วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี | Agriculture and Technology Journal

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2565 | Vol.3 No.2 May – August 2022

Received: August 8, 2022; Revised: August 19, 2022; Accepted: August 20, 2022

ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม คะน้าใบหยิก และคุณภาพน้ำในระบบอะควาโปนิกส์ที่ใช้น้ำหมุนเวียน

Effect of water flow rates on growth of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*), Curl leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and water quality parameters in aquaponic recirculating system

พีระ มีทรัพย์[1] พวงเพชร พิมพ์จันทร์[1] กฤติมา กษมาวุฒิ[1] และสำเนาว์ เสาวกูล[1*]

Peera Meesap [1], Paongpetch Phimchan[1], Krittima Kasamawut[1] and Samnao Saowakoon[1*]

[1]*คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์*

[*]*Corresponding Author E-mail Address: samnao.sa@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษาอัตราการไหลของน้ำในระบบอะควาโปนิกส์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลาปลาดุกลูกผสม และคะน้าใบหยิก (*Brassica oleracea* var. *acephala*) คุณภาพน้ำ และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำ อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2,000 (T_1), 2,400 (T_2) และ 2,700 (T_3) ลิตรต่อชั่วโมง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ แต่ละทรีตเมนต์มี 3 ซ้ำ ระบบการเลี้ยงปลาใช้ถังขนาด 1,000 ลิตร ปลาดุกลูกผสมมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 100 กรัม อัตราการปล่อย 100 ตัวต่อเมตร^2 ผักคะน้าใบหยิก ซึ่งเพาะเลี้ยงต้นกล้าแล้วจึงย้ายลงรางปลูกในระบบอะควาโปนิกส์ มีขนาดราง 1×5×0.20 เมตร^3 จำนวน 50 ต้นต่อชุด ประเมินอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิตของปลา พืช และคุณภาพของน้ำ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 90 วัน พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของปลา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุดที่ T_3 (276.54±2.14 กรัม) โดยค่าเฉลี่ยในกลุ่ม T_2 และ T_1 เท่ากับ 247.11±1.91 กรัม และ 200.50±1.05 กรัม อัตรารอดสูงสุดในกลุ่ม T_3 (99.67±0.58 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือ T_2 (86.00±2.00 เปอร์เซ็นต์) และ ต่ำสุดใน T_1 (80.33±1.52 เปอร์เซ็นต์) ผลผลิตปลาสุทธิ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าสูงสุดคือ T_3 (27.56±0.37) รองลงมาคือ T_2 (21.25±0.38) และต่ำสุดใน T_1 (17.71±0.31) ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลผลิตในรูปน้ำหนักสดสูงสุดที่พบ คือ T_1 (185.81±3.90 กิโลกรัม) ตามด้วย T_2 (185.81±3.90 กิโลกรัม) และ T_3 (130.50±4.16 กิโลกรัม) โดยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงในลักษณะที่สอดคล้องกัน ระบบอะควาโปนิกส์สามารถลดปริมาณมลพิษของน้ำจากการเลี้ยงปลาได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ BOD_5, TSS, TAN, NO_2-N, NO_3-N และ TP อยู่ในช่วงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 44.88 – 53.51, 65.04 - 67.15, 2.25 – 85.60, 65.51 - 77.19, 65.82 - 74.77 และ 53.68 – 54.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษที่ดีที่สุดที่อัตราการไหลสูงที่สุดคือ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : ระบบอะควาโปนิกส์ ผักคะน้าใบหยิก ปลาดุกลูกผสมลูกผสม อัตราการไหล การกำจัดสารอาหาร

Abstract

This study aims to investigate effects of water flow rate in an aquaponics system on growths of hybrid catfish and Curl leaf kale (*Brassica oleracea Acephala)*, water quality and efficiency in nutrient removal. There were three different flow rates including 2000 (T_1), 2,400 (T_2) and 2,700 (T_3) liters per hour, according to the completely randomized experimental design of which individual treatments having 3 replicates. The fish culture system consisted of a 1,000 liter tank containing hybrid catfish with an average weight of 100 g, as well as a stocking of 100 fish/m^2. The kale was seedlings cultivated, and thereafter was transferred to the 1×5×0.20 m^3 aquaponics system, having 50 kale plants per experimental set. Growth rate, productivity of the fish and the kale, as well as changes in water quality were assessed at the end of the 90 day trial period. Experimental results showed that the growth rates of the hybrid catfish statistically were significant differences ($p<0.05$) among all experimental groups. The rates were increased in respects to increases of the water flow rates. The highest mean value of the fish weight was found in T_3 (276.54±2.14 g), meanwhile the values of T_2 and T_3 were 247.11±1.91 g, and 200.50±1.05 g, respectively. The highest fish survival rate was observed in T_3 (99.67± 0.58%), followed by T_2 (86.00±2.00%), and T_1 (80.33±1.52%). The highest net yield (kg/m^3) was T_3 (27.56±0.37), followed by T_2 (21.25±0.38). and the lowest value was in T_1 (17.71±0.31), respectively. The yields of kale were statistically different. The highest fresh weight yield was found in the flow rate of T_1 (185.81±3.90 kg), followed by T_2 (185.81±3.90 kg) and T_3 (130.50±4.16 kg), respectively. The dry weight yields also were decreased accordingly. This aquaponics system can significantly reduce wastewater pollutions from hybrid catfish cultures. The removal efficiencies of BOD_5, TSS, TAN, NO_2-N, NO_3-N and TP were in the following ranges: 44.88 – 53.51%, 65.04 - 67.15%,72.25 – 85.60%, 65.51 - 77.19%., 65.82 - 74.77% and 53.68 – 54.72%, respectively. The best pollution treatment efficiency was occurred at the highest flow rate i.e., 2,700 liters/hour.

