DOI:

การพัฒนาระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำสำหรับเกษตรในเมือง: การออกแบบ การนำไปใช้ และการประเมินประสิทธิภาพ

Development of a Low-Cost Aeroponic System for Urban Agriculture: Design, Implementation, and Performance Evaluation

พุทธิกันต์ พงศ์พิชญามาตย์[a] ณัฐพงษ์ ประดิษฐ์ธรรม[a*] เมธี เมธีสวัสดิ์กุล[a]
ศีตลา กลิ่นรอด[a] และ กิตติกุล บุญเปลี่ยน[a]

Puttigun Pongpidjayamaad[a], Nattapong Pradisthum[a*], Metee Meteesawadkul[a],
Sritara Klinrod[a], and Gittigul Boonplien[a]

[a]คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประเทศไทย

[a]Faculty of Architecture, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

[*]Corresponding Author. Email: nattapong_p@rmutt.ac.th

Received: January 6, 2025 Revised: October 6, 2025 Accepted: May 1, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุน วัสดุ และตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบแอโรโปนิกส์ ออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ และประเมินประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเสนอแนวทางปฏิบัติสำหรับการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด จากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ ด้วยการพัฒนาต้นแบบที่โดยใช้หลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเทคนิคการปรับให้เหมาะสมของวัสดุ 3 รูปแบบ ประเมินประสิทธิภาพผลผลิตและต้นทุนการใช้ไฟฟ้า การใช้น้ำและการสูญเสียน้ำ การใช้พื้นที่และความหนาแน่นของพืช วิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบ และสรุปเป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด

ผลการศึกษาพบว่า ในด้านวัสดุและความทนทานของระบบแอโรโปนิกส์ รูปแบบประเภทที่ 2 และ 3 ที่สร้างจากพีวีซีธรรมดาโดยไม่มีการป้องกันแสงยูวีมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพ ในส่วนของการประกอบชิ้นส่วนรูปแบบที่ 3 ช่วยลดเวลาในการประกอบและทำความสะอาดได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีส่วนประกอบน้อยกว่าและไม่มีน้ำขัง ในด้านการใช้พื้นที่เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมในเมืองหรือพื้นที่จำกัด การวางแนวตั้งทำให้พืชมีความหนาแน่นสูงสุด แต่ก็สร้างความท้าทายในการกระจายแสง ในด้านต้นทุนของต้นแบบที่ 3 มีต้นทุนต่ำที่สุด รวมเป็นเงิน 3,620 บาท สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ประมาณ 20% และผลผลิตสูงขึ้นโดยเฉลี่ย 15% เมื่อเทียบกับการปลูกพืชด้วยดินในพื้นที่เท่าเทียมกัน เนื่องจากใช้โครงสร้างท่อ PVC ขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยไม่มีข้อต่อ ปั๊มน้ำ 120 วัตต์ มีอัตราการไหลของน้ำ 2 ลิตรต่อ

นาที มีค่าความเข้มข้นของสารอาหารอยู่ที่ 1,000-1,300 ppm. โดยผลผลิตอยู่ที่ 3.5 กก.ต่อตร.ม. ด้านความทนทานของวัสดุความทนทานที่เหมาะสมด้วยต้นทุนที่ต่ำ ลดปัญหาเรื่องปรับแต่งข้อต่อแบบและไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง และความต้องการพื้นที่ของระบบแอโรโปนิกส์ขนาดเล็กขั้นต่ำเท่ากับขนาดของถังเก็บน้ำ และควรมีพื้นที่ด้านข้าง 50 ซม. ไว้สำหรับการดูแลบำรุงรักษา พื้นที่ประมาณ 1.30 ตร.ม.ต่อหน่วย สำหรับบ้านพักอาศัยเป็นพื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบแอโรโปนิกส์ โดยการติดตั้งระบบหันหน้าไปทางทิศใต้หรือทิศตะวันออกของพื้นที่บริเวณบ้านพักอาศัย เนื่องจากทิศทางแดดเหล่านี้ได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน สำหรับห้องชุดหรือคอนโดมิเนียม พื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบแอโรโปนิกส์ คือ บริเวณระเบียงของห้อง ซึ่งส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ที่จำกัด แต่สิ่งสำคัญ คือ ผักอาจได้รับแสงน้อยลง เนื่องจากพื้นที่ของระเบียงอาจไม่สามารถกำหนดทิศทางแสงแดดได้จากตำแหน่งของห้องในหนึ่งชั้นของอาคารที่มีความแตกต่างกันไป การใช้งานในบริบทเมืองที่มีพื้นที่จำกัดช่วยให้ผู้อยู่อาศัยสามารถปลูกพืชเพื่อบริโภคในครัวเรือน ลดค่าใช้จ่ายด้านอาหาร และเพิ่มความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมได้ในระยะยาว

