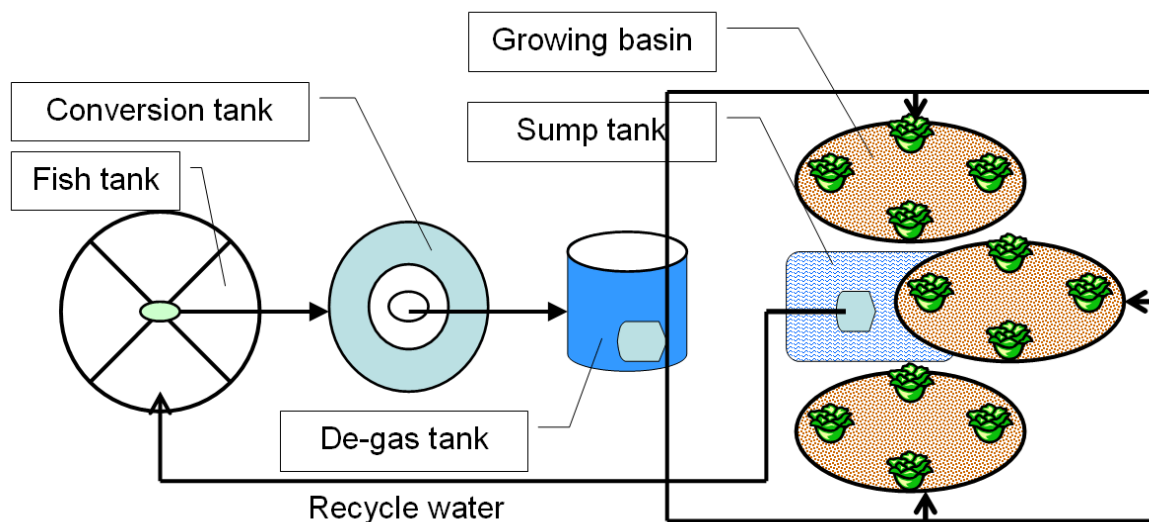
ขนาดปลา (g)	อัตราการให้อาหาร (ร้อยละของน้ำหนัก)
0 - 1	30 - 10
1 - 5	10 - 6
5 - 20	6 - 4
20 - 100	4 - 3
โตกว่า 100	3 - 1.5

2.10 การป้องกันและระงับเหตุฉุกเฉิน : ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่มีการไหลเวียนของสารละลาย และพ่นอากาศหรือ O_2 ลงไปในสารละลายตลอดเวลา รวมทั้งต้องให้อาหารปลาวันละ 2 - 3 ครั้ง เป็นประจำทุกวัน สิ่งต่างๆ เหล่านี้อาจไม่สามารถดำเนินไปตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากเกิดปัญหาต่างๆ เช่น ท่อรั่ว ท่อแตก ท่อตัน ไส้กรองอุดตัน กระแสไฟฟ้าขัดข้อง ป้อนน้ำชำรุด ป้อนลมชำรุด หรือบุคคลที่ได้รับมอบหมายไม่ปฏิบัติตามตามที่มอบหมายไว้ เป็นต้น ผู้ออกแบบระบบควรมีวิธีป้องกันผลกระทบจากปัญหาต่างๆ เหล่านี้ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าขัดข้อง สารละลายไม่ควรไหลล้นออกจากระบบ กรณีที่ท่อรั่ว น้ำในถังเลี้ยงปลาไม่ควรรั่วไหลออกจากถังจนเป็นอันตรายต่อปลา ป้อนน้ำและป้อนลมควรมีสารองพร้อมที่จะเปลี่ยนใหม่ได้เสมอ ระบบขนาดใหญ่อาจจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำรอง หรือมีถังออกซิเจน

3. องค์ประกอบของระบบปลูกผักกินใบ

ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่ผู้วิจัยพัฒนาและปรับปรุงใหม่จากของเดิม ที่เสนอไว้ในข้อเสนอโครงการ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2-3 ประเด็นสำคัญที่ปรับปรุง คือ

- รวมถึงซึ่งทำหน้าที่ตกตะกอน (sedimentation/ clarification) ย่อยสลายและแปลงสภาพ (bio-filtration) และควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง (pH controller) ไว้ในถังเดียวกัน ช่วยให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น และประหยัดพื้นที่ติดตั้ง
- ออกแบบให้สารละลายไหลจากถังเลี้ยงปลาไปยังภาชนะปลูกพืช โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว ช่วยให้อัตราการไหลสม่ำเสมอ และประหยัดพลังงาน
- ใช้ภาชนะปลูกผักขนาดเดียวกันทั้งสามภาชนะ ออกแบบเพื่อปลูกผักกินใบที่มีอายุเก็บเกี่ยว 30 - 35 วัน เพียงกลุ่มเดียว และปลูกผักหมุนเวียนในแต่ละภาชนะปลูกต่างอายุกัน (1, 2 และ 3 สัปดาห์) เพื่อให้การกำจัดธาตุอาหารออกจากระบบมีความสม่ำเสมอ และวางแผนทดสอบปลูกกับผักที่ต้องการธาตุอาหารแตกต่างกัน 3 กลุ่ม คือ ต้องการมาก (คะน้า) ปานกลาง (ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง ผักกาดหอม) และน้อย (ผักบุ้ง)
- ออกแบบให้ทิศทางการไหลของสารละลายมีเพียงทิศทางเดียว เพื่อให้สมบัติของสารละลายในระบบมีความสม่ำเสมอ



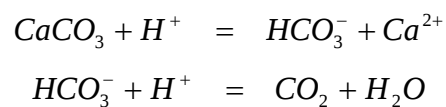
รูปที่ 2-3 โครงสร้างของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยปรับปรุงจากระบบเดิมที่เคยเสนอไว้ในข้อเสนอโครงการ เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม

3.1 ถังเลี้ยงปลา (fish tank) : โครงการนี้ได้เลือกใช้ถังไฟเบอร์กลาสทรงกระบอกก้นกรวยขนาด 500 ลิตร มีขาตั้งยกสูงจากพื้น เพื่อความสะดวกในการปรับระดับน้ำและถ่ายตะกอนออกจากถัง ความสูงของถัง 1.0 เมตร ก้นถังมีท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว สำหรับน้ำและของเสียที่เกิดจากปลาไหลออกจากถัง เลี้ยงปลานิล (Nile tilapia : *Oreochromis niloticus*) พันธุ์จิตรลดา 3 จำนวน 50 ตัว ติดตั้งในที่ร่มเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่าย และพ่นน้ำที่ไหลกลับให้น้ำหมุนวน เพื่อให้เกิดการเหวี่ยง (hydrocyclone) รวมตะกอนลงสู่ก้นถัง แล้วระบายออกไปสู่ถังดักตะกอนผ่านท่อน้ำล้นกลางถัง (รูปที่ 2-4)



รูปที่ 2-4 ถังเลี้ยงปลาที่ทางโครงการเลือกใช้ มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกก้นกรวย และมีท่อระบายของเสียกลางถัง ปริมาตรถังประมาณ 500 ลิตร

3.2 ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง : ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ถังมีลักษณะเป็นถังสองชั้น ถังชั้นนอกทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 42 เซนติเมตร ยาว 57 เซนติเมตร และลึก 72 เซนติเมตร ถังชั้นในทรงกระบอกสูง 60 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 36 เซนติเมตร วางสูงจากพื้น 36 เซนติเมตร เจาะด้านข้างสำหรับติดตั้งท่อสารละลายไหลเข้าสูงจากพื้น 70 เซนติเมตร และมีท่อระบายตะกอนในกรณีที่เกิดปัญหาตะกอนเน่าเสียมากจนเป็นอันตรายต่อปลา หรือกรณีที่ต้องการเริ่มต้นการทดลองใหม่ ถังชั้นในมีรูด้านบนสูงจากกันถังชั้นนอก 40 เซนติเมตร เพื่อให้สารละลายไหลเข้า ภายในถังชั้นในบรรจุซากปะการังเพื่อใช้เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และทำหน้าที่สะเทินกรดไปด้วยในเวลาเดียวกัน โดยปฏิกริยาดังสมการ



รูปที่ 2-5 ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย



รูปที่ 2-6 ซากปะการังซึ่งผู้วิจัยเดินทางไปเก็บมาจากชายหาดจังหวัดพังงา นำมาแช่น้ำไว้ 1 สัปดาห์ แล้วล้างทำความสะอาด เพื่อใช้เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และปรับความเป็นกรดเป็นด่าง

สารละลายที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์ครั้งแรกแล้วจะไหลออกจากถังทางท่อที่ต่อไว้ที่ก้นถัง ไปยังถังกำจัดแก๊สและควบคุมระดับสารละลายต่อไป (รูปที่ 2-5) ถังนี้ติดตั้งไว้ในโรงเรือนหลังคาที่บึ่งแสงเช่นเดียวกับถังเลี้ยงปลา

3.3 ถังกำจัดแก๊สและควบคุมระดับสารละลาย : ผู้วิจัยได้ใช้ถังทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ปริมาตรประมาณ 200 ลิตร เป็นถังกำจัดแก๊สและควบคุมระดับสารละลาย ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในถังแปลงสภาพฯ และแก๊สแอมโมเนียอาจหลงเหลืออยู่ในสารละลาย หากปล่อยให้ไหลเวียนไปยังถังปลูกพืชและเลี้ยงปลา อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นได้ จึงควรปล่อยให้แก๊สเหล่านี้ระเหยสู่อากาศ สารละลายไหลเข้าทางท่อที่ก้นถัง ซึ่งเป็นท่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว และไหลออกไปยังภาชนะปลูกพืชด้วยท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว โดยมีปั๊มช่วยกระตุ้นให้เกิดการไหลในกรณีที่สารละลายหยุดไหลชั่วคราว และมีวาล์วปลายท่อควบคุมอัตราการไหล ปั๊มที่ใช้มีกำลัง 60 วัตต์ แรงดันน้ำสูงสุด 2.7 เมตร และสามารถสูบน้ำด้วยอัตราการไหลสูงสุด 2700 ลิตร/ชั่วโมง ระดับสารละลายภายในถังจะถูกปรับให้มีระดับเดียวกับถังเลี้ยงปลาโดยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลออกด้วยเทคนิคการดักน้ำ (siphon) และ hydraulic ram เพื่อช่วยให้อัตราการไหลสม่ำเสมอ ในกรณีที่มีการอุดตัน จะใช้ปั๊มช่วยผลักดันตะกอนที่อยู่ในท่อไหลออกไปยังภาชนะปลูก



รูปที่ 2-7 ถังกำจัดแก๊สและควบคุมระดับสารละลาย (ถังทรงกระบอกสีน้ำเงิน) ติดตั้งไว้ในโรงเรือนหลังคาที่บึ่งแสง สารละลายไหลเข้าทางด้านล่างของถัง และไหลออกทางด้านบน

3.4 ภาชนะปลูกพืช : ผู้วิจัยได้นำถังสำหรับผสมปูนกว้าง 79 เซนติเมตร ยาว 113 เซนติเมตร และลึก 27 เซนติเมตร จำนวน 3 ใบ มาดัดแปลงใช้เป็นภาชนะปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ด้วยเทคนิคการไหลลึก (deep-flow

technique : DFT) ใช้แผ่นโฟมยางความหนา 1 เซนติเมตร มาตัดเป็นแผ่นปลูก และเจาะรูปลูกผักโดยใช้ระยะห่างระหว่างต้น 10 เซนติเมตร และระยะระหว่างแถว 10 เซนติเมตร ภาชนะปลูกแต่ละใบสามารถปลูกผักได้ 58 ต้น มีพื้นที่ปลูกประมาณ 0.6 ตารางเมตร ภายในภาชนะบรรจุวัสดุยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์ (bio-ball) และติดตั้งหัวทรายพ่นอากาศ 5 หัว ดังนั้น ภาชนะปลูกพืชจึงทำหน้าที่แปลงสภาพสารอาหารครั้งที่สอง เพื่อแปลงสภาพสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอย และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการแปลงสภาพครั้งแรก ให้เป็นสารอนินทรีย์ที่พืชใช้ประโยชน์ได้ แปลงสภาพ NH_4^+ ที่อาจเหลืออยู่ให้เป็น NO_3^- และเปลี่ยนสภาพสารประกอบกำมะถันที่อาจอยู่ในรูปรีดิวซ์ให้เป็น SO_4^{2-} เพื่อให้พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ การเติมอากาศลงไปในภาชนะปลูก เพื่อช่วยให้ความเข้มข้นของ O_2 ในสารละลายสูงขึ้นในระดับที่มั่นใจได้ว่าเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของทั้งพืชและปลา สารละลายไหลเข้าสู่ภาชนะทางด้านบนของหัวถังด้านหนึ่ง แล้วไหลลงสู่ถังรวมสารละลายที่อยู่ใต้ภาชนะ ความลึกของสารละลายประมาณ 20 เซนติเมตร (รูปที่ 2-8)

ผู้วิจัยเลือกใช้ภาชนะปลูก 3 ใบ แทนการใช้ภาชนะขนาดใหญ่เพียงใบเดียวเพื่อให้สามารถปลูกพืชต่างอายุหมุนเวียนกันได้สะดวก ทำให้อัตราการดูดใช้ธาตุอาหารสม่ำเสมอ ในกรณีที่เกิดปัญหากับภาชนะใบหนึ่ง ใบใด ก็ยังคงมีอีก 2 ใบ ที่สามารถทำหน้าที่ได้โดยไม่ทำให้ระบบมีปัญหา



รูปที่ 2-8 ภาชนะปลูกซึ่งดัดแปลงจากถังผสมปูน ติดตั้งสูงจากพื้น 43 เซนติเมตร และถังรวมสารละลาย ติดตั้งราบกับพื้น สารละลายจากภาชนะปลูกทั้งสามใบไหลลงสู่ถังรวมใบเดียวกัน

3.5 ถังรวมสารละลาย (sump tank) : ผู้วิจัยใช้ถังสี่เหลี่ยมกว้าง 70 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร และลึก 40 เซนติเมตร ติดตั้งได้ภาชนะปลูกทั้ง 3 ใบ เพื่อรองรับสารละลายที่ไหลออกจากถังปลูก ติดตั้งปั๊มหมุนเวียนสารละลายกลับไปยังถังเลี้ยงปลา ซึ่งควบคุมปั๊มด้วยสวิทช์ลูกลอย

3.6 ระบบไหลเวียนสารละลายและการควบคุม : ระบบไหลเวียนกำหนดโดยใช้ระดับสารละลายในถังเลี้ยงปลาเป็นระดับอ้างอิง ระดับสูงสุดวัดจากขอบถังลึกไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร และระดับต่ำสุดลึกไม่เกิน 20 เซนติเมตร สารละลายจะหยุดไหลออกจากถังเมื่อระดับลดลงถึงระดับต่ำสุด ผู้วิจัยจะเติมน้ำเพิ่มเข้าสู่ระบบเมื่อระดับสูงสุดลดลงมากกว่า 15 เซนติเมตร

ตรงกลางถังเลี้ยงปลาติดตั้งท่อสองชั้น ชั้นนอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 90 เซนติเมตร ชั้นในเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 40 เซนติเมตร สารละลายไหลออกจากถังเลี้ยงปลาทางกันดั้ม โดยไหลผ่านท่อชั้นนอกบริเวณกันดั้ม วกขึ้นบนแล้วจึงไหลลงสู่กันดั้มอีกครั้ง ในกรณีที่เกิดปัญหาท่อรั่วซึม สารละลายจะไหลออกจากถังไม่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้ปลาเกิดอันตราย

สารละลายไหลจากถังเลี้ยงปลา ผ่านถังแปลงสภาพฯ ไปยังถังกำจัดแก๊สฯ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ระดับของสารละลายในถังทั้งสามถูกปรับให้อยู่ในระดับเดียวกันโดยอัตโนมัติ เมื่อทำให้ระดับในถังใดถังหนึ่งต่างจากถังใบอื่น ผู้วิจัยทำให้ระดับสารละลายในถังกำจัดแก๊สฯ ต่ำลงโดยวิธีกัลก้าน้ำออกจากถัง และทำให้สารละลายไหลขึ้นสู่ภาชนะปลูกพืชโดยวิธี hydraulic ram ในกรณีที่ระบบทั้งสองเกิดปัญหา จะเปลี่ยนเป็นวิธีสูบออกจากถังแปลงสภาพฯ ไปยังภาชนะปลูกโดยตรง

สารละลายจากภาชนะปลูกไหลลงสู่ถังรวมสารละลาย ซึ่งมีสวิทช์ลูกลอยติดตั้งไว้ สารละลายจะถูกสูบกลับไปยังถังเลี้ยงปลา เมื่อระดับสารละลายสูงถึงระดับที่กำหนดไว้ และปั๊มน้ำจะหยุดทำงานเมื่อระดับของสารละลายต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ขนาดของถังรวมสารละลายสามารถรองรับสารละลายที่ไหลล้นจากภาชนะปลูกได้ทั้งหมด ในกรณีที่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายรั่วไหลออกจากระบบในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินดังกล่าว

3.7 ระบบพ่นอากาศ : ระบบปลูกเลี้ยงที่ออกแบบขึ้นจ่ายอากาศจากเครื่องอัดอากาศกำลัง 58 วัตต์ แรงดันสูงสุด 35 kPa และอัตราการไหลของอากาศสูงสุด 70 ลิตร/นาที จ่ายอากาศผ่านท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ไปยังหัวทรายกระจายอากาศ ซึ่งติดตั้งไว้ในภาชนะปลูกใบละ 5 หัว รวม 15 หัว และถังเลี้ยงปลา 4 หัว ปรับอัตราการไหลของอากาศด้วยแรงดันปลายหัวจ่าย (ความลึกหัวจ่าย)

4. การทดสอบการทำงานของระบบปลูกผักกินใบ

ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของระบบปลูกเลี้ยงก่อนเริ่มทดลอง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆ ระหว่างการทดลอง โดยได้ทำการทดลอง ดังนี้