Keywords: Aquaponic system, Hybrid catfish, Curl leaf kale, Waterflow rate, Nutrient removal

บทนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่น (Intensive culture) ทำให้น้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและอาหารที่เหลือในปริมาณมาก (Raul, 2003; ดำรงค์, 2555) ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ (Organic matter) และแร่ธาตุ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุอื่น ๆ (Ghaly et al., 2005) จะเกิดการสะสมของแร่ธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจน กลุ่มแอมโมเนีย (ในรูปไอออนแอมโมเนีย และอัลไอออไนแอมโมเนีย) ไนเตรท และฟอสฟอรัส (Rafiee and Saad, 2005; Van Rijn et al., 2006) เมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ จึงมีการปล่อยของเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์จำนวนมากลงสู่แหล่งน้ำส่งผลต่อคุณภาพน้ำทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำอย่างฉับพลัน ปัจจุบันมีการพัฒนานำระบบหมุนเวียนของน้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมากขึ้น ซึ่งระบบนี้จะช่วยลดปริมาณการปล่อยน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ประหยัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (Water reuse or Recycle system) ในระบบการหมุนเวียนน้ำ (ดำรงค์,

2555) การเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Aquaponic) เป็นการทำงานร่วมกันของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Aquaculture) และการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponic) โดยที่ 2 ระบบมีความสัมพันธ์กันโดยการเลี้ยงปลาจะมีการสะสมของแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้นแนวคิดการนำน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ในการปลูกพืช นอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารที่สะสมอยู่แล้วยังเป็นการบำบัดน้ำ เพื่อให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นด้วย (Rakocy et al., 2004) ซึ่งเรียกว่า อะควาโปนิกส์ (Aquaponics) เป็นการผสมผสานของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนกับการผลิตพืชแบบไม่ใช้ดิน (Rakocy et al., 2006) ระบบหมุนเวียนได้รับการออกแบบในลักษณะที่จะเลี้ยงปลาในปริมาณมากในปริมาณน้ำที่ค่อนข้างน้อย แล้วนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่หลังจากบำบัดน้ำเพื่อกำจัดของเสียที่เป็นพิษ ซึ่งระบบไฮโดรโปนิกส์จะหมุนเวียนน้ำร่วมการผลิตสัตว์น้ำและการผลิตพืชได้รับการปรับปรุงและพัฒนา จนเป็นที่ยอมรับว่าเป็นระบบที่สามารถใช้ประโยชน์ และควบคุมของเสียที่เกิดจากสารอาหารจากการเลี้ยงปลา ใช้น้ำในปริมาณที่น้อยและได้ผลผลิตพืชเป็นรายได้เพิ่มเติม ดังนั้นพืชผักจึงเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในการปลูกร่วมในระบบอะควาโปนิกส์ เนื่องจากสามารถดูดซับสารอาหารปลาที่ละลายในน้ำซึ่งเป็นสาเหตุของน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช (Dushenkov et al., 1995) แม้ว่าการเลี้ยงปลาและการปลูกพืชไร้ดินจะมีมาตั้งแต่สมัยโบราณ แต่การผสมผสานของทั้งสองสิ่งนี้เข้าด้วยกันนั้นค่อนข้างใหม่ และยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จเท่าไรนักในระยะแรก (Diver, 2006) ผักคะน้าใบหยิกหรือผักเคล (Kale; *Brassica oleracea* var. *acephala*) เป็นผักใบตระกูลกะหล่ำ (Brassicaceae) ปัจจุบันผักคะน้าใบหยิกได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และได้รับความสนใจจากนักวิชาการ เนื่องจากอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive) เช่น วิตามินซี โพรวิตามินเอ กลูโคซิโนเลท สารประกอบฟีนอล ใยอาหาร มีธาตุอาหารรอง (ธาตุเหล็ก สังกะสี และแมงกานิส) และ ธาตุอาหารหลัก (แคลเซียม และแมกนีเซียม) (Khachik et al., 1991; Ayaz et al., 2006; Cartea et al., 2008; Olsen et al., 2009) จากงานวิจัยพบว่าผักคะน้าใบหยิกช่วยยับยั้งการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (Kahlon et al., 2007; Kim et al., 2008; Kural et al., 2011) และมะเร็ง (Chung et al., 2002) จึงได้รับความนิยมและรู้จักมากขึ้นและถือได้ว่าเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและหลากหลาย เมื่อเทียบกับผักประเภทอื่น ๆ ในปริมาณที่เท่ากัน ในประเทศไทยได้เริ่มมีการปลูกผักคะน้าใบหยิกเพื่อบริโภคมากขึ้น ทั้งแบบรับประทานสดและแปรรูป จึงทำให้มีมูลค่าสูงและเป็นที่ต้องการของตลาด ในการศึกษาการปลูกผักคะน้าใบหยิกร่วมกับระบบอะควาโปนิกส์นั้น ได้มีการศึกษาการเลี้ยงปลาชนิดแตกต่างกันในปลานิลและปลาดุกร่วมกับปลูกผักคะน้าใบหยิกรวมกับผักชนิดอื่นด้วย (Afolabi, 2020; Arthanawa et al., 2021) การศึกษาการประยุกต์ใช้ออกแบบระบบอะควาโปนิกส์ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่และทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้โดยศึกษาปริมาณของไนเตรทร่วมกับผักกินใบ เพื่อศึกษาข้อกังวลเกี่ยวกับการสะสมไนเตรท โดยการศึกษาผักสลัดคอส ผักชาร์ดสวิส และผักคะน้าใบหยิก (Wortman, 2015; Pérez-Urrestaraz et al., 2019) ปลาดุกลูกผสมหรือโดยทั่วไปเรียกว่าปลาดุกบิ๊กอุย (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) เป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันดับสองของประเทศไทยรองจากปลานิลทั้งเชิงผลผลิตและมูลค่า (กรมประมง, 2562) อีกทั้งเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Yi et al., 2003) ปลาดุกลูกผสมนิยมบริโภคเนื่องจากเนื้อรสชาติดี เจริญเติบโตเร็วและต้านทานโรคได้ดี มีการศึกษาการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบอะควาโปนิกส์หลายรูปแบบ (อุธร และคณะ, 2556ก; 2557ข; ธีระรัตน์ และคณะ, 2560) การเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชในระบบอะควาโปนิกส์ที่จะประสบความสำเร็จนั้น ต้องการมีจัดการที่ดีและมีกระบวนการที่พิเศษ การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาในประเทศไทยนั้นมักจะมุ่งเน้นเกี่ยวกับความหนาแน่นที่เหมาะสมของการเลี้ยงปลา (ปฐมพงษ์ และคณะ, 2557) อัตราส่วนพื้นที่ปลูกและปริมาตรน้ำที่เหมาะสม (วีระยุทธ และคณะ, 2557) หรือชนิดของวัสดุกรองสำหรับระบบกรองชีวภาพ (สุฤทธิ์ และคณะ, 2551) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบอะควาโปนิกส์โดยใช้น้ำหมุนเวียน ภายใต้อัตราการไหลต่าง ๆ ที่ผ่านมานั้นพบว่ามีการศึกษาน้อย ถึงแม้ว่าการเติบโตของปลาจะเพิ่มขึ้นตามระดับของโปรตีนในอาหารที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม แต่การตายของปลาก็เกิดขึ้นจากการสะสมของเสียในระบบน้ำที่เป็นพิษมากเกินไป การจัดการอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการปลดปล่อยมลพิษ หรือสมดุลกับการดูดไปใช้ของพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น ดังนั้นวัตถุประสงค์หลัก