ABSTRACT

This study investigated the development and evaluation of a low-cost aeroponic system for space-constrained urban dwellings. Three prototype designs were analyzed, focusing on cost-effectiveness, material selection, and performance metrics such as electricity and water usage, land utilization, and plant density. The research assesses the feasibility of implementing aeroponic systems in compact urban environments and provides design and implementation guidelines. The study compared three aeroponic prototype designs. Prototypes 2 and 3, constructed from ordinary PVC without UV protection, exhibited material degradation over time. Prototype 3, featuring a heat-molded, jointless PVC structure, proved the most cost-effective at 3,620 baht. This design achieved an estimated 20% reduction in production costs and a 15% increase in yield compared to traditional soil-based cultivation within the same area. Prototype 3's vertical configuration maximized plant density, making it suitable for confined urban spaces, although it presented challenges in achieving uniform light distribution. The optimized system (Prototype 3) utilized a 120-watt water pump with a flow rate of 2 liters per minute, delivering a nutrient solution with a concentration of 1,000-1,300 ppm. This configuration resulted in a yield of 3.5 kg/m².

The recommended installation footprint is 1.30 m², with additional clearance required on the sides for maintenance access. Optimal sunlight exposure is crucial for maximizing yield. In houses, a south or east-facing orientation is recommended. Condominium balconies offer a viable alternative, but the specific unit's orientation will significantly impact light availability. The successful implementation of this low-cost aeroponic system demonstrates its potential to empower urban residents to engage in local food production. This not only reduces household food costs but also contributes to a more sustainable urban food system by minimizing transportation distances and promoting resource

efficiency. Further research could explore integrating automated light supplementation to address the light distribution challenges inherent in vertical designs.

คำสำคัญ: ระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ เกษตรในเมือง บ้านพักอาศัย คอนโดมิเนียม
Keywords: Low-Cost Aeroponics, Urban Agriculture, House, Condominium