4.1 ทดสอบการรั่วไหลของน้ำและปรับระดับน้ำ : ผู้วิจัยได้เติมน้ำเข้าสู่ระบบจนถึงระดับที่ได้วางแผนไว้ ชั่งน้ำทิ้งไว้ 2 วัน เพื่อตรวจสอบการรั่วไหล และแก้ไขจุดต่างๆ ที่เกิดปัญหขึ้น

4.2 ทดสอบระบบหมุนเวียนน้ำ : ผู้วิจัยได้เปิดระบบให้น้ำหมุนเวียนตามที่ได้ออกแบบไว้เป็นเวลา 3 วัน และได้แก้ไขปัญหาดังต่อไปนี้ที่เกิดขึ้นกับระบบ เช่น

- น้ำล้นออกจากถังเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า (จำลองสถานการณ์กรณีเกิดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง) เนื่องจากเติมน้ำเข้าสู่ระบบมากเกินไป ผู้วิจัยได้แก้ไขโดยลดระดับให้เหมาะสม
- ปั๊มน้ำไม่ทำงาน เนื่องจากปั๊มเก่าชำรุด ได้แก้ไขโดยจัดซื้อปั๊มใหม่มาทดแทน
- สวิทช์ลูกลอยไม่ทำงานตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากเชือกแขวนลูกลอยเกี่ยวพันกับท่อน้ำและสายไฟฟ้าของปั๊มน้ำ แก้ไขโดยแยกตำแหน่งติดตั้งปั๊มน้ำและสวิทช์ลูกลอยให้ห่างจากกัน

4.3 ทดสอบการทำงานของระบบพ่นอากาศ : ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของระบบพ่นอากาศ และได้แก้ไขปัญหาท่อรั่ว ตามจุดต่างๆ ก่อนใช้งานจริง



รูปที่ 2-9 การทดสอบการทำงานของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่ได้ทดลองสร้างขึ้น

5. องค์ประกอบของระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาเพื่อปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร โดยใช้แนวคิดคล้ายกับการปลูกผักกินใบ แต่ได้ปรับปรุงให้มีรายละเอียดแตกต่างกันในประเด็นต่อไปนี้

- เติมน้ำเข้าสู่ถังแปลงสภาพสารอาหาร เพื่อต้องการให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสิ่งขับถ่ายจากปลาได้เร็วขึ้น ซึ่งคาดว่าจะทำให้ของเสียตกค้างอยู่ในถังแปลงสภาพในเวลาน้อยลง ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในระบบเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว
- เพิ่มแรงดันสารละลายก่อนจ่ายไปยังแปลงปลูกผัก เพื่อต้องการแก้ปัญหาสารแขวนลอยตกตะกอนในท่อ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ท่อตัน
- ใช้ภาชนะปลูกผักเพียงภาชนะเดียว เนื่องจากผักกินผลมีอายุเก็บเกี่ยวนาน ใกล้เคียงกับระยะเวลาในการเลี้ยงปลา จึงไม่จำเป็นต้องปลูกสลับอายุกัน เหมือนผักกินใบ

- ไม่มีท่อระบายของเสียออกจากระบบในกรณีฉุกเฉิน การทดสอบระบบแรกเป็นเวลา 3 เดือน ไม่พบว่าจำเป็นต้องใช้เลย แต่หากเกิดกรณีฉุกเฉินขึ้นจริง ผู้วิจัยได้วางแผนใช้เครื่องสูบน้ำสูบลำธารละลายออกจากระบบแทน

องค์ประกอบของระบบมีดังนี้

5.1 ถังเลี้ยงปลา (fish tank) : ผู้วิจัยเลือกใช้ถังไฟเบอร์กลาสขนาดและรูปทรงเหมือนกับระบบปลูกผักกินใบ ติดตั้งในโรงเรือนหลังคาพรางแสง เลี้ยงปลานิลจำนวน 50 ตัว (รูปที่ 2-10 A)

5.2 ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง : ผู้วิจัยเลือกใช้ถังทรงกระบอก ความจุ 200 ลิตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 58 cm สูง 94 cm ติดตั้งสูงจากพื้น 30 cm ต่อท่อระบายสิ่งขับถ่ายจากกลางถังเลี้ยงปลามายังกันถัง โดยใช้ท่อ PVC สีฟ้าขนาด 2 นิ้ว ปลายท่อเปิดสูงจากกันถัง 55 cm เพื่อป้องกันไม่ให้ของเสียไหลย้อนกลับไปยังถังเลี้ยงปลา และป้องกันไม่ให้สารละลายในถังเลี้ยงปลาดระดับต่ำกว่า 85 cm ถึงชั้นนอกรบจุไรโอบอลเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ และพ่นอากาศผ่านท่อ PVC สีฟ้าขนาด 1/2 นิ้ว ตลอดเวลา ถึงชั้นในทำจากท่อ PCV สีฟ้า ขนาด 6 นิ้ว สูง 77 cm เจาะรูโดยรอบและหุ้มด้วยตาข่ายขนาดช่อง 2 mm เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งขับถ่ายจากปลาขนาดใหญ่ที่ยังไม่ได้ย่อยสลายไหลผ่านไปยังถังชั้นใน ภายในถังชั้นในบรรจุซากปะการัง เพื่อควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ รวมทั้งเป็นตัวกรองสารแขวนลอยไม่ให้ไหลผ่านไปยังถังถัดไป (รูปที่ 2-10 B)

5.3 ถังกำจัดแก๊สและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง : ผู้วิจัยเลือกใช้ถังพลาสติกความจุ 80 ลิตร สารละลายจากถังแปลงสภาพไหลเข้าสู่ถังนี้ทางกันถัง ผ่านท่อ PVC สีฟ้า เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ปลายท่อสูงจากกันถัง 45 cm คลอบปลายท่อด้วยท่อ PVC สีฟ้า เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ด้านข้างเจาะรูและพ่นท่อด้วยตาข่าย ภายในท่อบรรจุซากปะการัง เพื่อใช้ทำหน้าที่เดียวกับท่อที่ติดตั้งไว้ในถังแปลงสภาพสารอาหาร สารละลายไหลผ่านท่อบรรจุซากปะการังออกสู่ถังชั้นนอก ซึ่งติดตั้งปั๊มและสวิทช์ลูกลอย กำหนดให้ปั๊มทำงานเมื่อระดับสารละลายในถังนี้สูงกว่า 50 cm และระดับสารละลายในถังพักฯ ต่ำกว่า 20 cm จากปากถัง (รูปที่ 2-10 C)

5.4 ถังพักและเพิ่มแรงดันสารละลาย (header tank) : ผู้วิจัยเลือกใช้ถังพลาสติกความจุ 200 ลิตร ติดตั้งสูงจากพื้น 1 เมตร ติดตั้งสวิทช์ลูกลอยเพื่อทำงานร่วมกับสวิทช์ลูกลอยของถังกำจัดแก๊สฯ สารละลายไหลเข้าสู่ถังนี้โดยการทำงานของปั๊มที่ติดตั้งไว้ในถังกำจัดแก๊สฯ เมื่อระดับสารละลายในถังนี้ต่ำกว่า 50 cm สารละลายไหลออกจากถังทางด้านข้างโดยผ่านวาล์วที่ต้องปิด-เปิดด้วยมือ ผู้วิจัยออกแบบให้วาล์วนี้ทำหน้าที่ควบคุมระบบทั้งหมด การปิดและเปิดระบบควบคุมด้วยวาล์วด้านข้างของถังใบนี้ (รูปที่ 2-10 D)

5.5 ภาชนะปลูกผัก (growing base) : ผู้วิจัยได้ออกแบบภาชนะปลูกเป็นรางปลูกขนาดใหญ่ กว้าง 1 เมตร ยาว 3 เมตร ภายในแบ่งเป็น 3 รางปลูกย่อย เพื่อให้สารละลายไหลอย่างสม่ำเสมอ สารละลายไหลออกจากถังพักและเพิ่มแรงดันเพียง 1 ท่อ ถูกกระจายออกเป็น 3 ท่อ ที่ปลายด้านหนึ่งของภาชนะปลูก และมีก๊อกรับอัตราการไหลให้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ท่อ สารละลายไหลอย่างต่อเนื่อง ความสูงของสารละลายในภาชนะ

ปลุกอยู่ในช่วง 3 – 5 cm ในกรณีที่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง สารละลายส่วนนี้ยังคงค้างอยู่ในภาชนะปลูก ทำให้พืชไม่ขาดน้ำ ภาชนะปลูกปิดด้วยแผ่นโฟมยาง เจาะรูสำหรับวางกระถาง 3 แถว (รูปที่ 2-12)



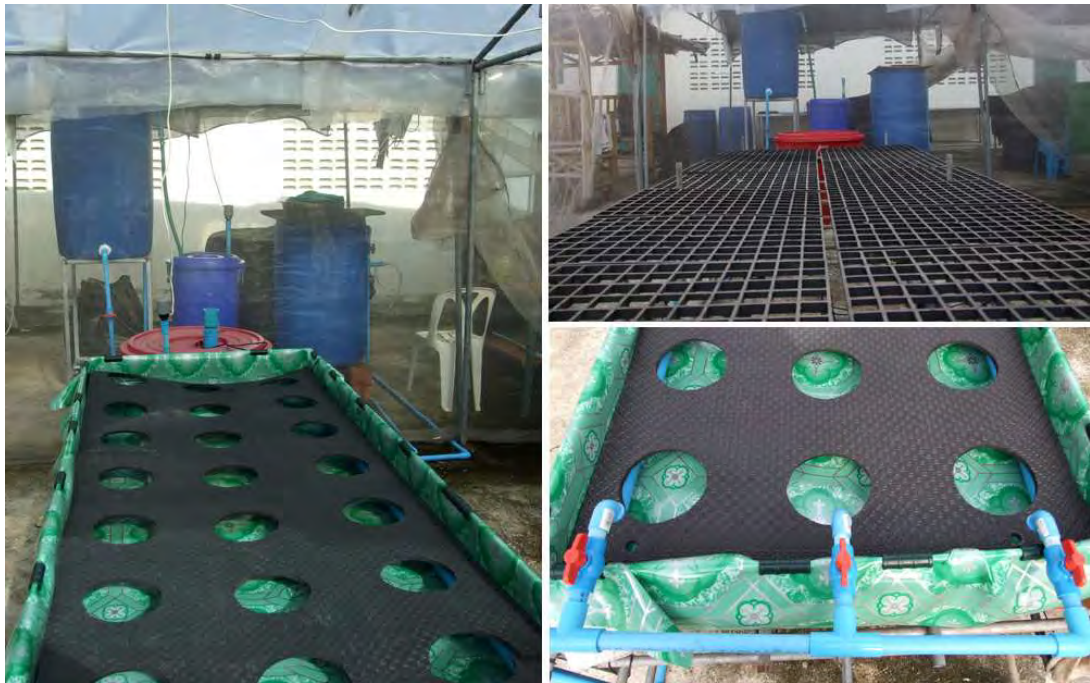
รูปที่ 2-10 การจัดวางถังของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา เพื่อใช้ปลูกผักกินผลร่วมกับผักสมุนไพร

- A : ถังเลี้ยงปลาขนาด 500 ลิตร ใช้เลี้ยงปลานิลจำนวน 50 ตัว
- B : ถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง
- C : ถังกำจัดแก๊สและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง
- D : ถังพักและเพิ่มแรงดันสารละลาย
- E : ถังรวมสารละลาย (sump tank)



รูปที่ 2-11 โครงสร้างภายในของถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง

5.6 ถังรวมสารละลาย (sump tank) : ผู้วิจัยเลือกใช้ถังพลาสติกความจุ 200 ลิตร ติดตั้งบนพื้นราบ ปากถังสูงจากพื้น 67 cm รองรับสารละลายที่ไหลกลับจากภาชนะปลูกทั้งหมด ติดตั้งสวิทช์ลูกลอยเพื่อควบคุมการทำงานของปั๊ม สวิทช์จะเปิดปั๊มให้ทำงาน เมื่อระดับของสารละลายสูงถึงระดับที่กำหนดไว้ เพื่อสูบน้ำสารละลายไหลกลับไปยังถังเลี้ยงปลา (รูปที่ 2-10 E)



รูปที่ 2-12 ภาชนะปลูกมีลักษณะเป็นรากปลูกกว้าง 1 เมตร ยาว 3 เมตร ปลูกด้วยเสื่อน้ำมัน ปิดด้วยแผ่นโฟมยาง เจาะรูวางกระถาง 3 แถว แถวละ 9 รู แต่ละรูห่างกัน 30 เซนติเมตร สารละลายไหลลงรางปลูกที่ปลายด้านหนึ่ง แล้วไหลไปลงถังรวมสารละลายที่ปลายอีกด้านหนึ่ง

5.7 ระบบไหลเวียนสารละลายและการควบคุม : ผู้วิจัยออกแบบให้สารละลายในระบบไหลไปทิศทางเดียว และหมุนเวียนสารละลายทั้งหมดกลับมายังถังเลี้ยงปลา ใช้ความสูงของปลายท่อสำหรับสารละลายไหลเข้าในแต่ละถังเป็นตัวป้องกันการไหลย้อนกลับ ปรับความสูงของสารละลาย (พลังงานศักย์) ก่อนไหลไปยังภาชนะปลูก และก่อนไหลกลับไปยังถังเลี้ยงปลา โดยใช้สวิทช์ลูกลอยเป็นตัวควบคุมอัตโนมัติ ระบบไหลเวียนทำงานอัตโนมัติเมื่อระดับสารละลายในถังเลี้ยงปลาสูงกว่า 80 cm จากพื้น และเปิดวาล์วให้สารละลายไหลออกจากถังพักและเพิ่มแรงดัน ในกรณีที่เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ปั๊มสารละลายจากถังรวม (sump tank) หยุดทำงาน ทำให้ระดับสารละลายในถังเลี้ยงปลาลดลงถึงระดับ 80 cm ระบบไหลเวียนจะหยุดโดยอัตโนมัติ ปลาและพืชสามารถดำรงชีวิตอยู่ต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง

6. การทดสอบการทำงานของระบบปลูกผักกินผลและผักสมุนไพร

ผู้วิจัยได้เติมน้ำเข้าสู่ระบบและทำการปรับระดับให้ตรงตามค่าที่ออกแบบไว้ ตรวจสอบความผิดปกติ และแก้ไขปัญหาการรั่วซึมของสารละลาย แก้ไขการทำงานของระบบไฟฟ้า จากนั้นเปิดระบบให้ทำงานอัตโนมัติติดต่อกันเป็นเวลา 2 วัน ก่อนเริ่มเลี้ยงปลา และย้ายกล้าพืชลงปลูกหลังเลี้ยงปลา 1 สัปดาห์

5. เอกสารอ้างอิง

- Craig S. and Helfrich, L.A. 2013. Understanding fish nutrition, feed, and feeding. Virginia Cooperative Extension. <http://pubs.ext.vt.edu/420/420-256/420-256.html> (retrieved 9 July 2013)
- Connolly, K. and Trebic, T. 2010. Optimization of a backyard aquaponic food production system. Faculty of Agricultural and Environmental Science, MacDonald Campus, McGill University.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan-Nik, W. and Hassan, A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*. 1511-1517.
- FAO, 2013. Cultured Aquatic Species Information Programme : *Oreochromis niloticus*. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/en (retrieved 9 July 2013)
- Hughey, T. 2005. Aquaponics for developing countries. *Aquaponics J.* 38:16-18.
- Lennard, W.A. 2004. Aquaponics research at RMIT University, Melbourne Australia. *Aquaponics J.* 35:18-24.
- Lennard, W. 2010. A new look at NFT aquaponics. *Aquaponics J.* 56:16-19.
- O'Brien, C. 2007. An aquaponic project in the Bahamas. *Aquaponics J.* 45:16-19.
- Martan, E. 2008. Polyculture of fishes in aquaponics and recirculating aquaculture. *Aquaponics J.* 48:28-33.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P. and Losordo, T.M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- Integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454.
- Rakocy, J. 2007. Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J.* 14-17.
- Savidov, N. 2005. Evaluation of aquaponics technology in Alberta, Canada. *Aquaponics J.* 37:20-25.