ของศึกษานี้เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาและพืช คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียในระบบอะควาโปนิกส์

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การออกแบบระบบอะควาโปนิกส์แบบหมุนเวียนประกอบด้วยถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1x1 เมตร^3 มีความจุของน้ำปริมาตร 1,000 ลิตร จำนวน 9 ถัง (Fig.1) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) ประกอบด้วย 3 ทรีตเมนต์ ทรีตเมนต์ละ 3 ซ้ำ ที่อัตราการไหล 2,000 (T_1), 2,400 (T_2) และ 2,700 (T_3) ลิตรต่อชั่วโมง ดำเนินการคัดเลือกปลาดุกลูกผสมลูกผสมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 100 กรัม อัตราการปล่อย 100 ตัวต่อตารางเมตร โดยให้อาหารเม็ดลอยน้ำที่มีโปรตีน 32 เปอร์เซ็นต์ ให้ในอัตราส่วน 3 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักตัวต่อวัน แบ่งให้วันละ 3 ครั้ง ทำจากการสุ่มน้ำหนักปลาชั่งน้ำหนักเก็บข้อมูลแต่ละตัวจำนวน 50 ตัว ทุกระยะเวลา 2 สัปดาห์ ประเมินอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิต และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR: Feed conversion ratio) ของปลาการทดลองระยะเวลา 90 วัน ศึกษาร่วมกับการปลูกผักคะน้าใบหยิก (*Brassica oleracea* var. *acephala*) โดยเพาะคะน้าใบหยิกลงในถ้วยปลูกขนาด 3.5 เซนติเมตร เป็นเวลา 15 วัน ด้วยระบบ DRFT (Dynamic Root Floating Technique) ด้วยน้ำเปล่า เป็นระยะเวลา 21 วัน แล้วจึงย้ายลงแปลง ภายในระบบอะควาโปนิกส์ 10 เซนติเมตร โดยใช้เพอร์ไลท์เป็นวัสดุปลูก โดยรางปลูกอะควาโปนิกส์ขนาดราง 1x5x0.40 เมตร ระยะปลูก 50x20 เซนติเมตร จำนวน 9 ราง ปลูกรวม 50 ต้นต่อกรรมวิธี สำหรับปริมาตรน้ำในรางปลูกนั้นมีความจุ 2000 ลิตร (2 ลูกบาศก์เมตร) ซึ่งจากอัตราการไหลของน้ำแต่ละกรรมวิธีนั้นจะทำให้ปริมาตรของน้ำไหลหมุนเวียนในระบบ 24 ชั่วโมง คือ 47.5, 57.6 และ 64 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ใช้ระยะเวลา 90 วัน บันทึกผลผลิตทั้งหมดที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง

ดำเนินการทดลอง ณ มีทรัพย์ฟาร์ม ตำบลตั้งใจ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ ห้องปฏิบัติการสาขาประมง และสาขาพืชศาสตร์ สิ่งทอและการออกแบบ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำและปริมาณสารอาหาร

เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลต่อคุณภาพน้ำ และประสิทธิภาพของการบำบัดสารอาหารในน้ำด้วยระบบอะควาโปนิกส์ โดยวิเคราะห์ค่า BOD_5 (Biochemical oxygen demand) แอมโมเนียไนโตรเจน (Total ammonia nitrogen; TAN) สารแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) ไนไตรท์ (Nitrite; NO_2-N) ไนเตรท (Nitrate; NO_3-N) และฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorous; TP) ในน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมลูกผสมไหลผ่านระบบไบโอฟิลเตอร์ (Biofilter) ณ จุดที่เข้าสู่ (Influent) แปลงปลูกผัก 1 จุด และที่น้ำออก (Effluent) จากแปลงปลูกพืช 1 จุด วิเคราะห์คุณภาพน้ำระหว่างช่วงการทดลอง สุ่มตัวอย่างระหว่างเวลา 8.30 น. ถึง 9.30 น. ของวันที่สุ่มตัวอย่างแต่ละครั้ง นำตัวอย่างน้ำไปแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส ในขวดโพลีทีนที่ติดฉลากสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี อุณหภูมิของน้ำวัดโดยเทอร์โมมิเตอร์ และวัดค่า pH โดยใช้เครื่องวัด pH meter; YSI pH100 ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ความกระด้าง (Hardness) ความเป็นด่าง (Alkalinity) แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ทำการวิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐานของ APHA (2005) ส่วนค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) วัดด้วย Conductivity meter; YSI EC300 ซึ่งทำการตรวจวิเคราะห์ทุก 2 สัปดาห์

การวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละช่วงนำมาค่าเฉลี่ยและประเมินอัตราการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตราการรอดตาย คุณภาพน้ำ ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม และผักคะน้าใบหยิก ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