บทนำ

ด้วยจำนวนประชากรและการขยายตัวของเมืองที่เพิ่มขึ้น ความต้องการอาหารอย่างยั่งยืนในเมืองที่มีพื้นที่จำกัดจึงสูงขึ้น (Abbey et al., 2022) เนื่องจากเกษตรกรรมดั้งเดิมใช้ทรัพยากรมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Silva et al., 2019) การปลูกพืชไร้ดินด้วยระบบแอโรโปนิกส์ (Aeroponic) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เพราะใช้ทรัพยากรน้อย มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ สอดคล้องกับแนวคิดเกษตรในเมืองที่ยั่งยืน (Vatcharadze, 2021) อย่างไรก็ตาม ระบบแอโรโปนิกส์ทั่วไปมักมีต้นทุนสูงและโครงสร้างซับซ้อน (Hao et al., 2020) จึงยากสำหรับผู้ที่มีงบประมาณจำกัดหรือมีพื้นที่น้อย การใช้วัสดุต้นทุนต่ำและการออกแบบเชิงนวัตกรรมจะทำให้ระบบเข้าถึงได้ง่ายขึ้น (Reyes-Lúa, Straus, Skjervold, Durakovic, & Nordtvedt, 2021) ปัญหาคือระบบแอโรโปนิกส์ส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่และราคาแพง (Greenfeld, Becker, Bornman, Spatari, & Angel, 2021) ส่งผลให้ต้องลงทุนสูง อีกทั้งการพัฒนา D.I.Y. ขนาดเล็กและราคาถูกยังมีการศึกษาน้อย (Lennard & Goddek, 2019) การขยายตัวของเมืองทำให้พื้นที่เกษตรดั้งเดิมลดลง รวมถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนกระทบต่อการปลูกพืชในเขตเมือง ระบบแอโรโปนิกส์สามารถแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการจัดการวางแผนในแนวตั้ง ประหยัดทรัพยากรน้ำ และควบคุมสภาพแวดล้อมรากพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ยังขาดงานวิจัยที่ศึกษาการพัฒนาระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำที่ยังคงประสิทธิภาพได้ดีในพื้นที่เมืองอันจำกัด เป็นช่องว่างสำคัญในการสร้างองค์ความรู้และแนวทางปฏิบัติสำหรับผู้อยู่อาศัยในเมืองที่สนใจจะทำเกษตรด้วยระบบแอโรโปนิกส์ในวงกว้าง งานวิจัยนี้จึงเน้นพัฒนารูปแบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำจากวัสดุที่หาง่าย ประเมินประสิทธิภาพทั้งเชิงเทคนิคและต้นทุน เพื่อสร้างแนวทางผลิตอาหารสำหรับผู้พักอาศัยในเมืองและสนับสนุนเกษตรในพื้นที่จำกัดอย่างยั่งยืนในบริบทของประเทศไทย ภูมิทัศน์การวิจัยเกษตรไร้ดินมีความก้าวหน้า เช่น การศึกษาการเจริญเติบโตของบัวบก (อนันต์ พิริยะภัทรกิจ, พัชรี เดชเลย์, พรกมล รูปเลิศ และปุญญพัฒน์ พลพิมพ์, 2565) และการมุ่งเน้นไปที่ระบบอควาโปนิกส์เพื่อสร้างระบบนิเวศที่ยั่งยืน (ชำนาญ ขวัญสกุล, 2567; พีระ มีทรัพย์, พวงเพชร พิมพ์จันทร์, กฤติมา กษมาวุฒิ และสำเนาว์ เสาวกูล, 2565) อย่างไรก็ตาม การศึกษาส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นไปที่ระบบดังกล่าวซึ่งมักมีความซับซ้อนและอาจไม่ตอบโจทย์ผู้ใช้งานรายย่อยในเมืองโดยตรง ดังนั้น จึงเกิดช่องว่างทางองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาระบบแอโรโปนิกส์ “ต้นทุนต่ำ” ที่รักษาประสิทธิภาพการผลิตที่ดีได้สำหรับการใช้งานจริงในพื้นที่พักอาศัยในเมืองที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และงบประมาณ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนารูปแบบระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำจากวัสดุที่หาได้ง่าย ทำการประเมินประสิทธิภาพทั้งในเชิงเทคนิคและต้นทุนอย่างเป็นระบบ สร้างองค์ความรู้และนำเสนอแนวทางปฏิบัติสำหรับผู้ที่พักอาศัยในเมืองที่สนใจผลิตอาหารเพื่อบริโภคด้วยตนเอง

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุน วัสดุ และตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบแอโรโปนิกส์ พร้อมออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเสนอแนวทางปฏิบัติไปใช้ที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด

การทบทวนวรรณกรรม

ระบบแอโรโปนิกส์ (Aeroponic) กับการทำเกษตรในเมือง

ระบบแอโรโปนิกส์ได้รับความสนใจ ด้วยเป็นวิธีการใหม่สำหรับเกษตรกรรมในเมืองเนื่องจากใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและใช้พื้นที่น้อย (Suárez-Cáceres, Fernández-Cabanás, Lobillo-Eguíbar, & Pérez-Urrestarazu, 2022) ระบบสามารถผลิตพืชมีความหนาแน่นและให้ผลผลิตสูงกว่าการเพาะปลูกบนดินแบบดั้งเดิม เหมาะสำหรับการเพาะปลูกในพื้นที่เมือง (He, 2015) อย่างไรก็ตาม ระบบแอโรโปนิกส์แบบดั้งเดิมมักมีต้นทุนสูงและมีความซับซ้อนซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเข้าถึงสำหรับการใช้งานขนาดเล็ก (Mateus-Rodriguez et al., 2013) การเลือกวัสดุและการพิจารณาการออกแบบ