บทที่ 3 การทดสอบการปลูกเลี้ยง

หลังจากการสร้างและปรับปรุงแก้ไขการทำงานของระบบปลูกเลี้ยงแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองปลูกเลี้ยงทั้งสองระบบ ผลการทดลองเป็นดังนี้

1. การทดสอบเลี้ยงปลาระบบปลูกผักกินใบ

การทดสอบระบบปลูกเลี้ยงผักกินใบ ได้ดำเนินการคู่ขนานไปกับการปลูกผักโดยไม่ใช้ดินระบบรากแช่ลึก (deep-flow technique hydroponic culture: DFT hydroponic) โดยใช้โรงเรือนปลูกขนาดเล็ก กว้าง 1.20 เมตร ยาว 2.40 เมตร และลึก 15 เซนติเมตร หลังคามุมแผ่นพลาสติก ด้านข้างล้อมมุ้งสีขาว ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร ปลูกโดยเพาะเมล็ดในแท่งฟองน้ำขนาด 1 ลูกบาศก์นิ้ว เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นย้ายปลูกบนแผ่น polystyrofoam ปลูกโดยใช้ระยะระหว่างต้น 10 เซนติเมตร และระหว่างแถว 10 เซนติเมตร ปลูกด้วยสารละลายสูตร WU_NS07 ซึ่งพัฒนาขึ้นสำหรับผักกินใบของสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (ภาคผนวก 1) ใช้ความลึกของสารละลาย 12 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.0 mS/cm เติมน้ำเพื่อชดเชยปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากการคายระเหย 1 ครั้ง ในสัปดาห์ที่ 2 หลังย้ายปลูก ปลูกผัก 4 ชนิด คือ ผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า เก็บผลผลิตในพื้นที่ 1 ตารางเมตร (ตารางที่ 3-1) และสุ่มเก็บส่วนที่เหลือเพื่อนำไปหาค่าน้ำหนักแห้ง และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 3-5)

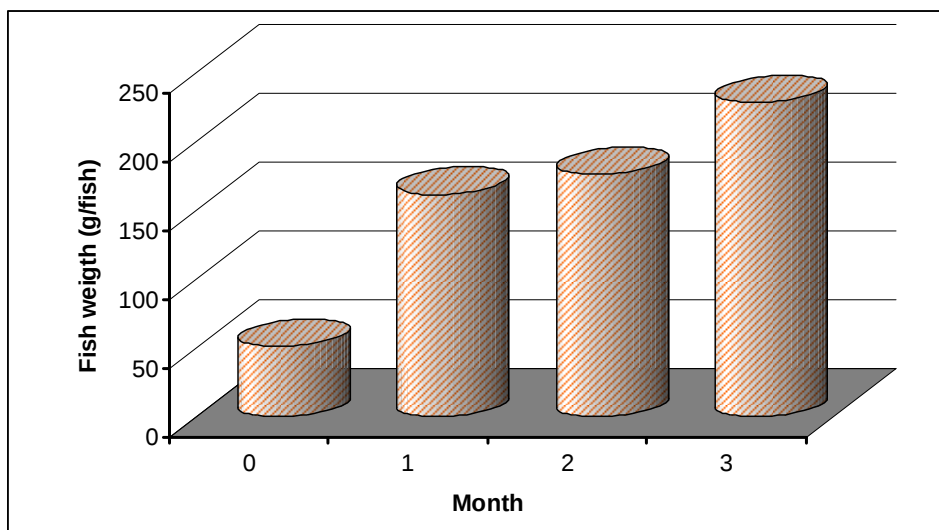
ตารางที่ 3-1 ผลผลิตของผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า ที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินแบบ DFT ด้วยสารละลายสูตร WU_NS07

ชนิดผัก	อายุเก็บเกี่ยว (วัน)	ผลผลิตสด (กรัม/ตารางเมตร)
ผักบุ้ง	26	3,027
ผักกาดขาว	28	5,440
ผักกวางตุ้ง	28	7,954
คะน้า	35	4,923

ผักบุ้งเจริญเติบโตตามความสูงอย่างรวดเร็ว การปลูกโดยไม่ใช้ดินตามปกติเหมาะสมที่จะเก็บเกี่ยวในช่วงอายุ 24 - 28 วัน หลังเพาะเมล็ด แม้จะได้น้ำหนักสดน้อยกว่าผักชนิดอื่น หากปล่อยให้เวลานานกว่านี้ ผักจะมีลำต้นคดงอ และยาวเกินไปสำหรับความยาวของถุงใส่ผักโดยทั่วไป ในขณะที่คะน้าโตช้าต้องใช้เวลา 35 วัน จึงจะได้ขนาดที่เหมาะสม แต่ยังคงให้ผลผลิตต่ำกว่าผักกาดขาวและกวางตุ้งที่ใช้เวลาปลูกเพียง 28 วัน ก็เข้าสู่ระยะที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวแล้ว (ตารางที่ 3-1)

สำหรับการทดสอบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาระบบปลูกผักกินใบ ผู้วิจัยจะดำเนินการเลี้ยงปลานิลแปลงเพศพันธุ์จิตรลดา 3 จำนวน 50 ตัว โดยเริ่มเลี้ยงตั้งแต่ปลา มีขนาดประมาณ 50 กรัม/ตัว เพื่อลดความเสี่ยงการตายจากสาเหตุอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลอง เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปโปรตีนสูง ชนิดเม็ดลอยน้ำ (สูตรอาหารสำหรับปลากินเนื้อ ผลิตโดยบริษัท ไทยลักซ์เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด 62/1 หมู่ 2 ตำบลหนองชุมพล อำเภอยาย้อย จังหวัดเพชรบุรี รหัสสูตรอาหาร สปัด 491) โดยเลี้ยงเพียงสูตรเดียวตลอดการทดลอง โดยให้อาหารวันละ 3 มื้อ เป็นเวลา 17 สัปดาห์ โดยไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบเลย และเก็บข้อมูลดังนี้

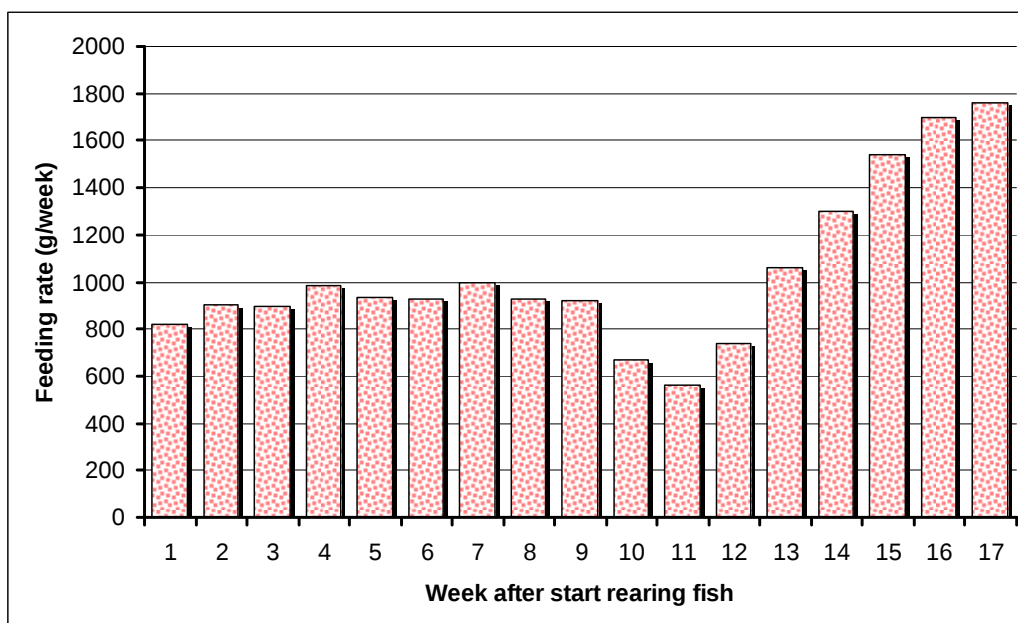
1.1 อัตราการเจริญเติบโตของปลา : สุ่มตัวอย่างปลามาชั่งน้ำหนักเดือนละครั้ง แล้วนำมาคำนวณน้ำหนักเฉลี่ย ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของปลาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเดือนแรกจาก 50.8 กรัม/ตัว เป็น 161.5 กรัม/ตัว ในเดือนถัดไป แต่หลังจากนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นลดลง แต่ปลายังคงเจริญเติบโตต่อไปได้ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากอัตราการกินอาหาร อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น สามารถใช้ปลูกเลี้ยงได้ แต่จำเป็นต้องปรับปรุงการจัดการระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลามากขึ้น (รูปที่ 3-1)



รูปที่ 3-1 อัตราการเจริญเติบโตของปลานิล จำนวน 50 ตัว เลี้ยงในถังขนาด 500 ลิตร ให้อาหารชนิดเม็ดลอยน้ำวันละ 3 ครั้ง ให้อาหารสูตรเดียวตลอดการทดลอง (ขนาดเม็ดเท่ากันตลอดการทดลอง)

1.2 อัตราการกินอาหารของปลา : ผู้วิจัยให้อาหารปลาด้วยมือในปริมาณที่ปลากินพออิ่ม เพื่อป้องกันอาหารเหลือ อันเป็นสาเหตุให้น้ำเน่าเสีย และได้ชั่งน้ำหนักอาหารที่ปลากินทุกๆ 5 - 7 วัน แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการกินเฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์ พบว่า อัตราการกินอาหารเพิ่มขึ้นในสัปดาห์แรก แต่หลังจากนั้นค่อนข้างคงที่ไปจนถึงสัปดาห์ที่ 9 แม้ปลาจะเจริญเติบโตขึ้น อัตราการกินอาหารลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 10 และ 11 ผู้วิจัยพบว่า อัตราการไหลของสารละลายในระบบค่อยๆ ลดลง เนื่องจากการอุดตันของของเสียจากปลา แม้จะใช้ปั๊มช่วยกระตุ้นการไหล 3 ครั้ง/วัน แต่ก็ไม่ได้ผล ในสัปดาห์ที่ 10 และ 11 ท่อที่เชื่อมต่อ

ระหว่างถึงกำจัดแก๊สและควบคุมระดับสารละลายไปยังภาชนะปลูกอุดตัน ทำให้สารละลายหยุดไหล อัตราการกินอาหารของปลาจึงลดลงอย่างมาก อันเนื่องมาจากของเสียสะสมในถังเลี้ยงปลามากเกินไป เมื่อผู้วิจัยแก้ไขโดยการทำความสะอาดเครื่องกรองและท่อ และปรับอัตราการกระตุ้นการไหลทุกๆ 15 นาที ด้วยปริมาณ 2500 ลิตร/ชั่วโมง อัตราการกินอาหารของปลาสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของสารละลายในระบบมีผลอย่างมากต่ออัตราการกินอาหารของปลา (รูปที่ 3-2)



รูปที่ 3-2 อัตราการกินอาหารของปลาในระยะเวลา 17 สัปดาห์ อัตราการกินค่อนข้างคงที่ใน 10 สัปดาห์แรก ลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 10 และ 11 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังจากนั้น

1.3 อัตราการมีชีวิตรอดของปลา : ผู้วิจัยสังเกตการตายของปลาในแต่ละวัน แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการมีชีวิตรอดตลอดระยะเวลาการเลี้ยง การทดลองเลี้ยงเป็นเวลา 17 สัปดาห์ ไม่พบว่ามีปลาตายเลย แสดงให้เห็นว่า ระบบปลูกเลี้ยงที่ออกแบบขึ้นสำหรับการทดลองนี้ สามารถใช้เพื่อการปลูกเลี้ยงได้ และน่าจะสามารถนำไปขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อการปลูกเลี้ยงในเชิงการค้าได้ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปลาที่มีขนาดประมาณ 300 กรัม/ตัว ซึ่งเป็นขนาดปกติที่เกษตรกรจับขาย แต่การทดลองนี้ใช้เวลาเลี้ยงนานกว่าปกติ ซึ่งน่าจะเกิดจากคุณภาพน้ำที่มีปัญหาในระยะ 12 สัปดาห์แรก การทดลองชี้ให้เห็นว่า จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลา ซึ่งจะทำให้ปลาสามารถกินอาหารได้มากขึ้นในอัตราเช่นเดียวกับหลัง 12 สัปดาห์ผ่านไปแล้ว (รูปที่ 3-2)

1.4 องค์ประกอบของอาหารเลี้ยงปลาและสิ่งขับถ่ายจากปลา : ผู้วิจัยได้ทดลองเลี้ยงโดยใช้อาหารปลาสำเร็จรูป ซึ่งผลิตโดยบริษัท ไทยลักซ์เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด (62/1 หมู่ 2 ตำบลหนองชุมพล อำเภอบางบาล จังหวัดเพชรบุรี) รหัสสูตรอาหาร สปีด 491 ผู้ผลิตรับรองคุณภาพขั้นพื้นฐานของอาหารปลาวัว โปรตีน ไม่น้อยกว่า 30 % ไขมัน ไม่น้อยกว่า 3 % กาก ไม่มากกว่า 8 % ผู้วิจัยสุ่มเก็บตัวอย่างอาหารไปบด อบแห้ง

แล้วนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ในทำนองเดียวกันก็สุ่มเก็บสิ่งขับถ่ายจากปลาที่เป็นของแข็งสับดาห์ละครั้ง นำมาอบแห้งรวมกัน แล้วนำไปวิเคราะห์ (ภาคผนวก 2) ผลการวิเคราะห์ พบว่า อาหารปลามีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ 50.9 g/kg ในขณะที่สิ่งขับถ่ายมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็น 62.4 g/kg อาหารปลามีฟอสฟอรัส 9.2 g/kg ในสิ่งขับถ่ายมีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเป็น 11.4 g/kg อาหารปลามีโพแทสเซียม 8.5 g/kg ในสิ่งขับถ่ายมีโพแทสเซียมลดลงเหลือ 2.0 g/kg อาหารปลามีโซเดียม 132.6 g/kg ในสิ่งขับถ่ายมีโซเดียมลดลงเหลือ 75.7 g/kg อาหารปลามีแคลเซียม 16.7 g/kg ในสิ่งขับถ่ายมีแคลเซียมเพิ่มขึ้นเป็น 21.9 g/kg อาหารปลามีแมกนีเซียม 2.2 g/kg ในสิ่งขับถ่ายมีแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเป็น 2.7 g/kg อาหารปลามีเหล็ก 498 mg/kg ในสิ่งขับถ่ายมีเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 2,786 mg/kg อาหารปลามีแมงกานีส 52 mg/kg ในสิ่งขับถ่ายมีแมงกานีสเพิ่มขึ้นเป็น 99 mg/kg อาหารปลามีสังกะสี 117 mg/kg ในสิ่งขับถ่ายมีสังกะสีเพิ่มขึ้นเป็น 863 mg/kg อาหารปลามีทองแดง 12 mg/kg ในสิ่งขับถ่ายมีทองแดงเพิ่มขึ้นเป็น 157 mg/kg (ตารางที่ 3-2)

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในอาหารปลาที่ใช้เลี้ยงและในสิ่งขับถ่ายจากปลา คำนวณโดยเทียบกับค่าน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (dry weight basis)

ธาตุอาหาร	หน่วย	อาหารปลา	สิ่งขับถ่ายจากปลา
คาร์บอน	g/kg	410.7	394.6
ไนโตรเจน	g/kg	50.9	62.4
ฟอสฟอรัส	g/kg	9.2	11.4
โพแทสเซียม	g/kg	8.5	2.0
โซเดียม	g/kg	132.6	75.7
แคลเซียม	g/kg	16.7	21.9
แมกนีเซียม	g/kg	2.2	2.7
เหล็ก	mg/kg	498	2,786
แมงกานีส	mg/kg	52	99
สังกะสี	mg/kg	117	863
ทองแดง	mg/kg	12	157

สิ่งขับถ่ายจากปลามีความเข้มข้นของธาตุคาร์บอน โพแทสเซียม และโซเดียมลดลง ในขณะที่ธาตุอื่นๆ เพิ่มขึ้น ปลาย่อยและดูดซึมสารประกอบคาร์บอน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ไปใช้เป็นส่วนใหญ่และขับถ่ายคาร์บอนในรูปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้คาร์บอนในสิ่งขับถ่ายที่เป็นของแข็งลดลง โพแทสเซียมและโซเดียมน่าจะลดลงเนื่องจากธาตุทั้งสองละลายน้ำได้ดี จึงตกค้างอยู่ในส่วนที่เป็นของแข็งน้อย ธาตุที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น น่าจะถูกขับถ่ายในรูปของแข็งหรือสารอินทรีย์

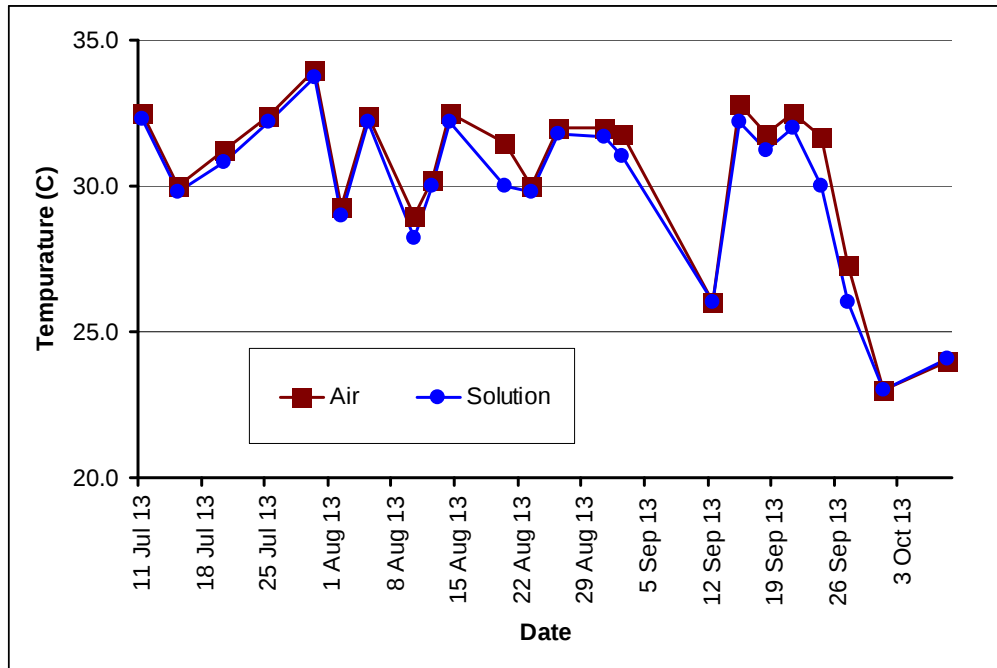
สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุอาหาร N/P ในสิ่งขับถ่ายจากปลา มีค่าเท่ากับ 5.5 ซึ่งใกล้เคียงกับสัดส่วนในอาหารปลา ในขณะที่ผักมีสัดส่วนเพียง 2.8 (พิสัย 1.9 - 3.9) แสดงให้เห็นว่า สารที่ปลาขับถ่ายน่าจะเป็นสารที่ไม่ผ่านการย่อยสลาย และสัดส่วนของธาตุอาหารทั้งสองนี้ไม่สอดคล้องกับความต้องการของผัก สัดส่วน Ca/Mg ในสิ่งขับถ่ายจากปลา มีค่าเท่ากับ 8.0 ซึ่งสูงกว่าสัดส่วนในอาหารเล็กน้อย ในขณะที่ผักมีสัดส่วน 5.8 (พิสัย 2.6 - 8.1) แสดงให้เห็นว่า ปลาย่อยและดูดซึมแมกนีเซียมไปใช้มากกว่าแคลเซียม และในสิ่งขับถ่ายมีแมกนีเซียมต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับแคลเซียม อาหารปลามีโพแทสเซียมต่ำกว่าโซเดียมมาก ในขณะที่พืชไม่ต้องการโซเดียม ดังนั้น การเลี้ยงปลาติดต่อกันเป็นเวลานานโดยไม่ถ่ายเทน้ำ อาจทำให้โซเดียมสะสมในระบบมากเกินไป และส่งผลกระทบต่อการใช้แคลเซียมอื่นๆ ของพืช

2. การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารละลายในระบบปลูกผักกินใบ

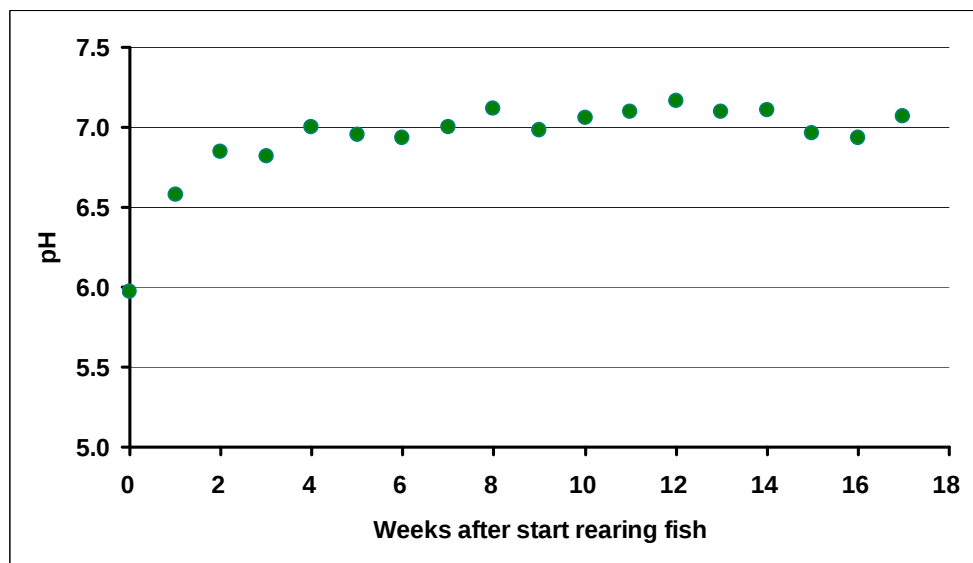
ผู้วิจัยมีแผนติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติและองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้เลี้ยงปลา อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เก็บตัวอย่างสารละลายในระบบไปวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการสัปดาห์ละ 1 ครั้ง (ดูรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ในภาคผนวก 3) สิ่งติดตาม มีดังนี้

2.1 อุณหภูมิของสารละลายเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของอากาศ : เพื่อศึกษาความเหมาะสมของระบบกับสภาพภูมิอากาศในเขตร้อน ระบบที่ดีไม่ควรทำให้อุณหภูมิของสารละลายสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการละลายของออกซิเจน อุณหภูมิสูงทำให้ต้องพองอากาศในอัตราที่สูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อช่วยให้พืชและปลามีออกซิเจนเพียงพอ ผู้วิจัยสุ่มวัดอุณหภูมิของอากาศและสารละลายสัปดาห์ละ 1 - 2 ครั้ง ระหว่างเวลา 13 - 14 นาฬิกา ซึ่งมักจะเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวัน รวม 23 ครั้ง การสุ่มวัดดำเนินการเฉพาะอากาศเหนือถังเลี้ยงปลา และสารละลายในถังเลี้ยงปลา ซึ่งตั้งอยู่ในโรงเรือนพรางแสง พบว่า อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 23.0 - 34.0 °C ส่วนอุณหภูมิของสารละลายอยู่ในช่วง 23.0 - 33.7 °C โดยอุณหภูมิทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามกัน โดยอุณหภูมิของสารละลายมีแนวโน้มต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศเล็กน้อย อุณหภูมิสูงขึ้นในวันที่แดดจัด และต่ำลงในวันที่มีเมฆหรือฝนตก (รูปที่ 3-3)

2.2 ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) : pH ของสารละลายส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนรูปของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ การทำงานของจุลินทรีย์ การดูดใช้ธาตุอาหารของพืช และการดำรงชีวิตของปลา ระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลามีสิ่งมีชีวิต 3 กลุ่ม อาศัยอยู่ร่วมกัน แต่ละกลุ่มมีช่วง pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ทำให้ต้องควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่แคบเพียง 6.5 - 7.0 ผู้วิจัยเลือกใช้ชากปะการังเพื่อควบคุม pH ของระบบ น้ำที่นำมาใช้เลี้ยงปลามีค่า pH 6.0 หลังเริ่มเลี้ยงค่า pH เพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุลในสัปดาห์ที่ 4 หลังจากนั้น pH เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.9 - 7.2 ซึ่งเป็นค่า pH ที่ต้องการของระบบ โดยไม่ต้องเติมสารใดๆ เพื่อปรับค่า pH เลย การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ชากปะการังสามารถใช้ควบคุม pH ของสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (รูปที่ 3-4)



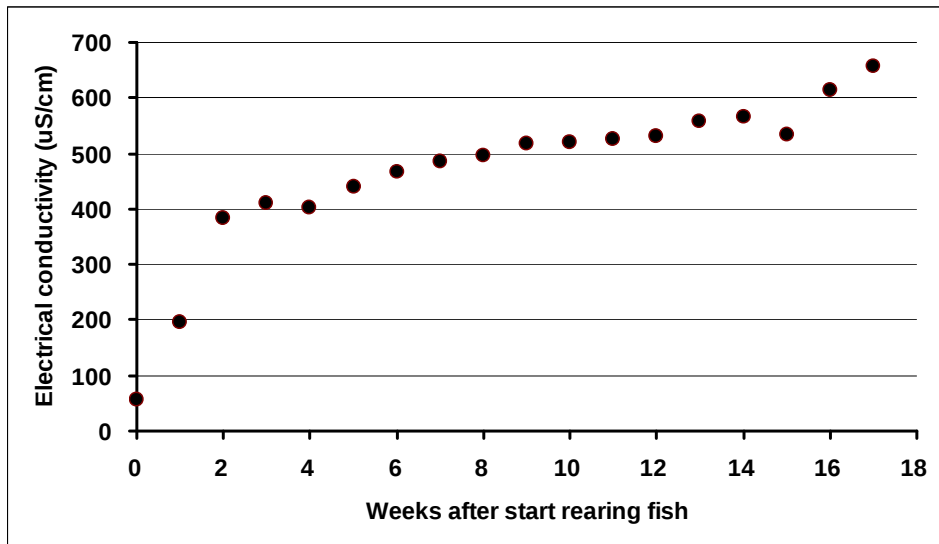
รูปที่ 3-3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและสารละลายในระหว่างการทดลอง อุณหภูมิของอากาศวัดเหนือถังเลี้ยงปลา ส่วนอุณหภูมิของสารละลายวัดในถังเลี้ยงปลา



รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายในระบบปลูกเลี้ยงตลอดการเลี้ยงเป็นเวลา 17 สัปดาห์

2.3 ค่าการนำไฟฟ้า : ค่าการนำไฟฟ้าบ่งชี้ความเข้มข้นของไอออนโดยรวม ค่าการนำไฟฟ้าต่ำแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในระบบต่ำ แต่หากค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินไปก็ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของพืชและปลา การทดลองนี้พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสูงขึ้นอย่างรวดเร็วใน 3 สัปดาห์แรก จากค่า 58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ เป็น 384 $\mu\text{S}/\text{cm}$ หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจน

มีค่าเป็น 566 $\mu\text{S/cm}$ ในสัปดาห์ที่ 14 และลดลงเหลือ 535 $\mu\text{S/cm}$ ในสัปดาห์ที่ 15 จากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งในสองสัปดาห์สุดท้าย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าสอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลา แต่ค่ายังคงต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (1,500 – 2,500 $\mu\text{S/cm}$) ค่าการนำไฟฟ้าไม่เข้าสู่สมดุลเหมือนค่า pH แสดงให้เห็นว่ามีไอออนบางชนิดสะสมในสารละลาย ซึ่งอาจเป็นไอออนที่พืชไม่ต้องการ หรือพืชต้องการในปริมาณไม่มาก (รูปที่ 3-5)



รูปที่ 3-5 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายในระบบปลูกเลี้ยง

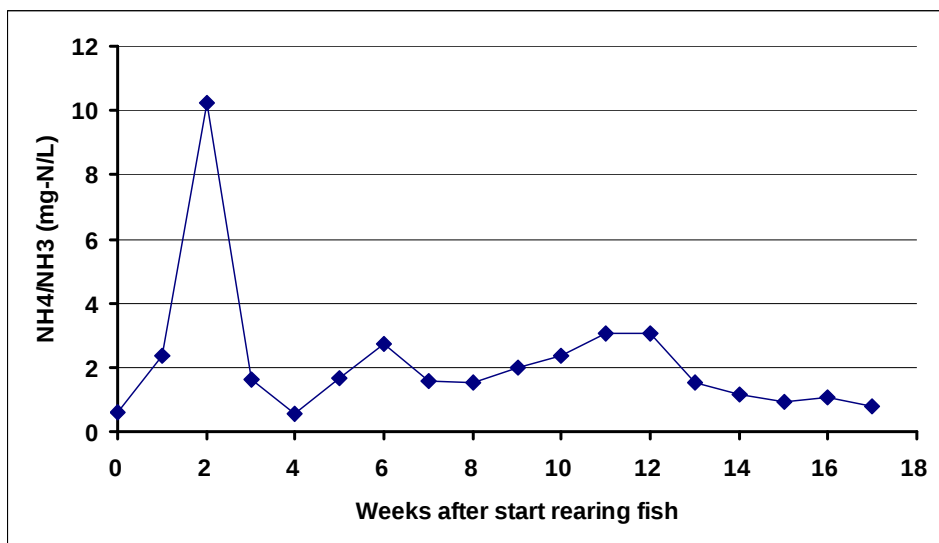
2.4 ความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจน : สารอนินทรีย์ไนโตรเจน ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, NO_2^- , NO_3^-)

ใช้บ่งชี้การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ที่สูงเกินไปเป็นอันตรายต่อพืชและปลา ระบบที่ดีควรมีความเข้มข้นของ NO_2^- ต่ำ หาก NO_2^- สูงเกินไปแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomonas* และกลุ่ม *Nitrobactor* ทำงานไม่สมดุลกัน ส่วน NO_3^- ควรมีความเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับอนินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่น หากต่ำเกินไปทำให้พืชเจริญเติบโตช้า การทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในสองสัปดาห์แรก โดยเพิ่มสูงสุด 10.25 mg-N/L ในสัปดาห์ที่ 2 และลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น (รูปที่ 3-6) การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ nitrification เริ่มทำงาน สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NO_3^- ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นค่อยๆ สูงขึ้นใน 4 สัปดาห์แรก (รูปที่ 3-7) การเปลี่ยนแปลงของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ หลังจากสัปดาห์ที่สองพบว่า สอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลา ความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ สูงขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 และ 6 ส่งผลให้อัตราการกินอาหารของปลาลดลงจากสัปดาห์ที่ 4 ในสัปดาห์ที่ 10 11 และ 12 เมื่อความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการกินอาหารของปลาลดลงมากเช่นเดียวกัน เมื่อผู้วิจัยแก้ไขปัญหาท่ออุดตัน และทำให้อัตราการไหลของ

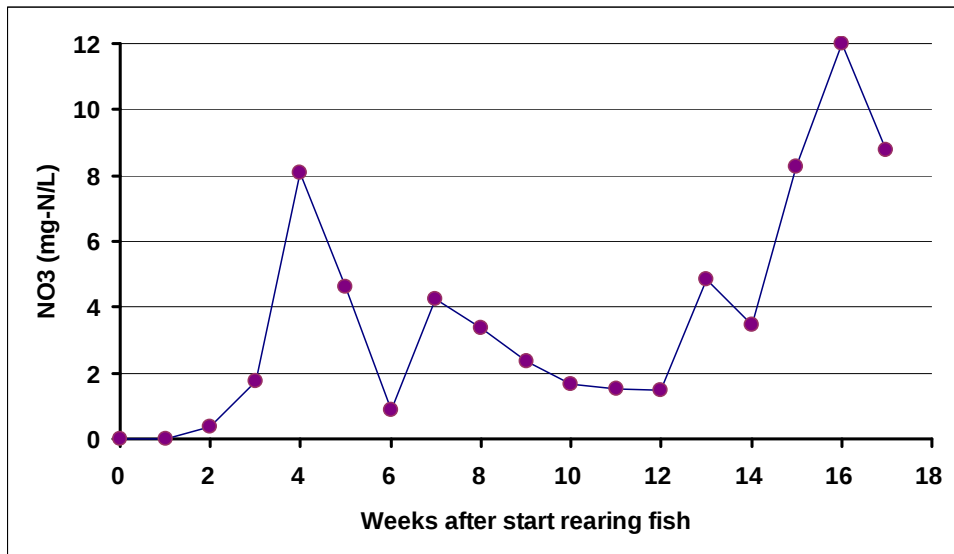
สารละลายสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ต่ำลง ส่งผลให้อัตราการกินอาหารของปลาสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3-2) การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ อัตราการไหลของสารละลาย และอัตราการกินอาหารของปลา มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน อัตราการไหลของสารละลายสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ลดลง และปลากินอาหารได้มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ สูงกว่า 2 mg-N/L ส่งผลให้ปลากินอาหารได้ลดลงอย่างมาก และเมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mg-N/L ส่งผลให้ปลากินอาหารได้ดี (รูปที่ 3-6)

ความเข้มข้นของ NO_3^- เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 4 สัปดาห์แรก สอดคล้องกับความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ที่ลดลง แสดงให้เห็นว่า กระบวนการ nitrification เริ่มทำงาน ในสัปดาห์ที่ 5 – 14 แปรปรวนอยู่ในช่วง 2 – 4 mg-N/L ซึ่งน่าจะเกิดจากการดูดใช้ของพืช ความเข้มข้นของ NO_3^- ลดลงในสัปดาห์ที่พืชดูดใช้มาก หลังสัปดาห์ที่ 12 พบว่า ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ในระยะนี้น่าจะเกิดจากปลากินอาหารได้มากขึ้น และธาตุอาหารจุลภาคหมดลง ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่ดี ส่งผลให้การดูดใช้ต่ำลงด้วย อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นยังคงต่ำกว่าความเข้มข้นโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมาก (100 – 150 mg-N/L) แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ NO_3^- ในระบบปลูกเลี้ยงไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช และน่าจะเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของพืชด้วย (รูปที่ 3-7)

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ NO_2^- ด้วยเช่นกัน แต่มีความเข้มข้นต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ แสดงให้เห็นว่า กระบวนการ nitrification เกิดขึ้นได้ดี NO_2^- สามารถเปลี่ยนเป็น NO_3^- ได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่พบการสะสมของ NO_2^- ในระบบ

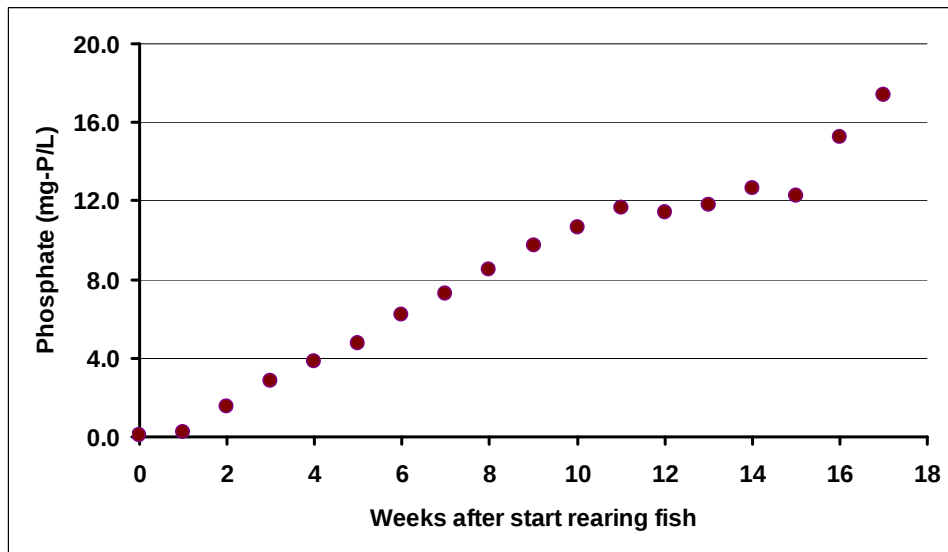


รูปที่ 3-6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ในสารละลายของระบบปลูกเลี้ยง



รูปที่ 3-7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NO_3^- ในสารละลายของระบบปลูกเลี้ยง