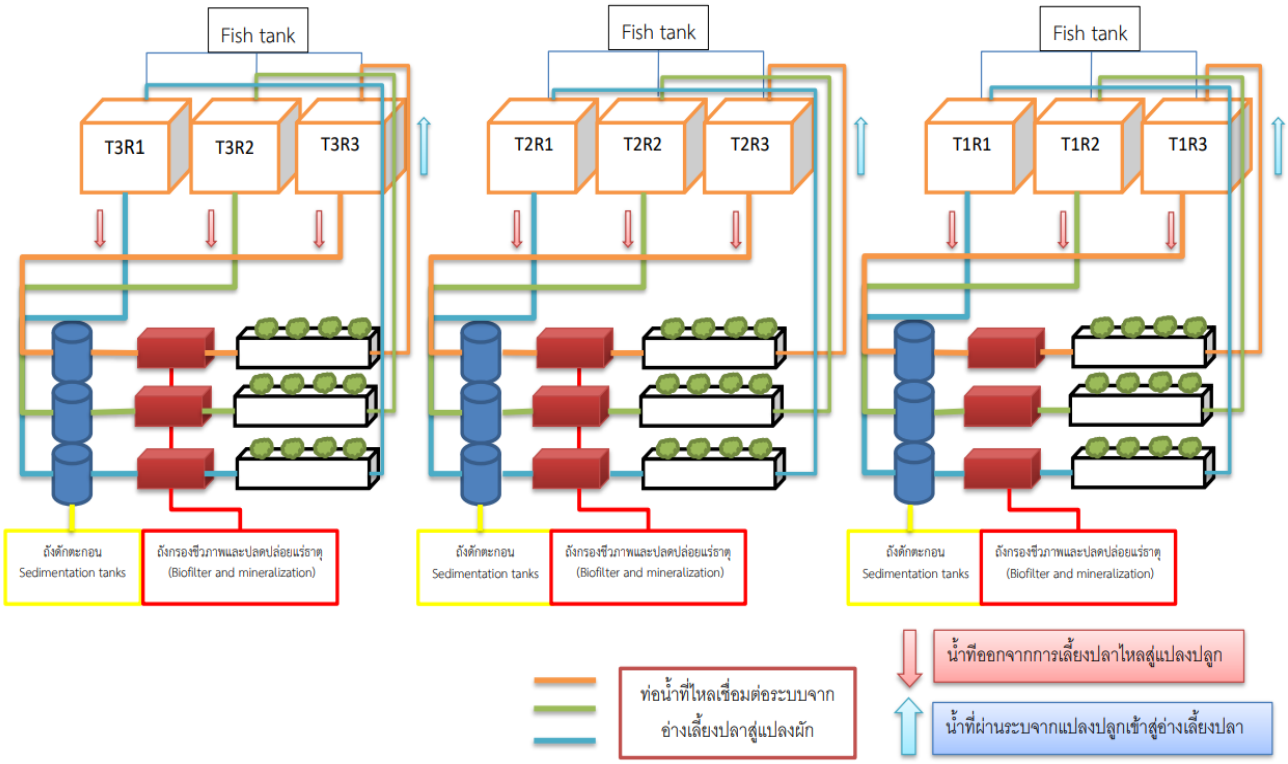


Fig.1 Layout of aquaponic recirculating system. Consists of fish tanks, growing beds, sedimentation tanks, biofilter and mineralization units.

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

การเจริญเติบโตของปลา

การศึกษานี้จัดทำการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของน้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่ อัตราการไหล 2,000 (T_1), 2,400 (T_2) และ 2,700 (T_3) ลิตรต่อชั่วโมง ต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมบิ๊กอุยและผักคะน้าใบหยิกภายใต้ระบบอะควาโปนิกส์ การเจริญเติบโตของปลา ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิก การบำบัดสารอาหารในน้ำ และพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสม เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าน้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกลูกผสมลูกผสมในแต่ละรูปแบบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น ใน T_3 (276.54±2.14 กรัม) ตามด้วย T_2 (247.11±1.91 กรัม) และ T_1 (200.50±1.05 กรัม) ตามลำดับ (Table 1)

อัตราการไหลที่ต่างกันมีผลต่อการรอดชีวิตของปลาในแต่ละกลุ่มปลาทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อัตรารอดสูงสุดพบได้ใน T_3 (99.67±0.58 เปอร์เซ็นต์) ตามด้วย T_2 (86.00±2.00 เปอร์เซ็นต์) และ T_1 (80.33±1.52 เปอร์เซ็นต์) อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน) มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในทุกกลุ่มการทดลอง และเป็นไปตาม

แนวโน้มเดียวกันกับการเพิ่มของผลผลิตสุทธิ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่แสดงค่าสูงสุดใน T_3 (27.56±0.37) รองลงมาคือ T_2 (21.25±0.38) และต่ำสุดใน T_1 (17.71±0.31) (Table 1)

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของปลาในกลุ่มที่เลี้ยงในอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน ก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ค่า FCR จะลดลงตามอัตราการไหลที่สูงขึ้นคือ 1.47±0.04, 1.33±0.02 และ 1.24±0.04 ในกลุ่มปลาทดลอง T_1, T_2 และ T_3 ตามลำดับ ค่า FCR นี้ประเมินจากการเลี้ยงด้วยอาหารที่มีระดับโปรตีน 32 เปอร์เซ็นต์

Table 1. Hybrid catfish and Curl leafed kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) productions under the different water flow rates in an aquaponic system.

Measures	water flows ratios (L/hr.)		
	2,000(T_1)	2,400(T_2)	2,700(T_3)
Catfish			
Initial weight (g fish^{-1})	100.33±0.67^a	99.67±1.55^a	100.70±0.30^a
Final weight gain (g fish^{-1})	200.50±1.05^c	247.11±1.91^b	276.54±2.14^a
Growth rate (g day^{-1})	1.34±0.02^c	1.64±0.02^b	1.95±0.02^a
Net production (kg m^{-3})	17.71±0.31^c	21.25±0.38^b	27.56±0.37^a
Survival rate (%)	80.33±1.52^c	86.00±2.00^b	99.67±0.58^a
FCR	1.47±0.04^c	1.33±0.02^b	1.24±0.04^a
Plant			
Shoot Height (cm)	20.12±3.75^a	19.92±2.43^a	13.21±2.14^b
Root length (cm)	35.24±5.11^a	32.35±4.51^a	21.54±5.20^b
No. of leaf/shoot	16.13±2.51^a	15.42±1.95^a	14.13±2.15^a
Canopy width (cm)	21.84±3.53^a	20.24±3.76^a	14.34±1.15^b
Fresh Yield (kg)	240.57±3.72^a	185.81±3.90^b	130.50±4.16^c
Dry Yield (kg)	21.78±0.18^a	16.88±0.33^b	11266±0.72^c

* Values with different superscripts in the same row are significantly different ($p<0.05$)

ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิก

ผลผลิตของพืชเป็นอีกประเด็นที่สำคัญในระบบอะควาโปนิกส์ ในการศึกษานี้ ผักคะน้าใบหยิกปลูกบนรางปลูกในระบบและได้รับน้ำจากการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในอัตราการไหลที่แตกต่างกันสามแบบ ในการศึกษานี้ ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ระหว่างกลุ่มทดลอง (Table 1) ความสูงเฉลี่ยของผักคะน้าใบหยิกที่มีการตอบสนองดีต่ออัตราการไหลที่ช้าคือ T_1 และ T_2 ดีกว่า T_3 อย่างมีนัยสำคัญ คือ 20.121±3.75, 19.92±2.43 และ 13.21±2.14 เซนติเมตร ส่วนความยาวเฉลี่ยของราก มีค่าเท่ากับ 35.24±5.11, 32.35±4.51 และ 21.54±52 เซนติเมตร ตามลำดับ รวมถึงองค์ประกอบผลผลิตในด้านอื่น ๆ ก็มีแนวโน้มในการตอบสนองต่ออัตราการไหลที่ช้าดีกว่า อัตราการไหลเร็วเช่นเดียวกัน ได้แก่จำนวนใบต่อต้น ของชุดการทดลอง T_1, T_2 และ T_3 มีค่าเฉลี่ย 16.13±2.51, 15.42±1.95 และ 14.13±2.15 ใบต่อต้น ส่วนความกว้างทรงพุ่มของผักคะน้าหลังการเก็บเกี่ยวก็พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอัตรา

การไหลช้า 2 อัตราแรก (T_1 และ T_2) จะมีค่าสูงกว่าอัตราการไหลเร็ว (T_3) คือ 21.84±3.53, 20.24±3.76 และ 14.34±1.15 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าผลผลิตผักจะมีทิศทางสวนทางกับผลผลิตปลาคือได้ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อคิดเป็นน้ำหนักสดพบในระบบการทดลองที่มีอัตราการไหลของน้ำต่ำที่สุดคือ T_1 เท่ากับ 185.81±3.90 กิโลกรัม ตามด้วย T_2 เท่ากับ 185.81±3.90 กิโลกรัม และ T_3 เท่ากับ 130.50±4.16 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อประเมินเป็นน้ำหนักแห้งก็ได้ค่าที่ลดลงในทางที่สอดคล้องกัน (Table 1)

Table 2. The water qualities in hybrid catfish tanks at different water flow rates.

Parameters	Water flow rates (L/hr.)		
	2,000(T_1)	2,400(T_2)	2,700(T_3)
pH	7.28 – 7.42	7.28 – 7.34	7.34 – 7.56
Dissolved oxygen (mg/L)	4.12 – 4.42	4.24 – 4.61	4.42 – 5.26
Temperature(°C)	27.3 – 28.7	27.2 – 28.9	27.3 – 28.5
Total alkalinity (mg-$CaCO_3$/L)	40.20 – 50.32	41.70 – 52.14	40.35 – 50.39
Total hardness (mg-$CaCO_3$/L)	30.42 – 33.11	31.26 – 33.49	30.54 – 33.21
Electrical conductivity (ms/cm)	0.8 – 1.0	0.8 – 1.1	0.7 – 1.0

คุณภาพน้ำและการเปลี่ยนแปลงของสารอาหาร

อุณหภูมิของน้ำระหว่างช่วงการศึกษาจะอยู่ในช่วง 27.2 – 28.9 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีความแตกต่างระหว่าง กลุ่มการทดลอง (Table 2) ค่า pH จะแปรผันภายในช่วง 7.28 – 7.56 ในการศึกษานี้มีการเพิ่มปริมาณในระบบน้ำต่อวันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดแทนการสูญเสียน้ำเนื่องจากการระเหยและการคายน้ำของผักคะน้าใบหยิก ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Lewis et al. (1978) และ Hussain et al. (2014) ที่รายงานว่าการสูญเสียของน้ำเฉลี่ยต่อวันในระบบอะควาโปนิกส์อยู่ที่ประมาณ 6.6 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ McMurtry et al. (1997) ที่แนะนำให้ใช้อัตราการเปลี่ยนน้ำอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 4.7 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เฉลี่ยสูงสุดพบในระบบทดลองที่มีอัตราการไหลสูงสุด (T_3, 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง) มีค่า 5.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วย T_2 และ T_1 (4.61 และ 4.42 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ การควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีความสำคัญต่อสุขภาพของปลาและจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพ (Somerville et al., 2014) แนะนำว่าควรรักษาระดับออกซิเจนละลายน้ำให้ไม่ต่ำกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของปลาในเขตร้อน ในขณะที่การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Nitrifying bacteria ที่ทำการเปลี่ยนแอมโมเนียที่เป็นอันตรายไปเป็นไนเตรทที่ก็ต้องการปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เหมาะสมเช่นกัน ซึ่งระดับเหมาะสมดังกล่าวต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Masser et al., 1999) ในการทดลองนี้ พบว่าระดับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ในทุกกลุ่มการทดลอง มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดยะยะเวลาการทดลอง

อัลคาไลนิตี้ (Alkalinity) มีค่าอยู่ระหว่าง 40.20 – 50.39 มิลลิกรัมต่อลิตร และความกระด้าง (Hardness) มีค่า 30.42 - 33.49 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า อัตราการไหลของน้ำไม่มีผลทำให้ค่าเหล่านี้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ความกระด้างจากคาร์บอเนต หรืออัลคาไลนิตี้ ของน้ำในระบบอะควาโปนิกส์ จัดว่าเป็นสิ่งจำเป็น เพราะว่าความกระด้างที่เหมาะสมจะทำช่วยรักษาค่า pH ให้คงที่ หากค่าอัลคาไลนิตี้ไม่เพียงพอจะทำให้มีการผันผวนของค่า pH อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลเสียต่อระบบ ต่อปลา และการใช้ประโยชน์จากสารอาหารของพืช (Bregnballe, 2015) อย่างไรก็ตาม Somerville et al. (2014) ได้แนะนำว่า

ระดับความกระด้างที่เหมาะสมของน้ำในระบบอะควาโปนิกส์คือประมาณ 60 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าค่าอัลคาไลนิตี้และความกระด้างในการทดลองนี้มีค่าต่ำไปเล็กน้อย สมควรที่จะได้รับการปรับให้อยู่ในระดับที่สูงขึ้นได้ ซึ่งน่าจะส่งผลต่อผลผลิตปลาและผักคะน้าใบหยิกให้สูงขึ้นได้

ค่า EC (Electrical Conductivity) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.7 - 1.1 ms/cm. ค่า EC นอกจากจะแสดงถึงปริมาณสารอาหารสำหรับพืชแล้ว ยังเป็นปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกทางออสโมซีส ในการดูดซึมน้ำของพืชด้วย (Somerville et al., 2014) ค่า EC ในระบบทดลองนี้ ค่อนข้างจะคงที่ซึ่งแสดงถึง ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำอยู่ในระดับที่ปกติตลอดช่วงเวลาทดลอง