ด้านความยั่งยืนและความทนทานของวัสดุ

การเลือกใช้วัสดุเป็นสิ่งสำคัญสำหรับประสิทธิภาพในระยะยาวของระบบแอโรโปนิกส์ วัสดุประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นที่ยอมรับว่ามีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนและความทนทานในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ทำให้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างแอโรโปนิกส์ (Mahmoud & Tantawi, 2004) อย่างไรก็ตาม การได้รับแสงแดดหรือรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นเวลานานทำให้คุณสมบัติเชิงกลของพีวีซีลดลงโดยการใช้สารป้องกันรังสี UV จะช่วยเพิ่มความทนทานสำหรับการใช้งานกลางแจ้งได้ (Alahapperuma & Samarasekara, 2019; Cheng, Shi, Dong, & Han, 2025)

ด้านการประกอบและการบำรุงรักษา

สำหรับการออกแบบระบบที่มีส่วนประกอบแบบโมดูลาร์ (แยกส่วน) และกระบวนการประกอบที่เรียบง่ายนั้นสามารถช่วยเพิ่มการใช้งานและการบำรุงรักษาได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ใช้ที่มีความเชี่ยวชาญหรือทักษะด้านเทคนิคจำกัด (Liew et al., 2019) โดยการลดจำนวนข้อต่อและใช้ส่วนประกอบมาตรฐาน เช่น อุปกรณ์ PVC สามารถลดต้นทุนการก่อสร้างและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาได้ดี (Kim & Lee, 2005)

ด้านการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในปัจจุบัน

สำหรับเทคโนโลยีไฟ LED สำหรับการปลูกพืชและระบบอัตโนมัติสามารถปรับปรุงการเจริญเติบโตของพืชได้ แต่เทคโนโลยีเหล่านี้มีต้นทุนสูงและมีความซับซ้อนของระบบ ซึ่งมีผลต่อผู้ใช้ที่มีทักษะจำกัด (Francis, Vishnu, Jha, & Rajaram, 2018) การให้ความสำคัญกับกลยุทธ์การออกแบบที่สามารถเพิ่มแสงแดดธรรมชาติให้ได้มากที่สุด และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดวางพื้นที่นั้น จะเป็นส่วนสนับสนุนต่อการออกแบบต้นทุนต่ำและข้อจำกัดในเมืองได้ดียิ่งขึ้น (Karuniawati et al., 2021)

ด้านประสิทธิภาพของวัสดุและการใช้พื้นที่

สำหรับแนวทางการออกแบบในทางสถาปัตยกรรม ซึ่งจะใช้ประโยชน์จากวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป ดังเช่น ท่อ PVC ที่สามารถช่วยให้ก่อสร้างใช้ต้นทุนที่ประหยัดและสามารถคุ้มต้นทุนได้ (Hayden, 2006) การออกแบบโครงสร้างแนวตั้งและการปรับระยะห่างระหว่างต้นไม้ให้เหมาะสมนั้น จะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่การใช้งานได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อสภาพแวดล้อมในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด (Shao, Xia, Wu, Chen, & Mi, 2018)

การพิจารณาสิ่งแวดล้อมและพื้นที่

ด้านการเลือกและการวางแนวสถานที่ สำหรับการเลือกสถานที่ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้หลักการทางสถาปัตยกรรม ดังเช่น การสัมผัสแสงแดดและการเข้าถึงเป็นสิ่งสำคัญในสภาพแวดล้อมในเมือง โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่แนวตั้งให้สูงที่สุดและกำหนดพื้นที่ให้ได้รับแสงแดดที่เพียงพอ (He, Goh, Qin, Shen, & Rahardjo, 2025; Nguyen & Weiss, 2008) และด้านการรวมระบบในพื้นที่จำกัด การออกแบบระบบแอโรโปนิกส์ที่สัมพันธ์กับพื้นที่จำกัดในเมืองจำเป็นต้องออกแบบแผนผังที่กะทัดรัดและมีประสิทธิภาพ แผนผังใช้พื้นที่ในแนวตั้งและลดพื้นที่งานระบบให้เหลือน้อยที่สุด และจะช่วยให้สามารถรวมเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ ดังเช่น ระเบียง หรือดาดฟ้าได้ (Yazid, 2021)

การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิต การใช้ทรัพยากรและข้อกำหนดในการบำรุงรักษา รวมถึงตรวจสอบปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร ระดับ pH การใช้น้ำ เป็นต้น จะเข้าใจถึงประสิทธิภาพของระบบได้ (Ares, Bertiller, & del Valle, 2001; Jame & Cutforth, 1996) กับแนวทางบูรณาการกับแนวทางปฏิบัติการเกษตรในเมือง

ความท้าทายและโอกาสในอนาคต

ต้นทุนและอุปสรรคทางเทคโนโลยียังเป็นปัญหาในการขยายการใช้แอโรโปนิกส์ เนื่องจากการลงทุนเริ่มต้นสูงและเทคนิคที่ซับซ้อน (Min, Nguyen, Howatt, Tavares, & Seo, 2023) รวมถึงด้านการควบคุมสิ่งแวดล้อมและพลังงานเกิดความเสี่ยงเมื่อไฟดับในพื้นที่ (Garzón, J., Montes, Garzón, J., & Lampropoulos, 2023) การแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรใส่ใจการออกแบบที่ประหยัดพลังงาน (Argo, Hendrawan, & Ubaidillah, 2019) และผสมผสานอควาโพนิกส์เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความยั่งยืน ซึ่งเป็นแนวทางที่น่าสนใจ (Adugna & Goshu, 2010; Dong, 2011) นอกจากนี้แอโรโปนิกส์จะช่วยประหยัดพื้นที่และน้ำ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างและวัสดุ ดังนั้นการศึกษาที่พัฒนาระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ ด้วยการออกแบบเชิงสถาปัตยกรรม (เช่น การเลือกวัสดุที่มีราคาไม่แพง แต่ทนทาน และการออกแบบให้ใช้พื้นที่แนวตั้งให้คุ้มค่า) ยังมีการเผยแพร่น้อย เกิดช่องว่างในวรรณกรรมเกี่ยวกับแนวทางการออกแบบและก่อสร้างระบบแอโรโปนิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการเพาะปลูกที่ยั่งยืน และเข้าถึงได้ง่ายกับผู้อยู่อาศัยในเมือง

ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นรูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้ 1) แนวทางการออกแบบโดยใช้หลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเทคนิคการปรับให้เหมาะสมของวัสดุ 2) การสร้างต้นแบบและการประเมินวัสดุที่ใช้ในแต่ละรูปแบบ 3) การประเมินประสิทธิภาพผลผลิตจากต้นแบบและต้นทุนการใช้ไฟฟ้า