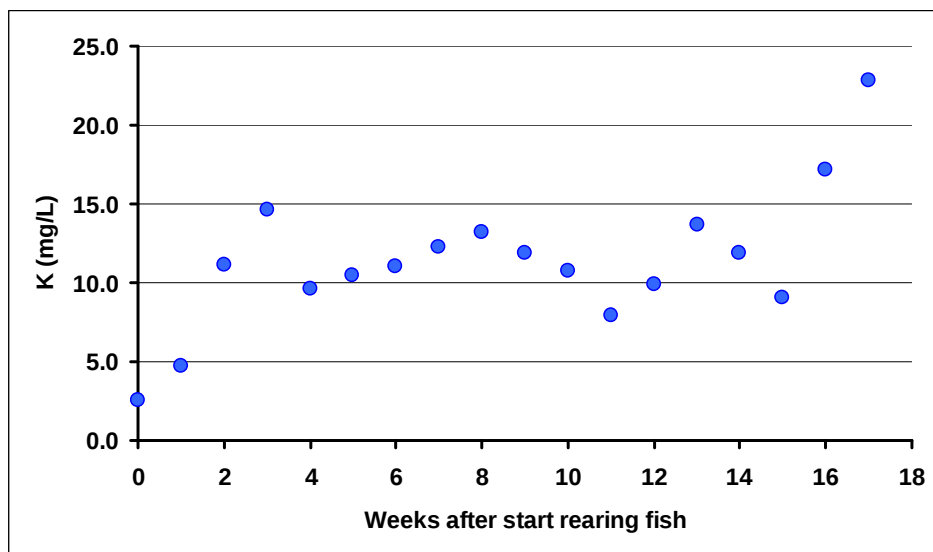
2.5 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส : ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 0.09 mg-P/L ในน้ำที่ใช้เลี้ยงปลาไปจนถึง 11.66 mg-P/L ในสัปดาห์ที่ 11 จากนั้นความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลงมากนักไปจนถึงสัปดาห์ที่ 15 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในสองสัปดาห์สุดท้าย (รูปที่ 3-8) การเปลี่ยนแปลงสะท้อนอัตราการกินอาหารของปลาดังที่ได้กล่าวแล้ว การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบมากกว่าความต้องการของพืช ทำให้เกิดการสะสม ส่งผลให้ความเข้มข้นในสารละลายสูงขึ้น การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปต้องเติมปุ๋ยฟอสฟอรัสให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 25 – 75 mg-P/L เพื่อให้มั่นใจว่า พืชได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ ในขณะที่ความเข้มข้นในระบบปลูกเลี้ยงต่ำกว่ามาก และยังคงมากกว่าความต้องการของพืช แสดงให้เห็นว่าพืชขาดธาตุอาหารชนิดอื่น จึงทำให้ความต้องการฟอสฟอรัสน้อยลงตามไปด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ใน 10 สัปดาห์แรก ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการกินอาหารของปลาค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาดังกล่าว โดยมีอัตราการสะสมฟอสฟอรัสของระบบประมาณ 894 mg-P/สัปดาห์ ในช่วงนี้ปลากินอาหารเฉลี่ย 898 กรัม/สัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสเพิ่มเข้าสู่ระบบประมาณ 8.24 กรัม/สัปดาห์ เมื่อเข้าสู่ช่วงสัปดาห์ที่ 11 - 15 ความเข้มข้นในระบบค่อนข้างคงที่ เนื่องจากอัตราการกินอาหารของปลาลดลง หลังจากผู้วิจัยปรับปรุงแก้ไขระบบให้อัตราการไหลเวียนสารละลายเพิ่มขึ้น และปลากินอาหารได้มากขึ้นและเป็นช่วงเวลาที่ผักเจริญเติบโตได้เข้ามา จึงพบว่า ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายกลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง (รูปที่ 3-8)



รูปที่ 3-8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

2.6 ความเข้มข้นของโพแทสเซียม : ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยงสูงขึ้นในสามสัปดาห์แรก และลดลงในสัปดาห์ที่ 4 หลังจากนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6 – 16 mg/L โดยมีค่าต่ำสุดในสัปดาห์ที่ 11 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลา และการเจริญเติบโตของพืช ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเหมือนฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่า ไม่เกิดการสะสมของโพแทสเซียมในระบบ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในช่วง 200 – 300 mg/L ในขณะที่ความเข้มข้นในระบบปลูกเลี้ยงของการทดลองนี้ต่ำกว่ามาก และไม่มีแนวโน้มสะสมในระบบ แสดงให้เห็นว่า โพแทสเซียมที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช (รูปที่ 3-9) การปลูกเลี้ยงโดยทั่วไป มักเติมโพแทสเซียมลงไปในระบบในรูป KOH หรือซีเถ้า เพื่อปรับ pH ของสารละลายให้สูงขึ้น สำหรับการทดลองนี้ โพแทสเซียมในสารละลายเกิดขึ้นจากอาหารปลาและเจือปนอยู่ในน้ำที่ใช้เลี้ยง โดยไม่มีการเติมเพิ่มลงไปแต่อย่างใด ในช่วง 10 สัปดาห์แรก ปลา กินอาหารเฉลี่ย 898 กรัม/สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่า มีโพแทสเซียมเพิ่มเข้าสู่ระบบประมาณ 7.67 กรัม/สัปดาห์ เนื่องจากสารประกอบของโพแทสเซียมส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ดี โพแทสเซียมที่เข้าสู่ระบบจึงละลายอยู่ในน้ำเกือบทั้งหมด และทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้นประมาณสัปดาห์ละ 9.59 mg/L ในระหว่างสัปดาห์ที่ 1 - 15 พบว่า ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ระดับ 10 mg/L โดยไม่เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า อัตราการใช้โพแทสเซียมของระบบใกล้เคียงกับอัตราที่เพิ่มเข้าสู่ระบบ

สัดส่วนเฉลี่ยของ Na/K โดยจำนวนโมลเท่ากับ 4.4 และสูงกว่า 1.0 ตลอดการทดลอง ในขณะที่ค่าแนะนำไม่ควรเกิน 0.6 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมในระบบปลูกเลี้ยงสูงเกินไป และน่าจะเป็นสาเหตุให้พืชแสดงอาการขาดโพแทสเซียม

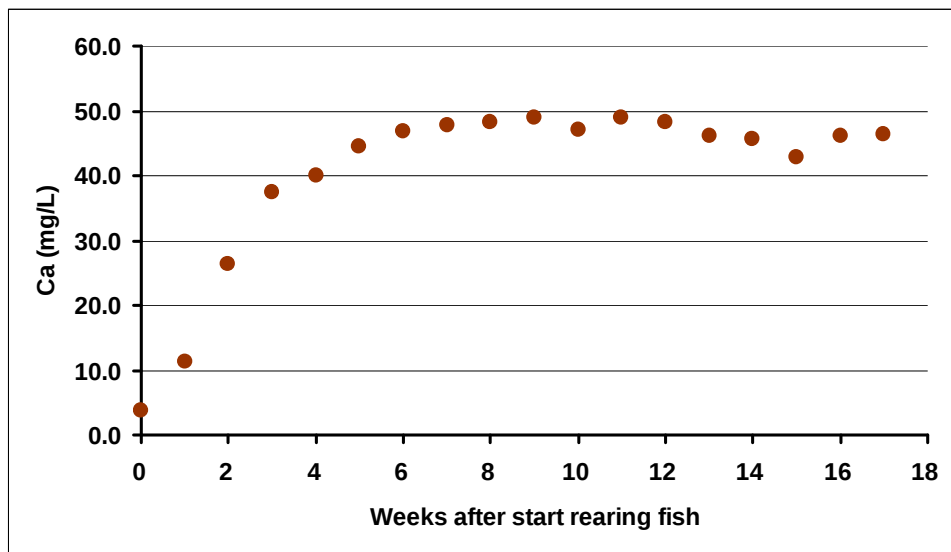


รูปที่ 3-9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

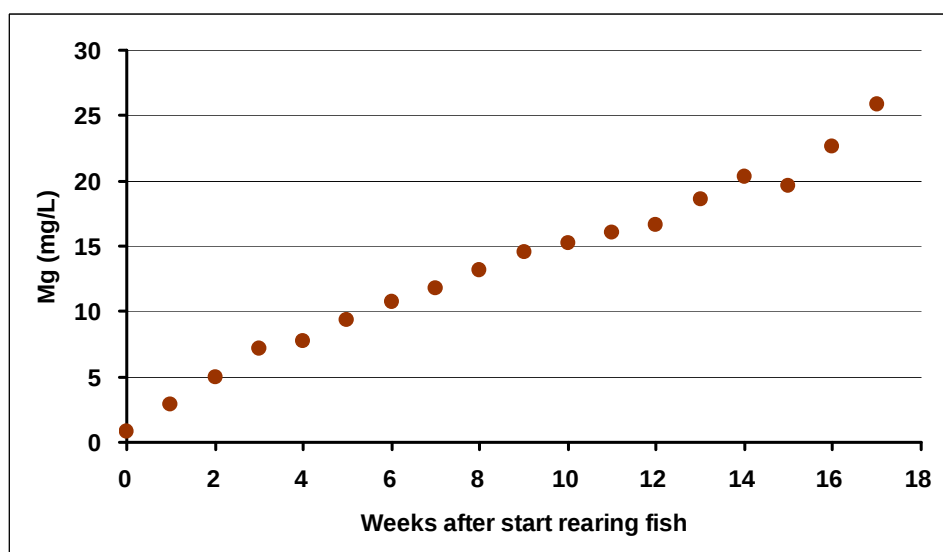
2.7 ความเข้มข้นของแคลเซียม : ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 3.8 mg/L อย่างต่อเนื่องไปจนถึงสัปดาห์ที่ 9 จากนั้นคงที่ไปจนถึงสัปดาห์ที่ 12 และกลับลดลงในสัปดาห์ที่ 13 – 15 (รูปที่ 3-10) แคลเซียมเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า และมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลในสัปดาห์ที่ 9 แสดงให้เห็นว่า อัตราการดูดใช้ของพืชต่ำกว่าอัตราการปลดปล่อยจากระบบปลูกเลี้ยงสารละลายในระยะ 9 สัปดาห์แรก จึงทำให้เกิดการสะสมแคลเซียมในสารละลาย ในช่วงสัปดาห์ที่ 13 – 15 อัตราการปลดปล่อยต่ำลงใกล้เคียงกับอัตราการดูดใช้ของพืช แคลเซียมในระบบมาจากอาหารปลาและการละลายของซากปะการัง เนื่องจากค่า pH ของสารละลายค่อนข้างคงที่หลังจากสัปดาห์ที่ 4 ดังนั้น อัตราการละลายของซากปะการังจึงน่าจะคงที่ด้วยเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมจึงขึ้นอยู่กับอัตราการกินอาหารของปลา ในสัปดาห์ที่ 11 – 12 อัตราการกินอาหารของปลาลดลงมาก จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำลงในสัปดาห์ที่ 13 – 15 สารละลายสำหรับปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปใช้ความเข้มข้นของแคลเซียม 100 – 200 mg/L ในขณะที่ความเข้มข้นในระบบปลูกเลี้ยงของการทดลองนี้สูงสุดเพียง 49 mg/L พืชน่าจะต้องการแคลเซียมสูงกว่านี้เมื่อความเข้มข้นของธาตุอาหารอื่นสูงขึ้น

2.8 ความเข้มข้นของแมกนีเซียม : ความเข้มข้นของแมกนีเซียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0.8 mg/L เป็น 20.4 mg/L ในสัปดาห์ที่ 14 แสดงให้เห็นว่าพืชต้องการแมกนีเซียมน้อยกว่าปริมาณที่เกิดขึ้นในระบบ จึงทำให้เกิดการสะสมแมกนีเซียม ในสัปดาห์ที่ 15 ความเข้มข้นลดลงเล็กน้อยสอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลาที่ลดลงในสัปดาห์ก่อนหน้านี้ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการให้มากกว่าปริมาณที่สะสม เมื่อปลากินอาหารเพิ่มขึ้นในระหว่างสัปดาห์ที่ 12 - 17 จึง

กลับทำให้ความเข้มข้นสะสมเพิ่มขึ้นอีกในสองสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง (รูปที่ 3-11) สารละลายสำหรับปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปใช้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมประมาณ 50 mg/L แสดงให้เห็นว่า พืชดูดใช้แมกนีเซียมได้น้อย ซึ่งน่าจะเกิดจากธาตุอาหารชนิดอื่นจำกัดการเจริญเติบโต แมกนีเซียมในระบบน่าจะมาจากอาหารปลาและการละลายของซากปะการัง ในช่วง 10 สัปดาห์แรก ซึ่งปลากินอาหารในอัตราค่อนข้างคงที่ แมกนีเซียมเข้าสู่ระบบในรูปอาหารปลา ประมาณ 1.95 กรัม/สัปดาห์ หากแมกนีเซียมในอาหารปลาละลายน้ำได้ทั้งหมดและพืชไม่ดูดใช้เลย จะส่งผลให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นสัปดาห์ละ 2.4 mg/L อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่า แมกนีเซียมสะสมในระบบเพิ่มขึ้นเพียงสัปดาห์ละ 1.4 mg/L เท่านั้น

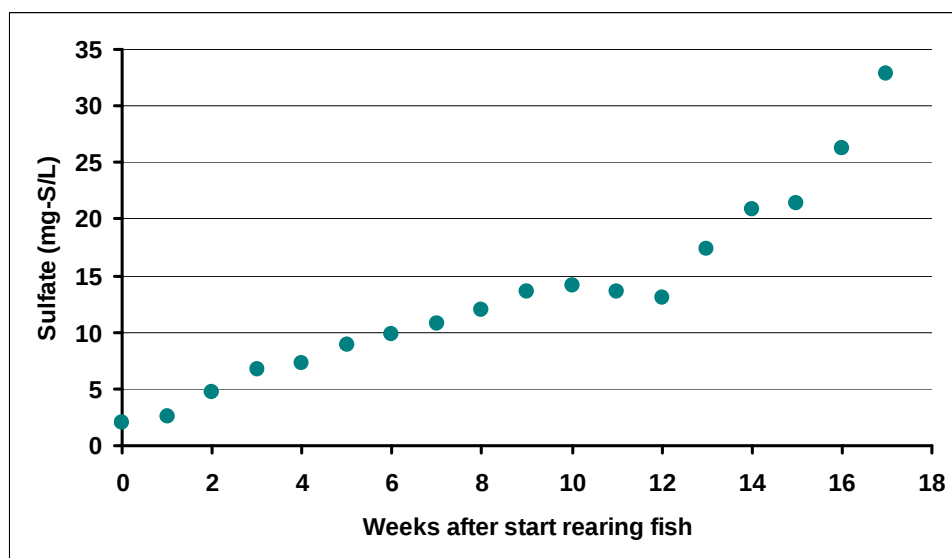


รูปที่ 3-10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง



รูปที่ 3-11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแมกนีเซียมในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

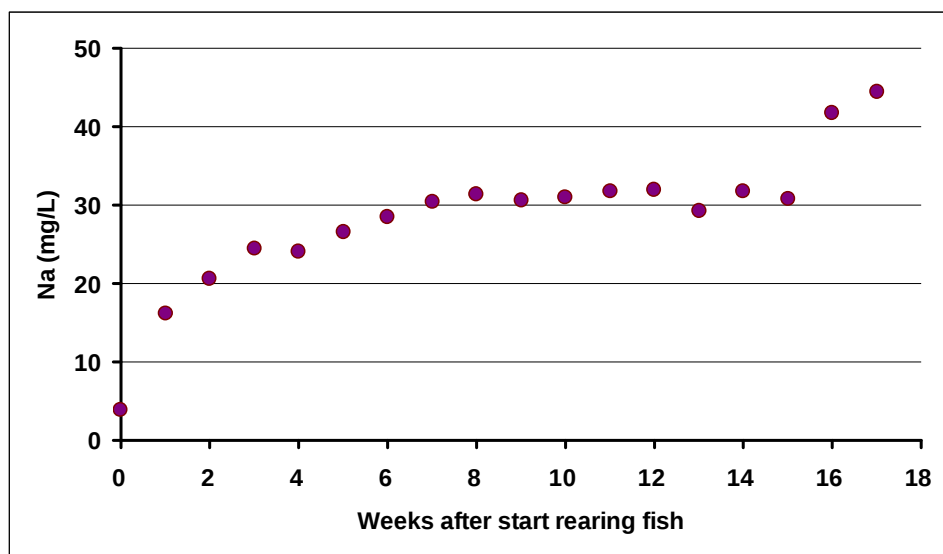
2.9 ความเข้มข้นของกำมะถัน : ความเข้มข้นของกำมะถันในสารละลายปลูกเลี้ยงเพิ่มสูงขึ้นจาก 2.0 mg/L เป็น 14.1 mg/L ในสัปดาห์ที่ 10 จากนั้นลดลงเหลือ 13.0 mg/L ในสัปดาห์ที่ 12 และเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น (รูปที่ 3-12) กำมะถันที่เกิดขึ้นในระบบน่าจะมาจากทั้งอาหารปลาและการละลายของซากปะการัง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลา ส่วนที่มาจากอาหารปลาน่าจะมากกว่า การสะสมในระบบแสดงให้เห็นว่า พืชใช้กำมะถันได้น้อยกว่าปริมาณที่เกิดขึ้น หลังสัปดาห์ที่ 12 ธาตุอาหารจุลภาคมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ช้ามาก พืชจึงดูดใช้กำมะถันได้น้อยลงตามไปด้วย ส่งผลให้ความเข้มข้นของกำมะถันในระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สารละลายสำหรับปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปใช้ความเข้มข้นของกำมะถันในช่วง 50 - 200 mg/L ความเข้มข้นในระบบปลูกเลี้ยงต่ำกว่าค่าดังกล่าวมาก แต่ยังเกิดการสะสม แสดงให้เห็นว่า พืชดูดใช้กำมะถันได้น้อยเนื่องจากธาตุอาหารชนิดอื่นจำกัดการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับแมกนีเซียม



รูปที่ 3-12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกำมะถันในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