การบำบัดค่าคุณภาพน้ำในอัตราการไหลต่าง ๆ

อัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 อัตรา T_1 (2,000 ลิตรต่อชั่วโมง) T_2 (2,400 ลิตรต่อชั่วโมง) และ T_3 (2,700 ลิตรต่อชั่วโมง) สามารถบำบัดไนเตรทไนโตรเจน (NO_3-N) ได้เป็นอย่างดีในช่วง 65.82 – 74.77 เปอร์เซ็นต์ (Fig.2) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารอาหารประเภทไนเตรทที่เกิดขึ้นในระบบจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และจากปุ๋ยที่ปนเปื้อนได้ถูกบำบัด และนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ ไนเตรทไนโตรเจนสะสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอันเป็นผลมาจากกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (Nitrification) และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาของการผลิตปลาและพืชก็สามารถกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ในอัตราดังกล่าว ในการศึกษานี้ การกำจัดไนเตรทโดยรวมของน้ำในระบบอะควาโปนิกส์ลดปริมาณลงตามสัดส่วนตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการไหลที่ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง มีอัตราการขจัดสูงสุดประมาณ 74.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับ Endut et al. (2009) ที่พบว่าอัตราการขจัดไนเตรท มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการไหลของน้ำ

ค่า BOD_5 ซึ่งหมายถึงปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ ความเข้มข้นของ BOD_5 ในระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยอินทรียวัตถุที่ละลายและสะสมออกจากเมล็ดพืชที่กำลังพัฒนาและอาหารปลาที่เหลือ (Viadero et al., 2005) รวมทั้งจากของเสียที่ขับออกจากตัวปลา เป็นแหล่งสำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการผลิต พบว่าค่า BOD_5 ลดลงที่ 44.88–53.51 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำตามที่แสดงไว้ใน Table 3 และ Fig. 2

อัตราการบำบัดค่าคุณภาพน้ำและพารามิเตอร์ทางกายภาพ เคมี ของน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ ได้แสดงใน Table 3 และ Fig. 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การบำบัด BOD_5, TSS, TAN และ nitrite-N มีการบำบัดได้ดีขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบ (Influent) และน้ำที่ไหลออก (Effluent) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การบำบัด TP สูงขึ้นเล็กน้อยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (Fig. 2)

ในการศึกษานี้กำจัด TAN (Total Ammonia Nitrogen) ในน้ำหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ 72.25 - 85.60 เปอร์เซ็นต์ การขจัด TAN นี้มีแนวโน้มว่าเป็นผลมาจากอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้น แม้ว่าจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าTAN คือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรูปของ NH_3 และ NH_4^+ ในน้ำ ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ความเข้มข้นของ TAN ต้องน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Somerville et al., 2014) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่เก็บจากตำแหน่งที่น้ำไหลออก (Effluent) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.11 - 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าอยู่ในระดับที่ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาทดลอง

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในแต่ละทรีตเมนต์ จะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาการงอกของเมล็ดพืช เนื่องจากการปลดปล่อยสารอาหารออกจากเมล็ดที่กำลังพัฒนา (Nelson, 2004) จะเห็นได้ว่าจากการทดลองค่าความเข้มข้นของ TP ลดลงจากเดิม ณ จุดที่น้ำเข้ามีค่าระหว่าง 12.03 - 13.20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 5.23 - 6.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดที่น้ำออก (Table 3) ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากจากอัตราการไหล ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่มีความแตกต่างกันระหว่างอัตราการไหล เศษอาหารและมูลจากปลาเป็นแหล่งสำคัญของฟอสฟอรัสในน้ำ ในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นทั้งฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ทั้งในรูปแบบอินทรีย์และอนินทรีย์ (Tucker and Boyd, 1985)

Table3. Mean values and percentage removal of water quality variables at various flow rates.

Parameters	Flowrates (L/hr.)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal (%)
BOD_5	2,000(T_1)	4.73±0.21^a	2.60±0.20^a	44.88±6.67^a
	2,400(T_2)	5.17±0.25^a	2.40±0.10^a	53.51±1.86^a
	2,700(T_3)	4.73±0.51^a	2.30±0.20^a	51.23±4.16^a
TSS	2,000(T_1)	54.33±1.36^a	17.87±2.08^a	67.15±3.31^a
	2,400(T_2)	57.57±3.97^a	20.07±0.15^a	65.04±2.11^a
	2,700(T_3)	53.20±0.90^a	17.63±1.50^a	66.82±3.38^a
TAN	2,000(T_1)	0.71±0.15^a	0.17±0.02^a	74.35±8.72^a
	2,400(T_2)	0.57±0.25^a	0.13±0.02^a	72.25±16.59^a
	2,700(T_3)	0.80±0.19^a	0.11±0.05^a	85.60±6.85^a
NO_2N	2,000(T_1)	0.27±0.07^a	0.09±0.20^a	65.51±7.34^a
	2,400(T_2)	0.26±0.01^a	0.08±0.01^a	70.84±2.59^a
	2,700(T_3)	0.21±0.02^a	0.05±0.15^b	77.19±9.31^a
NO_3N	2,000(T_1)	16.63±0.91^a	5.63±0.31^a	66.00±3.64^a
	2,400(T_2)	15.36±1.10^a	5.20±0.98^a	65.82±8.57^a
	2,700(T_3)	14.80±0.70^a	3.73±0.21^b	74.77±0.89^a
TP	2,000(T_1)	13.20±0.90^a	6.10±0.20^a	53.68±2.83^a
	2,400(T_2)	12.03±1.37^a	5.43±0.12^b	54.53±4.28^a
	2,700(T_3)	12.39±1.15^a	5.23±0.12^b	54.72±3.15^a

* Values with different superscripts of each parameter in the same column are significantly different ($p<0.05$)