4) การประเมินประสิทธิภาพการใช้น้ำและการสูญเสียน้ำ 5) การประเมินประสิทธิภาพการใช้พื้นที่และความหนาแน่นของพืช รวมถึงแนวทางการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพระบบ 6) การประเมินประสิทธิภาพต้นทุนรวมและผลผลิต และ 7) แนวทางปฏิบัติสำหรับการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด โดยกำหนดชุดต้นแบบระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ 3 รูปแบบ (รูปแบบที่ 1, รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3) ซึ่งออกแบบให้สอดคล้องกับหลักการ “โมดูลาร์” (Modular Design) เพื่อให้สะดวกต่อการประกอบและบำรุงรักษา (Kim & Lee, 2005; Liew et al., 2019) แต่ละรูปแบบใช้วัสดุหลักเป็น PVC แต่ต่างกันที่วิธีการป้องกัน UV (Alahapperuma & Samarasekara, 2019; Cheng et al., 2025; Mahmoud & Tantawi, 2004) และจำนวนข้อต่อที่ใช้ นอกจากนี้ ได้เลือกพันธุ์ผักสลัดชนิดเดียวกัน (กรีนโอ๊ค) เพื่อให้ผลการเปรียบเทียบเกิดความสม่ำเสมอ โดยกำหนดจำนวนต้นทดลองในแต่ละระบบเท่ากัน (30 ต้นต่อระบบ) เพื่อควบคุมตัวแปรระหว่างการทดลองและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Ares et al., 2001; Jame & Cutforth, 1996) ระยะเวลาดำเนินการเก็บข้อมูลคือ 45 วัน เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและเก็บเกี่ยวเมื่อเทียบกับวงจรชีวิตของผักสลัดที่เลือกใช้ การวัดและช่วงการระยะเวลาวัดระยะเวลา 45 วัน ในการสังเกตอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักสลัด เหมาะสมกับวัฏจักรการปลูกผักสลัดชนิดดังกล่าว ส่วนการประเมินความทนทานวัสดุที่ใช้เวลา 109 วัน มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ในหลายรอบการปลูก การทดสอบค่าความเข้มข้นของสารอาหาร (ppm) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทุกสัปดาห์ เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานการควบคุมสารละลายธาตุอาหารในระบบปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (Ares et al., 2001; Jame & Cutforth, 1996) รายละเอียดทางสถาปัตยกรรมในแต่ละต้นแบบมุ่งเน้นการออกแบบที่สามารถวางในพื้นที่ระเบียงขนาดเล็ก (กว้าง 1.70 ม. x ยาว 1.45 ม.) โดยปรับรูปแบบท่อ PVC ให้เหมาะกับการติดตั้งในแนวตั้งเพื่อประหยัดพื้นที่พื้น (Floor Area) และคำนึงถึงน้ำหนักรวมของระบบ (รวมทั้งน้ำในถังและน้ำหนักโครงสร้างเมื่อชุ่มน้ำ) ไม่เกิน 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นมาตรฐานรับน้ำหนักขั้นต่ำของระเบียงที่อยู่อาศัยในเมือง (Yazid, 2021) การออกแบบแบบโมดูลาร์ช่วยให้สามารถปรับขนาดหรือต่อเติมได้ง่าย ลดความซับซ้อนในการซ่อมบำรุง มีการตรวจตัวชี้วัดทางสถาปัตยกรรม เช่น การวัดมุมตกกระทบของแสงแดด และการประเมินรูปแบบเงาที่ลดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืช เพื่อรวบรวมข้อมูลการออกแบบสำหรับขยายผลในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ ต่อไป (Nguyen & Weiss, 2008; He et al., 2025) การประเมินประสิทธิภาพพารามิเตอร์ที่นำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ (1) ผลผลิต (กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตร.ม.) เทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานของการปลูกผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิกส์และบนดินภายใต้สภาพภูมิอากาศใกล้เคียงกัน (2) ปริมาณการใช้น้ำ (ลิตรต่อวัน) เทียบกับวิธีการปลูกบนดิน (3) ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh) ที่ใช้สำหรับการเดินปั๊ม และ (4) ตัวแปรทางสถาปัตยกรรม เช่น อัตราการบังแดดหการรับแสงตามตำแหน่งติดตั้ง ตัวชี้วัดทั้งหมดนำมาสรุปเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเชิงบูรณาการทั้งด้านการเกษตรและด้านสถาปัตยกรรมเมือง สอดคล้องกับแนวทางการวิจัยเกษตรสมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพการใช้น้ำและพลังงาน ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปัจจัยอัตราการไหลเวียนของสารอาหารในระบบ (พีระ มีทรัพย์ และคณะ, 2565)