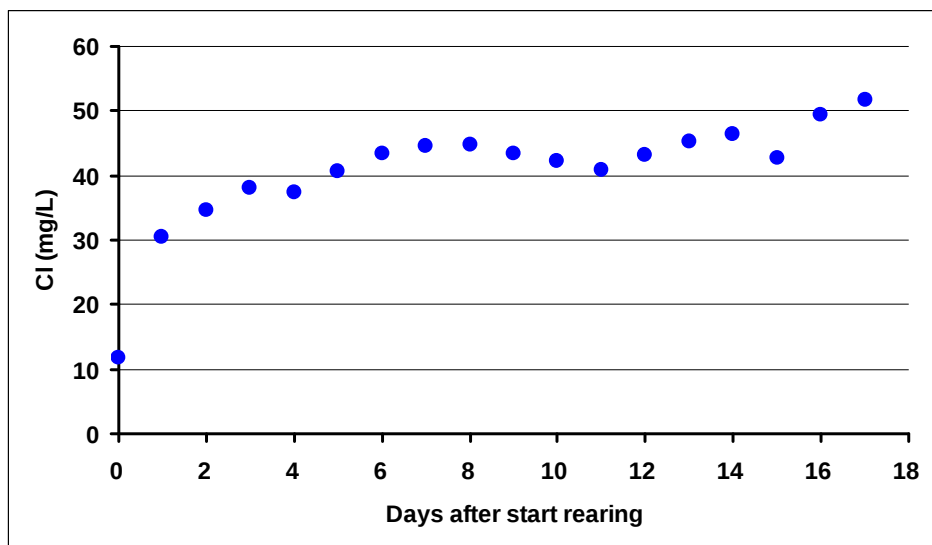
2.10 ความเข้มข้นของโซเดียม : โซเดียมไม่เป็นธาตุอาหารพืช แต่เป็นธาตุอาหารของปลา การทดลองนี้พบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 3.9 mg/L เป็น 30.4 mg/L ในสัปดาห์ที่ 7 และมีแนวโน้มคงที่ในระดับนี้ไปจนถึงสัปดาห์ที่ 15 หลังจากนั้นเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งในสองสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง (รูปที่ 3-13) การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณโซเดียมที่เกิดขึ้นในระบบมีมากกว่าความต้องการใช้ในระยะ 7 สัปดาห์แรก แต่หลังจากนั้นปริมาณความต้องการและเกิดขึ้นในระบบสมดุลกัน ความเข้มข้นเมื่อเข้าสู่สมดุลต่ำกว่าระดับที่เป็นพิษต่อพืช (70 mg/L) แต่ความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับโพแทสเซียม (สัดส่วนโดยจำนวนโมลของ Na/K เท่ากับ 4.4)

ดังนั้น แมโซเดียมจะไม่เป็นพิษโดยตรงต่อฟิช แต่น่าจะส่งผลให้ฟิชดูดใช้โพแทสเซียมได้น้อยลง และแสดงอาการขาดโพแทสเซียมอย่างรุนแรง เมื่อปลูกซ้ำหลังจากครั้งแรก (รูปที่ 3-18)



รูปที่ 3-13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

2.11 ความเข้มข้นของคลอรีน : คลอรีนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของทั้งฟิชและปลา ฟิชต้องการคลอรีนเพียงเล็กน้อยในรูปคลอไรด์ (Cl^-) ดังนั้นความเข้มข้นในน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจึงเพียงพอต่อความต้องการของฟิช ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สูงเกินไปทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงและเป็นพิษต่อฟิช น้ำสำหรับใช้เตรียมสารละลายสำหรับปลูกฟิชโดยไม่ใช้ดินโดยทั่วไปควรมีความเข้มข้นของคลอไรด์น้อยกว่า 35 mg/L แต่ไม่ควรเกิน 50 mg/L การทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 12 mg/L ในน้ำที่ใช้เลี้ยง ขึ้นไปอยู่ในช่วง 40 – 45 mg/L ในสัปดาห์ที่ 5 และแปรปรวนอยู่ในช่วงนี้จนถึงสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้องการใช้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับปริมาณที่เกิดขึ้นในระบบ และความเข้มข้นยังอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของฟิช (350 mg/L) สารประกอบคลอไรด์ส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ดี คลอไรด์ที่ติดมากับซากปะการังจึงน่าจะมีเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่น่าจะมาจากอาหารปลา

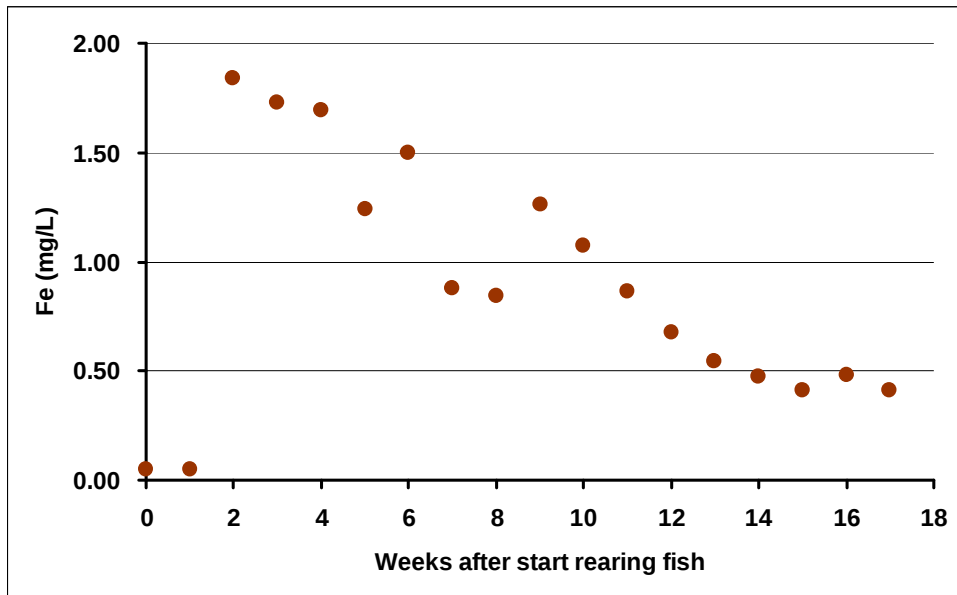


รูปที่ 3-14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

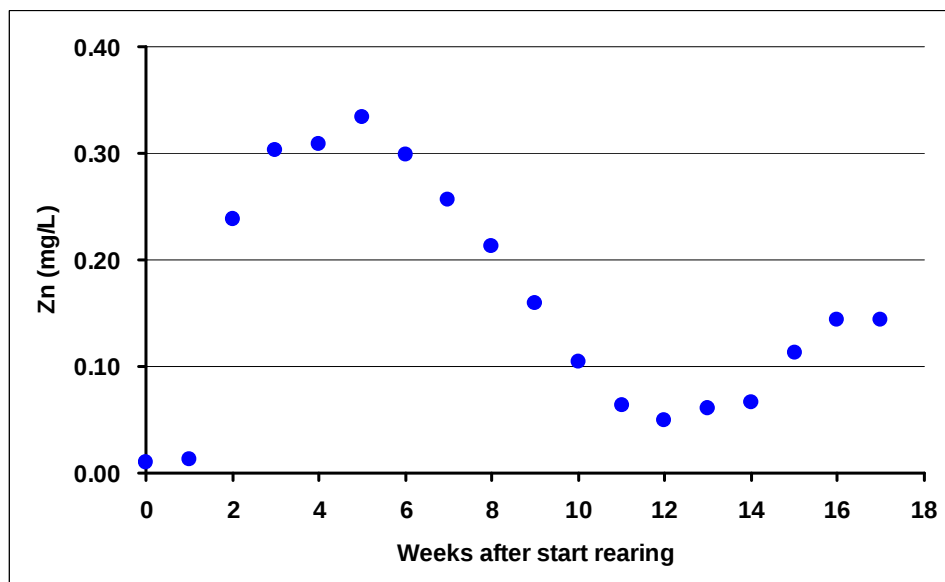
2.12 ความเข้มข้นของเหล็ก : เหล็กเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นทั้งพืชและปลา น้ำที่ใช้ปลูกเลี้ยงมีความเข้มข้นของเหล็กต่ำกว่า 0.1 mg/L ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ผู้วิจัยจึงได้เติมเหล็กลงไปในรูปแบบประกอบเชิงซ้อน (Fe-DTPA) โดยคำนวณให้มีความเข้มข้นประมาณ 2.0 mg/L ในสัปดาห์ที่ 2 จึงพบว่า น้ำที่ใช้ปลูกเลี้ยงมีความเข้มข้นของเหล็ก 1.8 mg/L หลังจากนั้นความเข้มข้นของเหล็กลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าต่ำกว่า 1.0 mg/L ในสัปดาห์ที่ 11 ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ส่งผลให้พืชแสดงอาการขาดธาตุอาหารจุลภาคอย่างรุนแรง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กไม่สอดคล้องกับอัตราการกินอาหารของปลา แสดงให้เห็นว่า แม้ความเข้มข้นของเหล็กในสิ่งขับถ่ายจากปลาจะสูง (ตารางที่ 3-1) แต่ปริมาณไม่เพียงพอ หรือเหล็กส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ผักต้องการเหล็กเฉลี่ยเดือนละ 206 mg/m² หรือผู้ปลูกเลี้ยงควรเติมเหล็กในรูปแบบ Fe-DTPA (11.3 % Fe) ลงไปในระบบเดือนละ 1.82 g/m²

2.13 ความเข้มข้นของสังกะสี : สังกะสีเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นทั้งต่อพืชและปลาเช่นเดียวกับเหล็ก ในน้ำที่ใช้ปลูกเลี้ยงมีความเข้มข้นของสังกะสีเพียง 0.01 mg/L ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ผู้วิจัยจึงได้เติมสังกะสีลงไปในระบบ ทำให้ความเข้มข้นของสังกะสีสูงขึ้นเป็น 0.24 mg/L ในสัปดาห์ที่ 2 หลังจากนั้นพบว่า สังกะสีสูงขึ้นอีกจนถึงสัปดาห์ที่ 5 และลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น โดยลดลงต่ำสุดในสัปดาห์ที่ 12 แล้วกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณสังกะสีในระบบส่วนหนึ่งมาจากอาหารปลา พืชต้องการสังกะสีน้อยในระยะเริ่มปลูกเลี้ยง ทำให้เกิดการสะสมในระบบ เมื่อพืชเจริญเติบโตทำให้ความต้องการสังกะสีมากขึ้น และมากกว่า

ปริมาณที่เกิดขึ้นในระบบ ทำให้ความเข้มข้นของสังกะสีลดลง หลังสัปดาห์ที่ 12 พืชขาดธาตุอาหารจุลภาคอย่างรุนแรง และเจริญเติบโตช้ามาก ความต้องการสังกะสีจึงน้อยลงตามไปด้วย ทำให้เกิดการสะสมสังกะสีในระบบอีกครั้ง การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า หากพืชเจริญเติบโตตามปกติ ปริมาณสังกะสีที่เกิดจากอาหารปลาไม่เพียงพอ ในช่วงสัปดาห์ที่ 5 -11 พืชต้องการสังกะสีเฉลี่ยเดือนละ 82.6 mg/m^2 ซึ่งเป็นปริมาณที่ควรเติมลงไปในระบบ



รูปที่ 3-15 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง



รูปที่ 3-16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายที่ใช้ปลูกเลี้ยง

3. การทดสอบปลูกผักในระบบปลูกผักกินใบ

ผู้วิจัยปลูกผักกินใบชนิด 4 ชนิด คือ ผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และผักคะน้า โดยปลูกหมุนเวียนสลับกันในแต่ละภาชนะปลูก เพื่อให้มีผักต่างชนิดและต่างอายุอยู่ในระบบตลอดเวลา ซึ่งคาดว่าจะทำให้อัตราการดูดใช้ธาตุอาหารของพืชมีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพ ในระยะเวลา 17 สัปดาห์ที่ทำการทดลองสามารถปลูกผักหมุนเวียนได้ทั้งหมด 4 - 5 ครั้ง ในแต่ละภาชนะปลูก (ตารางที่ 3-3) ผลการทดลองเป็นดังนี้

3.1 ลักษณะการเจริญเติบโต : ผักเจริญเติบโตได้ดีในระยะ 7 สัปดาห์แรก แม้อัตราการเจริญเติบโต

ช้ากว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดินระบบรากแช่ (hydroponics) ประมาณ 1 สัปดาห์ ผักไม่แสดงอาการขาดธาตุอาหารในระยะนี้ แต่อัตราการเจริญเติบโตของผักแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3-17) ในช่วงสัปดาห์ที่ 8-14 พบว่า ผักเจริญเติบโตช้าลง แสดงอาการเหี่ยวในช่วงเวลาแดดจัด ซึ่งเป็นอาการบ่งชี้ว่า ผักได้รับโพแทสเซียมไม่เพียงพอ ทำให้ไม่สามารถดูดและลำเลียงน้ำไปยังใบได้เพียงพอกับอัตราการคายน้ำ แม้รากผักจะแช่อยู่ในสารละลายก็ตาม ลำต้นผักบุ้งไม่แข็งแรงพอที่จะตั้งตรงได้ ซึ่งเป็นอาการบ่งชี้ว่า ผักบุ้งได้รับแคลเซียมไม่เพียงพอ (รูปที่ 3-18) หลังสัปดาห์ที่ 14 พบว่า ผักแสดงอาการขาดเหล็กอย่างชัดเจน อัตราการเจริญเติบโตช้า และแคระแกร็นมาก (รูปที่ 3-19) ผู้วิจัยได้ศึกษาการปลูกผักสองชนิดร่วมในภาชนะใบเดียวกัน ผลการทดลองพบว่า ผักชนิดที่อัตราการเจริญเติบโตช้า จะถูกบังแสงโดยชนิดที่อัตราการเจริญเติบโตเร็วกว่า ทำให้ชนิดที่อัตราการเจริญเติบโตช้ายิ่งช้ามากขึ้น และอายุเก็บเกี่ยวยิ่งนานขึ้น ในกรณีที่ปลูกในแนวตะวันออก-ตะวันตก แต่ไม่พบปัญหาดังกล่าวเมื่อปลูกในแนวเหนือ-ใต้ (รูปที่ 3-20)



รูปที่ 3-17 ลักษณะการเจริญเติบโตของผักในระยะ 7 สัปดาห์แรก

ซ้าย : ผักบุ้งในสัปดาห์ที่ 4 เจริญเติบโตเร็วกว่าผักกวางตุ้งและผักกาดขาวอย่างเห็นได้ชัด

ขวา : ผักกาดขาวและผักกวางตุ้งในสัปดาห์ที่ 6 มีขนาดโตพอที่จะเก็บเกี่ยวได้ โดยไม่แสดงอาการขาดธาตุอาหารให้เห็น แม้อัตราการเจริญเติบโตจะช้ากว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน

ตารางที่ 3-3 ชนิดผักที่ปลูกหมุนเวียนในแต่ละภาชนะปลูก ในช่วงเวลาต่างๆ ของการทดลอง

สัปดาห์	ภาชนะปลูก 1	ภาชนะปลูก 2	ภาชนะปลูก 3
1			
2	ผักบุ้ง	ผักกวางตุ้ง	ผักกวางตุ้ง & ผักกาดขาว
3			
4			
5	ผักกาดขาว	ผักบุ้ง & ผักกาดขาว	คะน้า
6			
7			
8	ผักบุ้ง	ผักกาดขาว	
9			
10			
11	ผักกาดขาว	ผักบุ้ง	ผักบุ้ง
12			
13			
14	คะน้า & ผักกวางตุ้ง	ผักบุ้ง & ผักกาดขาว	ผักบุ้ง & ผักกาดขาว
15			
16			
17			



รูปที่ 3-18 ลักษณะการเจริญเติบโตของผักกาดขาว

ซ้าย : ผักกาดขาวสัปดาห์ที่ 6 (ภาชนะปลูกที่ 1) ผักแสดงอาการเหี่ยวอย่างรุนแรงในช่วงแดดจัด
ขวา : ผักกาดขาวสัปดาห์ที่ 7 (ภาชนะปลูกที่ 1) ผักโตพอที่จะเก็บเกี่ยวได้ แม้อัตราการเจริญเติบโตจะช้ากว่าการปลูกโดยใช้ดิน และแสดงอาการขาดธาตุอาหาร



รูปที่ 3-19 ลักษณะการเจริญเติบโตของคะน้าและกวางตุ้งที่ปลูกในช่วงสัปดาห์ที่ 14-17 ผักแสดงอาการขาดเหล็กและธาตุอาหารอื่นๆ อย่างรุนแรง



รูปที่ 3-20 ลักษณะการเจริญเติบโตของผักที่ปลูกร่วมในภาชนะปลูกเดียวกัน

ข้าว : ผักกาดขาวปลูกร่วมกับผักบุ้งในแนวตะวันออก-ตะวันตก ผักบุ้งเจริญเติบโตได้เร็วกว่า จึงบังแสงทำให้ผักกาดขาวเจริญเติบโตได้ช้ากว่าปกติมาก โดยเฉพาะแถวที่อยู่ใกล้กัน

ขาว : ผักกาดขาวปลูกร่วมกับผักกวางตุ้งในแนวเหนือ-ใต้ แม้ผักกวางตุ้งเจริญเติบโตเร็วกว่า แต่ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดขาว

3.2 ผลผลิตของผักแต่ละชนิด : ผู้วิจัยวางแผนเก็บผลผลิตของผักที่ระยะเวลาปกติสำหรับการปลูกใช้ดินและไม่ใช้ดิน เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผัก และศึกษาความเหมาะสมของผักแต่ละชนิดสำหรับระบบปลูกเลี้ยง โดยเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตกับผักที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินระบบรากแช่ (hydroponics) ผลผลิตผักแต่ละชนิดเป็นดังนี้

3.2.1 ผักบุ้ง : ผู้วิจัยทดลองปลูกผักบุ้งทั้งหมด 7 ครั้ง โดยปลูกเดี่ยว 4 ครั้ง และปลูกร่วมกับผักชนิดอื่น 3 ครั้ง ส่วนใหญ่เก็บผลผลิตที่อายุ 28 วัน หลังเพาะเมล็ด (21 วัน หลังย้ายปลูก)