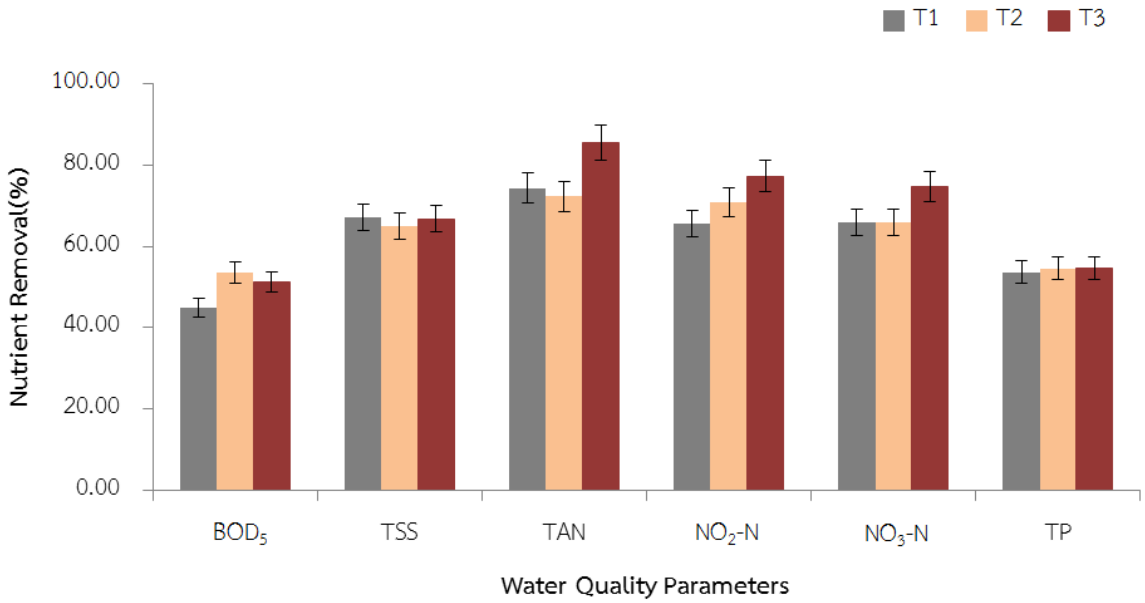


Fig. 2 Percentage removals of water quality parameters at various flow rates in aquaponic system.

บทสรุป

จากการศึกษาสรุปได้ว่าอัตราการไหลทั้งหมดมีผลในแง่ของการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม ทั้งในด้านอัตราการรอดชีวิต อัตราการเจริญเติบโต และผลผลิตสุทธิ มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงสุดในอัตราการไหลที่สูงที่สุดและรองลงมาตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำระบบอะควาโปนิกส์ที่มีการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม ส่งผลให้ผักคะน้าใบหยิกมีการเจริญเติบโตได้ดีและตอบสนองเชิงบวกต่อการปลูกโดยใช้น้ำเสียจากระบบการเลี้ยงปลา ในแง่ของการเจริญเติบโตและการผลิตชีวมวลในแนวทางที่ตรงกันข้ามกับผลผลิตปลา โดยพบว่า ความสูงของต้นเฉลี่ยที่เก็บเกี่ยวอยู่ในช่วง 20 - 24 เซนติเมตร และช่วงให้ผลผลิตสด 240 – 245 กิโลกรัมต่อรางปลูก ซึ่งพบว่าการเจริญเติบโตของพืชสูงที่สุดที่อัตราการไหลของน้ำที่ต่ำที่สุด คือ 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง

ผักคะน้าใบหยิกที่ปลูกในระบบอะควาโปนิกส์ สามารถลดปริมาณมลพิษของน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ปลาดุกลูกผสม ลูกผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ BOD_5, TSS, TAN, NO_2-N, NO_3-N และ TP อยู่ในช่วง 44.88 – 53.51, 65.04 - 67.15, 72.25 – 85.60, 65.51 - 77.19, 65.82 - 74.77 และ 53.68 – 54.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของพืชดีที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราการไหลสูงที่สุดคือ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าระบบอะควาโปนิกส์ มีส่วนสำคัญในการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ประโยชน์จากของเสียทางชีวภาพที่เกิดจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อการผลิตพืชผักระบบอินทรีย์ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณที่ได้รับการสนับสนุนจากทุนการวิจัยและอุปกรณ์การวิจัย จากหลักสูตรเทคโนโลยีเกษตรและสาขาประมง คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ และมีทรัพย์ฟาร์ม ตำบลตั้งใจ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ สนับสนุนสถานที่ในการทดลอง จนการศึกษาสำเร็จเรียบร้อยอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

ดำรงค์ โลหะลักษณาเดช, กฤษฎา พราหมณ์ชูเอม, วิกิจ ผินรับ และ ณิศา มาชู. (2555). การเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกผักโดยไม่ใช้ดินแบบ DYNAMIC ROOT FLOATING TECHNIQUE. น.447-454 ใน เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50: สาขาสัตว์, สาขาสัตวแพทยศาสตร์, สาขาประมง. กรุงเทพฯ.

ธีระรัตน์ ชิณแสน, นภาพร เวชกามา, จักรกฤษณ์ วรรณวิชิต, เมวิกา อันทะลัย, อภิชาติ ออมอด และ เกศศิรินทร์ แสงมณี. (2560). ผลของการใช้น้ำเหลือทิ้งจากการเลี้ยงปลาดุกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบสารละลายธาตุอาหารไม่หมุนเวียน. วารสารเกษตรพระวรุณ. 14(1): 71-81.

อุธร ฤทธิ์ลึก, สรรลาก สงวนดีกุล และศรัณยา รักเสรี. (2556ก). การวิจัยพัฒนาระบบอะควาโปนิคสำหรับบำบัดน้ำเสียในระบบเลี้ยงปลาดุกลูกผสมแบบใช้น้ำหมุนเวียน. วารสารวิจัย. 6(1): 103-112.

อุธร ฤทธิ์ลึก, สรรลาก สงวนดีกุล และศรัณยา รักเสรี. (2557b). ผลของความหนาแน่นต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลาดุกในบ่อคอนกรีตที่ใช้น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลานิลระบบอะควาโปนิสก์. วารสารวิจัย. 7(2): 77-86.

ปฐมพงษ์ กาศสกุล, ประจวบ ฉายบุ, ชนกันต์ จิตมนัส และเกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน. (2557). ความหนาแน่นที่เหมาะสมของการเลี้ยงปลานิลในระบบน้ำหมุนเวียนแบบอะควาโปนิกส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 8(1): 23-32.

วีระยุทธ เลื่อนลอย, พ้วน เพ่งเช้ง, ปิยะพงศ์ โชติพันธุ์ และสมศักดิ์ มณีพงศ์. (2557). ผลของอัตราส่วนพื้นที่ปลูกและปริมาตรน้ำต่อผลผลิตผักบุ้งจีน ปลานิลและคุณภาพน้ำในระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 8(2): 10-19.

สุฤทธิ์ สมบูรณ์ชัย, ประจวบ ฉายบุ, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และอานัฐ ตันโช. (2551). การศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพ เพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 2(1): 55-65.

APHA. (2005). Standards methods for the examination of water and wastewater. 21st Edition. APHA, Washington DC, USA.

Afolabi K.A. (2020). Productivity of Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) Culture in Aquaponic Systems. M.Sc. Thesis. The American University in Cairo, AUC Knowledge Fountain.

Arthanawa I.G.N., Astiko I.N. Yana D.P.S. and Darmawan I.K. (2021). Utilization of biofloc system catfish pond Waste nutrients in the cultivation of Kale, Spinach, Pakcoy, and Lettuce Using the Aquaponic. System. Sustainable Environment Agricultural Science (SSEA). 5(1): 66-71.

Ayaz F.A., Glew R.H., Millson M., Huang H.S., Chuang L.T., Sanz C. and Hayırlıoglu-Ayaz S. (2006). Nutrient contents of kale (*Brassica oleraceae* L. var. *acephala* DC.). Food chemistry. 96(4): 572-579.

Bregnballe J. (2015). A Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organization.

Cartea M.E., Velasco P., Obregón S., Padilla G. and De Haro A. (2008). Seasonal Variation in Glucosinolate Content in Brassica oleracea Crops Grown in Northwestern Spain. Phytochemistry. 69(2): 403-410.

Chung M.J., Lee S.H. and Sung N.J. 2002. Inhibitory effect of whole strawberries, garlic juice or kale juice on endogenous formation of N-nitrosodimethylamine in humans. Cancer Letters. 182(1): 1-10.

Diver S. (2006). Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture. Publication no. IP163. ATTRA, National Sustainable Agriculture Information Service.

Dushenkov V., Kumar PBAN., Motto H. and Raskin L. (1995). Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. Environ Sci Technol. 19: 1239–1245.

Enduta A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.N.S. and Hassan A. (2009). Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. Desalination and Water Treatment. 5: 19–28.

Ghaly A.E., Kamal M. and Mahmoud N.S. (2005). Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. Environment International. 31(1): 1-13.

Hussain T., Verma A. K., Tiwari V. K., Prakash C., Rathore G., Shete A. P. and Saharan N. (2014). Effect of water flow rates on growth of Cyprinus carpio var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system.

Khachik F., Beecher G.R. and Goli M.B. (1991). Separation, identification, and quantification of carotenoids in fruits, vegetables and human plasma by high performance liquid chromatography. Pure and Appl. Chem. 63(1): 71-80.

Kahlon T.S., Chapman M.H. and Smith G.E. (2007) In vitro binding of bile acids by spinach, kale, brussels sprouts, broccoli, mustard greens, green bell pepper, cabbage and collards. Food Chemistry. 100(4): 1531-1536.

Kim S.Y., Yoon S., Kwon S.M., Park K.S. and Lee-Kim Y.C. (2008). Kale juice improves coronary artery disease risk factors in hypercholesterolemic men. Biomedical and Environmental Sciences. 21(2): 91-97.

Kural B.V., Kucuk N., Balaban Y. and Orem A. (2011). Effects of kale (*Brassica oleracea*) leave extracts on the susceptibility of very low and low density lipoproteins to oxidation. Indian Journal. of Biochemistry. and Biophysics. 2: 361-364.

Lewis W.M., Yopp J.H., Schramm H.L. and Brandenburg A.M. (1978). Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. Transactions of the American Fisheries Society. 197: 92–99.

McMurtry M.R., Sanders D.C., Cure J.D., Hodson R.G., Haning B.C. and St Amand P.C. (1997). Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. Journal of the World Aquaculture Society. 28:4. 20–428.

Olsen H., Aaby K, and Borge G.I.A. (2009). Characterization and Quantification of Flavonoids and Hydroxycinnamic Acids in Curly Kale (Brassica oleracea L. Convar. *acephala* Var. *sabellica*) by HPLC-DAD-ESI-MS^n. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 57(7): 2816–2825.

Nelson E.B. (2004). Microbial dynamic and interactions in the sphermo-sphere. Annual Review of Phytopathology 42: 271–309.

Nuwansi K.K.T., Verma A.K., Prakash C., Tiwari V.K., Chandrakant M.H., Shete A.P. and Prabhath G.P.W.A. (2015). Effect of water flow rate on polyculture of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) and goldfish (*Carassius auratus*) with water spinach (*Ipomoea aquatica*) in recirculating aquaponic system. Aquaculture International. 24: 385–393.

Pérez-Urrestarazu L., Lobillo-Eguíba J., Fernández-Cañero R., and Fernández-Cabanás V.M. (2019). Food safety concerns in urban aquaponic production: Nitrate contents in leafy vegetables. Urban Forestry and Urban Greening. 44: 126431.

Rakocy J.E., Bailey D.S., Shultz R.C. and Thoman E.S. (2004). Update on Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. P. 676-690. In: New dimensions on farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International symposium on Tilapia in Aquaculture, Manila, Philippines. [Online]. Available: http://ag.arizoana.edu/azaqua/ista/ista6/html.

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: USDA.

Rafiee G. and Saad C.R. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. Aquaculture. 244(1-4): 109-118.

Raul H.P. (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture. 226: 35-44

Somerville C., Cohen M., Pantanella E., Stankus A. and Lovatelli A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Rome, Italy.

Tucker C.S. and Boyd C.E. (1985). Water quality, channel catfish culture. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Netherlands.

Viadero R.C., Cunningham J.H., Semmens K.J. and Tierney A.E. (2005). Effluent and production impacts of flow through aquaculture operations in West Virginia. Aquacultural Engineering. 33: 258–270.

Van Rijn J., Yossi T. and Schreier H.J. (2006). Denitrification in recirculation systems: Theory and applications Aquacultural Engineering. 34: 364-376.

Wortman S.E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. Scientia Horticulturae. 194: 34-42.

Yi Y., Lin C.K. and Diana J.S. (2003). Hybrid catfish (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture in an integrated pen-cum-pond system: growth performance and nutrient budgets. Aquaculture. 217: 395-408.