ได้ผลผลิตมากกว่า 3.5 kg/m^2 เมื่อปลูกในช่วง 10 สัปดาห์แรก แต่ลดลงเหลือประมาณ 2.6 kg/m^2 หลังสัปดาห์ที่ 15 ผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อขยายเวลาเก็บเกี่ยวนานขึ้นอีก 10 วัน ดังนั้น ผู้ปลูกเลี้ยงน่าจะเก็บเกี่ยวในช่วง 30 - 35 วัน เช่นเดียวกับการปลูกโดยใช้ดิน หากขยายเวลานานกว่านี้ อาจทำให้ลักษณะทางกายภาพของผักไม่เหมาะสมต่อการบริโภค (ตารางที่ 3-4) ผักนึ่งที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินเป็นเวลา 26 วัน ให้ผลผลิต 3.03 kg/m^2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลผลิตที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงใกล้เคียงกับการปลูกโดยไม่ใช้ดิน

3.2.2 ผักกาดขาว : ผู้วิจัยทดลองปลูกผักกาดขาวทั้งหมด 7 ครั้ง โดยปลูกเดี่ยว 4 ครั้ง และปลูกร่วมกับผักชนิดอื่น 3 ครั้ง แต่ขาดข้อมูลในช่วงสัปดาห์ที่ 2 - 4 ผักกาดขาวให้ผลผลิตต่ำกว่า ผักนึ่งมาก ผักกาดขาวให้ผลผลิตในช่วง 7 สัปดาห์แรก เพียง 1.95 kg/m^2 ในขณะที่ผักนึ่งให้ผลผลิตสูงถึง 3.5 kg/m^2 ผลผลิตของผักกาดขาวลดลงเมื่อปลูกหลังสัปดาห์ที่ 10 โดยเฉพาะเมื่อปลูกร่วมกับผักชนิดอื่น อายุเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของผักชนิดนี้สำหรับระบบปลูกเลี้ยงน่าจะอยู่ในช่วง 35 - 40 วัน (ตารางที่ 3-4) ผักกาดขาวที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินเป็นเวลา 28 วัน ให้ผลผลิต 5.44 kg/m^2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปลูกในระบบปลูกเลี้ยงได้ผลผลิตต่ำกว่ามาก แม้จะขยายเวลาเก็บเกี่ยวออกไปนานถึง 37 วัน ก็ยังคงได้ผลผลิตต่ำ ผักชนิดนี้จึงอาจไม่เหมาะที่จะปลูกในระบบปลูกเลี้ยง

3.2.3 ผักกวางตุ้ง : ผู้วิจัยทดลองปลูกผักกวางตุ้งเพียง 3 ครั้ง โดยปลูกเดี่ยว 1 ครั้ง และปลูกร่วมอีก 2 ครั้ง ระยะเก็บเกี่ยว 32 - 44 วัน ผักกวางตุ้งเจริญเติบโตช้ากว่าผักนึ่งและผักกาดขาว ผู้วิจัยจึงขยายเวลาเก็บเกี่ยวมากขึ้น ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตสูงขึ้นอย่างน่าพอใจ อายุเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของผักชนิดนี้สำหรับระบบปลูกเลี้ยงน่าจะอยู่ในช่วง 40 - 45 วัน (ตารางที่ 3-4) ผักกวางตุ้งที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินเป็นเวลา 28 วัน ให้ผลผลิต 7.95 kg/m^2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผักชนิดนี้ให้ผลผลิตต่ำในระบบปลูกเลี้ยง แต่สามารถเพิ่มผลผลิตได้โดยขยายระยะเวลาเก็บเกี่ยวให้นานขึ้น

3.2.4 ผักคะน้า : ผู้วิจัยทดลองปลูกผักคะน้าเพียง 2 ครั้ง โดยปลูกเดี่ยวและปลูกร่วมอย่างละครั้ง คะน้าเจริญเติบโตช้ามาก แม้จะขยายเวลาเก็บเกี่ยวนานถึง 47 วัน ในการปลูกครั้งแรก ก็ได้ผลผลิตเพียง 966 g/m^2 (ตารางที่ 3-4) ผักคะน้าที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินเป็นเวลา 35 วัน ให้ผลผลิต 4.92 kg/m^2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผักชนิดนี้เจริญเติบโตช้าโดยธรรมชาติ แม้ปลูกโดยไม่ใช้ดินนานถึง 35 วัน ก็ยังคงให้ผลผลิตต่ำกว่าผักกาดขาวและผักกวางตุ้ง จึงไม่เหมาะสำหรับระบบปลูกเลี้ยง

ตารางที่ 3-4 ชนิดผักที่ปลูกในแต่ละช่วงเวลา อายุเก็บเกี่ยว และผลผลิต

ชนิดผัก	ภาชนะปลูก (วิธีปลูก)	สัปดาห์ที่ปลูก	อายุเก็บเกี่ยว (วัน)	ผลผลิตสด (กรัม/ตารางเมตร)
ผักบุ้ง	1 (เดี่ยว)	2 - 4	27	3,518
	2 (ร่วม)	5 - 8	37	7,160
	1 (เดี่ยว)	8 - 10	28	3,971
	2 (เดี่ยว)	12 - 14	28	3,276
	3 (เดี่ยว)	12 - 14	28	2,845
	2 (ร่วม)	15 - 17	28	2,611
	3 (ร่วม)	15 - 17	28	2,568
ผักกาดขาว	1 (เดี่ยว)	5 - 7	28	1,986
	3 (เดี่ยว)	5 - 7	29	1,921
	2 (ร่วม)	5 - 8	37	1,697
	2 (เดี่ยว)	9 - 11	28	632
	1 (เดี่ยว)	11 - 13	28	828
	3 (ร่วม)	11 - 13	28	224
	2 (ร่วม)	15 - 17	28	308
ผักกวางตุ้ง	2 (เดี่ยว)	2 - 4	32	1,241
	3 (ร่วม)	2 - 6	44	5,500
	1 (ร่วม)	14 - 17	41	2,954
คะน้า	3 (เดี่ยว)	7 - 11	47	966
	1 (ร่วม)	14 - 17	41	625

3.2 ความเข้มข้นของธาตุอาหาร : ผู้วิจัยวางแผนสุ่มตัวอย่างผักแต่ละชนิดที่ปลูกไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (ภาคผนวกที่ 2) เพื่อนำไปคำนวณอัตราการกำจัดธาตุอาหารออกจากระบบ ระบบที่สมดุลควรมีอัตราการเติมธาตุอาหารเข้าสู่ระบบ (เติมในรูปอาหารปลา) และอัตราการกำจัดออกจากระบบ (กำจัดในรูปผลผลิตพืช) ใกล้เคียงกัน การเสียสมดุลทำให้ระบบไม่สามารถอยู่ได้อย่างยั่งยืน และเปรียบเทียบความเข้มข้นกับผักชนิดเดียวกันที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน ระบบรากแช่ ผลการทดลองเป็นดังนี้

3.2.1 ผักบุ้ง : ผักบุ้งที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงมีร้อยละของน้ำหนักแห้งต่ำกว่าผักที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสูงกว่า แต่แคลเซียม และแมกนีเซียมกลับต่ำกว่ามาก ระบบรากของผักบุ้งมีประสิทธิภาพในการดูดใช้ธาตุอาหารได้ดี แม้จะปลูกในสภาพธาตุอาหารความเข้มข้นต่ำ แต่สามารถดูดใช้ธาตุอาหารหลักได้มาก แคลเซียม และแมกนีเซียมน่าจะเป็นธาตุอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโตของผักบุ้งในระบบปลูกเลี้ยง (ตารางที่ 3-5)

- 3.2.2 **ผักกาดขาว** : ผักกาดขาวที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงทั้งสองตัวอย่าง มีร้อยละของน้ำหนักแห้งสูงกว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน ผักกาดขาวที่ปลูกในช่วงสัปดาห์ที่ 2 - 6 มีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงกว่าผักที่ปลูกในช่วงสัปดาห์ที่ 5 - 7 ในขณะที่ความเข้มข้นของธาตุอื่นๆใกล้เคียงกัน ไนโตรเจนจึงน่าจะเป็นธาตุอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโตของผักกาดขาวที่ปลูกในครั้งหลัง ผักกาดขาวที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินมีความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม สูงกว่าผักที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงโดยเฉพาะโพแทสเซียม (ตารางที่ 3-4) แสดงให้เห็นว่า ระบบรากของผักกาดขาวมีประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถดูดใช้ธาตุอาหารในสภาพความเข้มข้นต่ำได้ดี และน่าจะเป็นสาเหตุให้ผลผลิตของผักกาดขาวในระบบปลูกเลี้ยงต่ำกว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน (ตารางที่ 3-5)
- 3.2.3 **ผักกวางตุ้ง** : ผักกวางตุ้งที่ปลูกโดยระบบปลูกเลี้ยงมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน ซึ่งส่งผลให้ผักไม่อวบ น้ำไม่หนักง่าย หรือเหี่ยวเฉาเร็วระหว่างการขนส่ง โดยทั่วไปผู้บริโภคนิยมรับประทานมากกว่า ผักกวางตุ้งที่ปลูกโดยไม่ใช้ดินมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงกว่ามาก ผักที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงในช่วงสัปดาห์ที่ 2 - 4 มีไนโตรเจนสูงกว่าสัปดาห์ที่ 2 - 6 ในขณะที่ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผักในระบบปลูกเลี้ยงขาดไนโตรเจน และน่าจะเป็นสาเหตุให้ผลผลิตต่ำกว่าการปลูกโดยไม่ใช้ดิน (ตารางที่ 3-5)
- 3.2.4 **ผักคะน้า** : คะน้าที่ปลูกในระบบปลูกเลี้ยงมีค่าร้อยละของน้ำหนักแห้งสูงกว่าผักที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน แต่มีค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ำกว่าทุกธาตุ แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการดูดใช้ธาตุอาหารของผักชนิดนี้ต่ำเกินไป ไม่สามารถดูดใช้ธาตุอาหารได้อย่างเพียงพอในสภาวะความเข้มข้นต่ำ และน่าจะเป็นสาเหตุให้อัตราการเจริญเติบโตของคะน้าต่ำมากในระบบปลูกเลี้ยง (ตารางที่ 3-5)

ตารางที่ 3-5 ความเข้มข้นของธาตุอาหารในผักชนิดต่างๆ ที่ปลูกในระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา (Aquaponics) และปลูกโดยไม่ใช้ดินระบบรากแช่ (Hydroponics)

ชนิดผัก	เทคนิคการปลูก	สัปดาห์ที่ปลูก	น้ำหนักแห้ง (%)	ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (g/kg dry weight)				
				N	P	K	Ca	Mg
ผักบุ้ง	Aquaponics	2 - 4	6.26	16.7	5.7	91.0	11.2	2.1
ผักกาดขาว		2 - 6	5.75	16.2	6.4	61.9	29.9	3.7
ผักกาดขาว		5 - 7	5.17	12.6	6.3	62.4	29.4	4.3
ผักกวางตุ้ง		2 - 4	7.21	18.4	7.3	68.1	27.5	3.5
ผักกวางตุ้ง		2 - 6	7.02	15.3	6.9	54.4	25.4	3.6
คะน้า		6 - 11	11.90	14.4	4.6	38.4	26.6	5.9
ผักบุ้ง	Hydroponics		8.22	13.6	3.8	33.0	19.5	7.6
ผักกาดขาว			4.25	15.7	8.3	109.9	33.2	5.4
ผักกวางตุ้ง			5.98	24.4	6.7	90.9	22.5	4.3
คะน้า			5.99	20.2	5.1	83.7	30.0	6.8

4. การทดสอบปลูกเลี้ยงระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร

ผู้วิจัยได้สร้างระบบปลูกเลี้ยงเพื่อการปลูกพืชกินผลและพืชสมุนไพรขึ้น โดยปรับปรุงจากระบบแรกให้มีถังพักและเพิ่มแรงดันสารละลาย โดยวางถังดังกล่าวสูงจากพื้น 1 เมตร เพื่อแก้ปัญหาอัตราการไหลไปยังภาชนะปลูกให้เร็วขึ้น และพ่นอากาศลงไปในถังแปลงสภาพสารอาหารและควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง เพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เร็วขึ้น ระบบปลูกเลี้ยงมีภาชนะปลูกเพียงภาชนะเดียว เนื่องจากต้องการปลูกพืชที่มีอายุเก็บเกี่ยวยาวนาน จึงไม่จำเป็นต้องหมุนเวียนพืช รายละเอียดของการออกแบบและก่อสร้างได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 หลังจากทดสอบแก้ไขการทำงานของระบบแล้ว ผู้วิจัยได้เลี้ยงปลาดุกจำนวน 50 ตัว ย้ายปลามาเลี้ยงในบ่อและกะเพราลงแปลงปลูกโดยปลูกทั้งสองสลับกัน อายุกล้า 1 เดือน ปลาดุกทยอยตายอย่างรวดเร็ว ภายในสองสัปดาห์มีปลาดุกมีชีวิตรอดเพียง 4 ตัว ผู้เชี่ยวชาญด้านการประมงสันนิษฐานว่า ปลาน่าจะได้รับสารพิษอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากปลาดุกไม่มีเกล็ด ผิวหนังจึงไวต่อสารเคมี ผู้วิจัยจึงหยุดเลี้ยงและล้างระบบใหม่ แล้วทำการจำลองการเลี้ยงโดยใช้อาหารปลาลงในถังเลี้ยงในขณะที่ไม่ใช่ปลา และเติมเชื้อปุ๋ยหมักพด. 2 ลงไป เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบเพิ่มจำนวน และย่อยสลายสารอินทรีย์จากอาหารปลา การจำลองกระทำติดต่อกันนาน 1 เดือน จากนั้นนำปลาดุกจำนวน 54 ตัว มาปล่อยลงสู่ถังเลี้ยง ปลาเริ่มตายหลังจากเลี้ยงได้ 5 วัน ผู้เชี่ยวชาญด้านการประมงพบว่า ปลาเป็นโรคบางชนิด เนื่องจากพบอาการครีบกร่อน และมีเลือดออกข้างลำตัว (รูปที่ 3-23) ผู้วิจัยจึงได้หยุดการทดลอง



รูปที่ 3-21 การทดสอบปลูกเลี้ยงในระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา ซึ่งออกแบบสำหรับปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร



รูปที่ 3-22 พืชที่ปลูกในระบบเจริญเติบโตจนถึงระยะติดผล แต่แสดงอาการขาดธาตุอาหารหลายธาตุอย่างรุนแรง ผู้วิจัยหยุดทดลองก่อนถึงระยะเก็บเกี่ยว



รูปที่ 3-23 ปลานิลที่ทดลองเลี้ยงครั้งที่ 2 ทายอดตาย โดยปลาแสดงอาการของโรคบางชนิด เนื่องจากพบอาการครีบก้อน และมีเลือดออกข้างลำตัว

บทที่ 4 สรุป

การทดลองปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลาในระบบปลูกผักกินใบที่ประกอบด้วย ถังเลี้ยง ถังแปลงสภาพสารอาหาร ถังกำจัดแก๊ส และภาชนะปลูก โดยเลี้ยงปลานิล (Nile tilapia : *Oreochromis niloticus*) พันธุ์จิตรลดา 3 จำนวน 50 ตัว เป็นเวลา 17 สัปดาห์ ด้วยอาหารที่มีโปรตีน 30 % ไขมัน 3 % และกากไย 8 % และปลูกผักบุ้ง ผักกาดขาว ผักกวางตุ้ง และคะน้า แบบหมุนเวียนในภาชนะปลูก 3 ใบ พื้นที่ปลูกใบละ 1.8 ตารางเมตร ผลการทดลองพบว่า ปลาสามารถเจริญเติบโตได้และมีชีวิตรอดตลอดการทดลองทั้งหมด ส่วนผักเจริญเติบโตอย่างน่าพอใจในระยะ 8 สัปดาห์แรก แม้การเจริญเติบโตช้ากว่าการปลูกแบบไฮโดรโพนิคส์ แต่การปลูกหลังจากนั้นผักเจริญเติบโตช้าลงมาก และแสดงอาการขาดธาตุอาหารซับซ้อนอย่างรุนแรง โดยเฉพาะไนโตรเจน โพแทสเซียม และเหล็ก ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุทั้งสามในสารละลายก็ให้ผลสอดคล้องกับการแสดงอาการของพืช

ความเข้มข้นของคาร์บอน โพแทสเซียม และโซเดียม ในสิ่งขับถ่ายจากปลาที่เป็นของแข็งลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นในอาหาร ในขณะที่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม เหล็ก แมกนีเซียม สังกะสี และทองแดง สูงขึ้น สัดส่วนของธาตุอาหารพืชในอาหารปลา และสิ่งขับถ่ายไม่สอดคล้องกับความต้องการของพืช โดยเฉพาะ K/Na อาหารปลามีความเข้มข้นของโซเดียมสูงกว่าโพแทสเซียมมาก ในขณะที่พืชไม่ต้องการโซเดียม

ความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย (pH) เข้าสู่สมดุลที่ 7.0 ในเวลา 4 สัปดาห์ หลังเริ่มทดลอง หลังจากนั้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.9 - 7.2 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบปลูกเลี้ยง โดยผู้วิจัยไม่จำเป็นต้องเติมกรดหรือด่างไปแต่อย่างใด การทดลองแสดงให้เห็นว่า ชากปะการังเหมาะสมที่จะนำมาใช้ควบคุม pH และใช้เป็นวัสดุยึดเกาะของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี

อัตราการหมุนเวียนสารละลายส่งผลต่อความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 และอัตราการกินอาหารของปลา อัตราการหมุนเวียนต่ำส่งผลให้ความเข้มข้นของ NH_4/NH_3 สูงขึ้น และปลากินอาหารได้ช้าลง เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 2 mg/L ทำให้ปลากินอาหารลดลงอย่างมาก และปลากินอาหารได้ดีเมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mg/L อัตราการไหลที่เหมาะสมและทำให้ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mg/L คือ 2 เท่าของปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลาในแต่ละชั่วโมง

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ในสารละลาย พบว่า ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน โซเดียม และคลอรีน สะสมในระบบเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทดลอง หรือเข้าสู่สมดุลเมื่อการทดลองผ่านไประยะหนึ่ง ในขณะที่ไนโตรเจนและโพแทสเซียม เปลี่ยนแปลงตามอัตราการกินอาหารของปลาและการดูดใช้ของพืช ส่วนเหล็กและสังกะสีลดลงจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ความเข้มข้นของเหล็กและสังกะสีที่เกิดขึ้นจากอาหารปลา ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ผู้วิจัยเติมธาตุอาหารทั้งสองลงไปในระบบปลูกเลี้ยง ทำให้ความเข้มข้นเพียงพอในระยะแรกเท่านั้น การทดลองพบว่า พืชต้องการเหล็กและสังกะสีเดือนละ 206.2 และ 20.6 mg/m² ตามลำดับ

การทดลองปลูกเลี้ยงในระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร ไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากปลาตาย หลังทดลองเลี้ยง 2 ครั้ง ครั้งแรกทดลองเลี้ยงปลาดุกจำนวน 50 ตัว ครั้งที่สองทดลองเลี้ยงปลานิลจำนวน 50 ตัว การตายของปลาครั้งแรกคาดว่าเกิดจากสารเคมีที่ใช้สร้างอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ส่วนครั้งที่สองเกิดจาก ปลาติดโรคอย่างรุนแรง ผู้วิจัยจึงได้ยุติการทดลอง

การปลูกพืชรวมกับการเลี้ยงปลามีความซับซ้อนในเชิงเทคนิคหลายอย่าง ทั้งการปลูกพืชและการเลี้ยงปลา แม้ระบบนี้สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงได้มาก แต่สามารถปลูกพืชได้ดีเฉพาะระยะแรกของการเริ่มต้น การเลี้ยงปลามีความเสี่ยงจากปัจจัยต่างๆ เช่น คุณภาพน้ำ โรคระบาด และกระแสไฟฟ้าขัดข้องระหว่างการเลี้ยง เป็นต้น ระบบจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพัฒนาเทคนิคต่อไป

ภาคผนวก 1 :

สูตรสารละลายธาตุอาหารเพื่อการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน WU_NS07

ถึงสารละลายเข้มข้น	สารเคมี	ความเข้มข้น (กรัม/60 ลิตร)
A	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	5,835
	Fe-DTPA (11.3 % Fe)	133.44
B	KNO_3	2,427
	KH_2PO_4	1,225
	KCl	224
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,958
	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	10.14
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.12
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.11
	H_3BO_3	12.98
	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.26
	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	57.26

หมายเหตุ เจือจางสารละลายเข้มข้น A และ B สัดส่วน 1:1 จนได้ค่าการนำไฟฟ้า 2.0 mS/cm ก่อนใช้ปลูกพืช

ภาคผนวก 2 :

วิธีวิเคราะห์อาหารปลา สิ่งขับถ่ายจากปลา และพืช

1. วิธีเก็บและเตรียมตัวอย่าง

อาหารปลา : สุ่มตัวอย่างอาหารปลาจากกระสอบประมาณ 25 กรัม นำมาบดให้ละเอียดในครกเซรามิก แล้วอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บในกระปุกพลาสติกที่ปิดสนิท เพื่อรอการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

สิ่งขับถ่ายจากปลา : ใช้ช้อนเก็บตัวอย่างของแข็งที่ปลาขับถ่ายออกมาใหม่ๆ ใส่ในถ้วยสแตนเลสขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C ทำการเก็บซ้ำอีกประมาณ 10 ครั้ง (เก็บเพียงครั้งเดียวในแต่ละวัน) จนได้ตัวอย่างมากพอสำหรับวิเคราะห์ บดให้ละเอียดในครกเซรามิก แล้วเก็บในกระปุกพลาสติกที่ปิดสนิท

พืช : สุ่มเก็บตัวอย่างพืชจากแปลงปลูกมายังห้องปฏิบัติการ เช็ดแผ่นใบด้วยผ้าสะอาดที่ชุบน้ำหมาดๆ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C จนแห้ง (ใช้เวลาประมาณ 7 วัน) นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่อง 1 มิลลิเมตร แล้วเก็บในกระปุกพลาสติกที่ปิดสนิท

2. วิธีวิเคราะห์

2.1 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจน (Kjeldahl method) : ชั่งตัวอย่างพืชหนัก 0.3 - 0.4 กรัม ในกระดาดชั่งสาร (ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละตัวอย่าง) แล้วห่อใส่ในหลอดย่อยขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น 10 มิลลิลิตร โดยมี $K_2SO_4/CuSO_4 \cdot 5H_2O/Se$ (สัดส่วน 100/10/1 โดยน้ำหนัก) 2 กรัม เป็นสารเร่ง ย่อยที่อุณหภูมิ 380 °C จนได้สารละลายใส (ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง) นำไปกลั่นโดยเติมน้ำลงไป 100 มิลลิลิตร 40% NaOH 40 มิลลิลิตร และจับแก๊ส NH_3 ที่เกิดขึ้นด้วย 3% H_3BO_3 แล้วไทเทรตด้วย 0.05 M HCl

หมายเหตุ : วิเคราะห์ไนโตรเจนและคาร์บอนในตัวอย่างอาหารปลาและสิ่งขับถ่ายจากปลาด้วยวิธี Dumas method (CN autoanalyser) โดยจ้างห้องปฏิบัติการที่ให้บริการของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เป็นผู้วิเคราะห์

2.2 วิธีย่อยสลายตัวอย่าง : นำขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร ไปแช่ในกรด HCl เจือจาง เป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C จนแห้ง ชั่งตัวอย่างหนัก 1.0 - 1.2 กรัม ใส่ในขวดที่เตรียมไว้ (ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละตัวอย่าง) นำไปย่อยด้วยกรดผสม $HNO_3/HClO_4$ (สัดส่วน 2/1 โดยปริมาตร) 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิจุดเดือดของกรดผสม จนเกิดควันสีขาว และสารละลายใส ยกออกจากเตาย่อย ปล่อยให้เย็น แล้วถ่าย

สารละลายใส่ในขวดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ เจือจางสารละลายตัวอย่างส่วนหนึ่ง โดยปิเปตสารละลายเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำจนถึงขีดปริมาตร

- 2.3 **วิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในตัวอย่าง (vanadomolybdate method) :** ผสมสารละลายสร้างสี (colour reagent) โดยละลาย ammonium metavanadate 1.25 กรัม ในน้ำร้อน 250 มิลลิลิตร ละลาย ammonium molybdate 25.00 กรัม ในน้ำร้อน 400 มิลลิลิตร หลังจากอุณหภูมิของสารละลายทั้งสองลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องแล้ว ผสมสารละลายทั้งสอง และ HNO_3 เข้มข้น 250 มิลลิลิตร เข้าด้วยกัน และเติมน้ำจนได้ปริมาตรสุทธิ 1000 มิลลิลิตร เติมสารละลายสร้างสี 2.5 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายตัวอย่างที่เจือจางแล้วจากข้อ 2.2 ลงไป 10.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ แล้วทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงกับสารละลาย KH_2PO_4 ความเข้มข้น 50 mg-P/L
- 2.4 **วิธีวิเคราะห์โพแทสเซียม :** นำสารละลายตัวอย่างที่เจือจางแล้วจากข้อ 2.2 ไปวัดค่าการปลดปล่อยแสงด้วยเครื่อง flame photometer เปรียบเทียบค่ากับสารกับชุดสารละลายมาตรฐาน
- 2.5 **วิธีวิเคราะห์แคลเซียมและแมกนีเซียม :** เติมสารละลายตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 10 มิลลิลิตร (จากข้อ 2.2) ลงในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เติมสารละลาย SrCl_2 ความเข้มข้น 10,000 mg-Sr/L เพิ่มลงไป 2.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer เปรียบเทียบกับชุดสารละลายมาตรฐาน
- 2.6 **วิธีวิเคราะห์เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี :** นำสารละลายตัวอย่างเข้มข้นจากข้อ 2.2 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer เปรียบเทียบกับชุดสารละลายมาตรฐาน

3. เอกสารอ้างอิง

กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ

สมศักดิ์ มณีพงศ์. 2537. การวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

Soil and Plant Analysis Council. 1998. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis.

CRC Press. London.

Tandon, H.L.S. (Ed.). 1995. Methods of Analysis of soils, Plants, Waters, and Fertilisers.

Fertilisers Development and Consultation Organisation, New Delhi, India.

ภาคผนวก 3 :

วิธีเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์สารละลายในระบบ

1. วิธีเก็บและเตรียมตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างน้ำด้วยขวดเก็บตัวอย่างขนาด 1 ลิตร ที่ความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำ โดยเก็บจากถังกำจัดแก๊สสัปดาห์ครั้ง แบ่งตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้า ส่วนตัวอย่างที่เหลือกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

2. วิธีวิเคราะห์

- 2.1 การวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) : วัดค่า pH ของสารละลายภายใน 2 ชั่วโมง หลังเก็บตัวอย่าง ด้วย pH meter โดยใช้สารละลาย neutral phosphate และ potassium phthalate เป็นสารละลายเปรียบเทียบ
- 2.2 การวัดค่าการนำไฟฟ้า : วัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายภายใน 2 ชั่วโมง หลังเก็บตัวอย่าง ด้วย electrical conductivity meter โดยใช้สารละลาย 0.01 M KCl เป็นสารละลายเปรียบเทียบ
- 2.3 วิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในตัวอย่าง (molybdenum blue method) : ผสมสารละลายสร้างสี (colour reagent) ระหว่างสารละลาย ammonium molybdate 30 มิลลิลิตร (เตรียมโดยละลาย ammonium molybdate 15 กรัม และ H_2SO_4 140 มิลลิลิตร ในน้ำแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร) สารละลาย 0.1 % antimony potassium tetratrate 30 มิลลิลิตร และน้ำ 400 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาผสมกับสารละลาย 0.5% ascorbic acid 500 มิลลิลิตร เติมสารละลายสร้างสี 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วเติมตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วลงไป 1 - 10 มิลลิลิตร ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ปรับปริมาตรด้วยน้ำ แล้วทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตร เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงกับสารละลาย KH_2PO_4 ความเข้มข้น 5 mg-P/L
- 2.4 วิธีวิเคราะห์โพแทสเซียมและโซเดียม : นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว ไปวัดค่าการปลดปล่อยแสงด้วยเครื่อง flame photometer เปรียบเทียบค่ากับสารกับชุดสารละลายมาตรฐาน
- 2.5 วิธีวิเคราะห์แคลเซียมและแมกนีเซียม : เติมสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เติมสารละลาย SrCl_2 ความเข้มข้น 10,000 mg-Sr/L เพิ่มลงไป 2.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer เปรียบเทียบกับชุดสารละลายมาตรฐาน

- 2.6 **วิธีวิเคราะห์เหล็ก และสังกะสี** : นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer เปรียบเทียบกับชุดสารละลายมาตรฐาน
- 2.4 **การวิเคราะห์ไนเตรต ซัลเฟต และคลอไรด์** : แบ่งสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว 50 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ion chromatography โดยจ้างห้องปฏิบัติการที่ให้บริการของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เป็นผู้วิเคราะห์
- 2.5 **วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียทั้งหมด (NH₃/NH₄)** : ตวงสารละลายที่ยังไม่ผ่านการกรอง 200 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดกลั่น ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 40% NaOH ลงไป 10 มิลลิลิตร กลั่นด้วยไอน้ำ โดยใช้ Distillation unit ของชุดเครื่องมือวิเคราะห์ไนโตรเจนวิธี Kjeldahl และจับแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นด้วยสารละลาย 3% H₃BO₃ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ไทเทรตสารที่กลั่นได้ด้วย 0.01 M HCl โดยมี methyl red และ bromocresol green เป็นสารบ่งชี้จุดยุติ สอดเทียบความเข้มข้นของสารละลาย HCl ด้วยสารละลายมาตรฐาน tris-(hydroxymethyl) amino methane

3. เอกสารอ้างอิง

- Buurman, P., Van Lagen, B. and Velthorst, E.J. 1996. Manual for Soil and Water Analysis. Backhuys Publishers Leiden, The Netherlands.
- Rayment, G.E. and Higginson, F.R. 1992. Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Inkata Press. Melbourne, Australia.
- Rump, H.H. and Krist, H. 1992. Laboratory manual for the Examination of Water, Waste Water, and Soil. 2nd ed. VCH Publishers. New York, USA.
- Tandon, H.L.S. (Ed.). 1995. Methods of Analysis of soils, Plants, Waters, and Fertilisers. Fertilisers Development and Consultation Organisation, New Delhi, India.
- The Japan Society for Analytical Chemistry. 1986. Water Analysis, 3rd ed. Kagakudojin. Tokyo, Japan.

ภาคผนวก 4 :

ส่วนประกอบและต้นทุนของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา :
ระบบปลูกผักกินใบ (System 01)

รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
โรงเรือน พื้นที่ 4 x 6 ตารางเมตร	1	12,500	12,500
ถังเลี้ยงปลาไฟเบอร์กลาสขนาด 500 ลิตร	1	6,500	6,500
ถังแปลงสภาพสารอาหารขนาด 170 ลิตร	1	250	250
ถังควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง ขนาด 60 ลิตร	1	120	120
ถังกำจัดแก๊สขนาด 200 ลิตร	1	350	350
ถังผสมปุ๋ย (ถังปลูก)	3	980	2,940
ถังรวมสารละลายขนาด 220 ลิตร	1	350	350
อิฐประสาน	156	12	1,872
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	1	180	180
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว	5	55	275
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว	3	45	135
วาล์ว PVC ขนาด 2 นิ้ว	1	215	215
วาล์ว PVC ขนาด 3/4 นิ้ว	1	50	50
วาล์ว PVC ขนาด 1/2 นิ้ว	3	40	120
ข้อต่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว	12	15	180
ข้อต่อ PVC ขนาด 3/4 นิ้ว	11	10	110
ข้อต่อ PVC ขนาด 1/2 นิ้ว	13	8	104
หัวทรายกระจายลม	16	8	128
ปั้มน้ำตู้ปลา (aquarium pump) กำลังส่ง 2500 ลิตร/ชม.	1	1,500	1,500
ปั้มน้ำเวียนน้ำ กำลัง 350 วัตต์ ส่งน้ำ 6000 ลิตร/ชม.	1	1,200	1,200
ปั้มน้ำอากาศ กำลัง 58 วัตต์ ความเร็วลม 70 ลิตร/นาที	1	850	850
สวิทช์ลูกลอย	1	285	285
เครื่องตั้งเวลา (24 hr timer)	1	190	190
อุปกรณ์ไฟฟ้ารายย่อย	1	850	850
ไบโอบอล	3	250	750
แผ่นยางปลูกผัก หนา 10 มิลลิเมตร	3	120	360
รวม			32,364

ภาคผนวก 5 :

ส่วนประกอบและต้นทุนของระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา :
ระบบปลูกผักกินผลและพืชสมุนไพร (System 02)

รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
โรงเรือน พื้นที่ 4 x 6 ตารางเมตร	1	12,500	12,500
ถังเลี้ยงปลาไฟเบอร์กลาสขนาด 500 ลิตร	1	6,500	6,500
ถังแปลงสภาพสารอาหารขนาด 200 ลิตร	1	350	350
ถังควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง ขนาด 60 ลิตร	1	120	120
ถังพักและเพิ่มแรงดันขนาด 200 ลิตร	1	350	350
ขาตั้งถังพัก	1	850	850
ถังรวมสารละลายขนาด 150 ลิตร	1	250	250
อิฐประสาน	24	12	288
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	1	180	180
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว	2	55	110
ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว	3	45	135
วาล์ว PVC ขนาด 2 นิ้ว	1	215	215
วาล์ว PVC ขนาด 3/4 นิ้ว	1	50	50
วาล์ว PVC ขนาด 1/2 นิ้ว	3	39	117
ข้อต่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว	10	15	150
ข้อต่อ PVC ขนาด 3/4 นิ้ว	12	10	120
ข้อต่อ PVC ขนาด 1/2 นิ้ว	15	8	120
หัวทรายกระจายลม	4	8	32
ปั้มน้ำตู้ปลา (aquarium pump) กำลังส่ง 2500 ลิตร/ชม.	2	1,500	3,000
ไม้อัด 4 x 8 ตารางฟุต	1	450	450
ปั้มอัดอากาศ กำลัง 58 วัตต์ ความเร็วลม 70 ลิตร/นาที	1	850	850
สวิตช์ลูกลอย	3	285	855
ขาตั้งโต๊ะปลูก	1	1,250	1,250
อุปกรณ์ไฟฟ้ารายย่อย	1	850	850
ไบโอบอล	1	250	250
แผ่นยางปลูกผัก หน้า 10 มิลลิเมตร	1	360	360
รวม			30,302

ภาคผนวก 6 :

ประมาณการผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของระบบปลูกผักกินใบ :

ต้นทุนดำเนินการ

รายการทุน	จำนวนหน่วย	ราคา/หน่วย (บาท)	ต้นทุน (บาท)
ลูกปลา	50 ตัว	4	200
อาหารปลา	17.25 กิโลกรัม	16	276
เมล็ดพันธุ์ผัก	1 ซอง	20	20
เมล็ดพันธุ์ผัก	1 ซอง	20	20
เมล็ดพันธุ์ผัก	1 ถุง	20	20
กระแสไฟฟ้า	244 หน่วย	4	976
น้ำ	1 ลูกบาศก์เมตร	3.5	3.5
แรงงาน	119 ชั่วโมง	37.5	4,462.5
ต้นทุนรวม			5,978.0

รายรับในรอบ 17 สัปดาห์

รายการ	จำนวนหน่วย	ราคา/หน่วย (บาท)	รายรับ (บาท)
ปลา	17.5	120	2,100
ผักบุ้ง	11.5	60	690
ผักกวางตุ้ง	6.2	60	372
ผักกาดขาว	6.2	60	372
รวมรายรับ			3,534.0