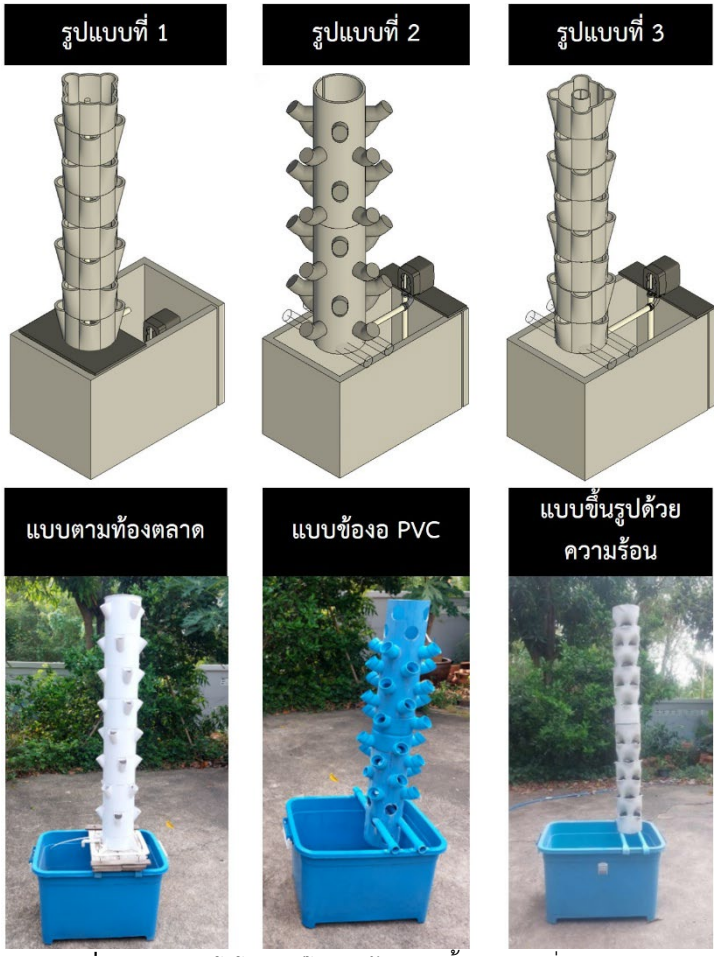
ผลการศึกษา

1) แนวทางการออกแบบที่ใช้หลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้ใช้ระบบแอโรโปนิกส์เป็นทางแนวตั้งตามท้องตลาดทั่วไปในรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นสู่การปรับใช้และออกแบบโครงสร้างแนวตั้งโดยใช้ท่อ PVC มาตรฐาน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว) เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนและเป็นรูปสถาปัตยกรรมแบบแยกส่วนได้ (โมดูลลาร์) (He, 2015; Mateus-Rodriguez et al., 2013) โดยพื้นที่โครงสร้างแนวตั้งมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพืชให้สูงสุดรวมถึงลดพื้นที่ระบบให้เหลือน้อยที่สุด ในด้านพื้นที่เก็บน้ำที่ประกอบไปด้วยสารละลายธาตุอาหาร เป็นลักษณะอ่างเก็บน้ำ ที่แยกต่างหากจากบริเวณฐานหมุนเวียนโดยปั๊มน้ำขนาด 120 วัตต์ โดยสารละลายธาตุอาหารจะถูกส่งโดยปั๊ม ส่งขึ้นไปยังข้องอ ในรูปแบบที่ 2 ที่มีการเจาะรู ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อฉีดพ่นสู่รากพืช โดยมีพื้นที่รองรับน้ำเสีย และการออกแบบโครงสร้างทรงกระบอกพร้อมพื้นที่การรองรับพืช นอกจากนี้มีการพัฒนาออกแบบรูปทรงแนวตั้งพร้อมพื้นที่รองรับพืชโดยการคำนึงถึงวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนข้อต่อและลดระยะเวลาในการประกอบหรือก่อสร้าง เหมาะสมกับข้อจำกัดในทักษะของผู้ใช้งานด้วยการใช้เทคนิคปืนเป่าลมร้อนโดยนำมาใช้เพื่อให้ท่อ PVC อ่อนตัวและขึ้นรูปเพื่อสร้างเป็นพื้นที่ปลูกพืช ในรูปแบบที่ 3 มีการออกแบบรองรับความหนาแน่นของพืชที่เพิ่มขึ้นโดยรองรับถ้วยปลูกมากขึ้นตลอดรูปทรงกระบอก มีการฉีดพ่นรากได้ทั่วถึงและควบคุมปริมาณเสียลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโดยโน้มถ่วง ซึ่งรูปแบบที่ 3 เป็นการพัฒนาต่อยอดจากรูปแบบที่ 2 โดยยังยึดท่อ PVC มาใช้เพื่อความทนทาน แต่มีการเทคนิคปืนเป่าลมร้อนมาใช้เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและราคาไม่สูง

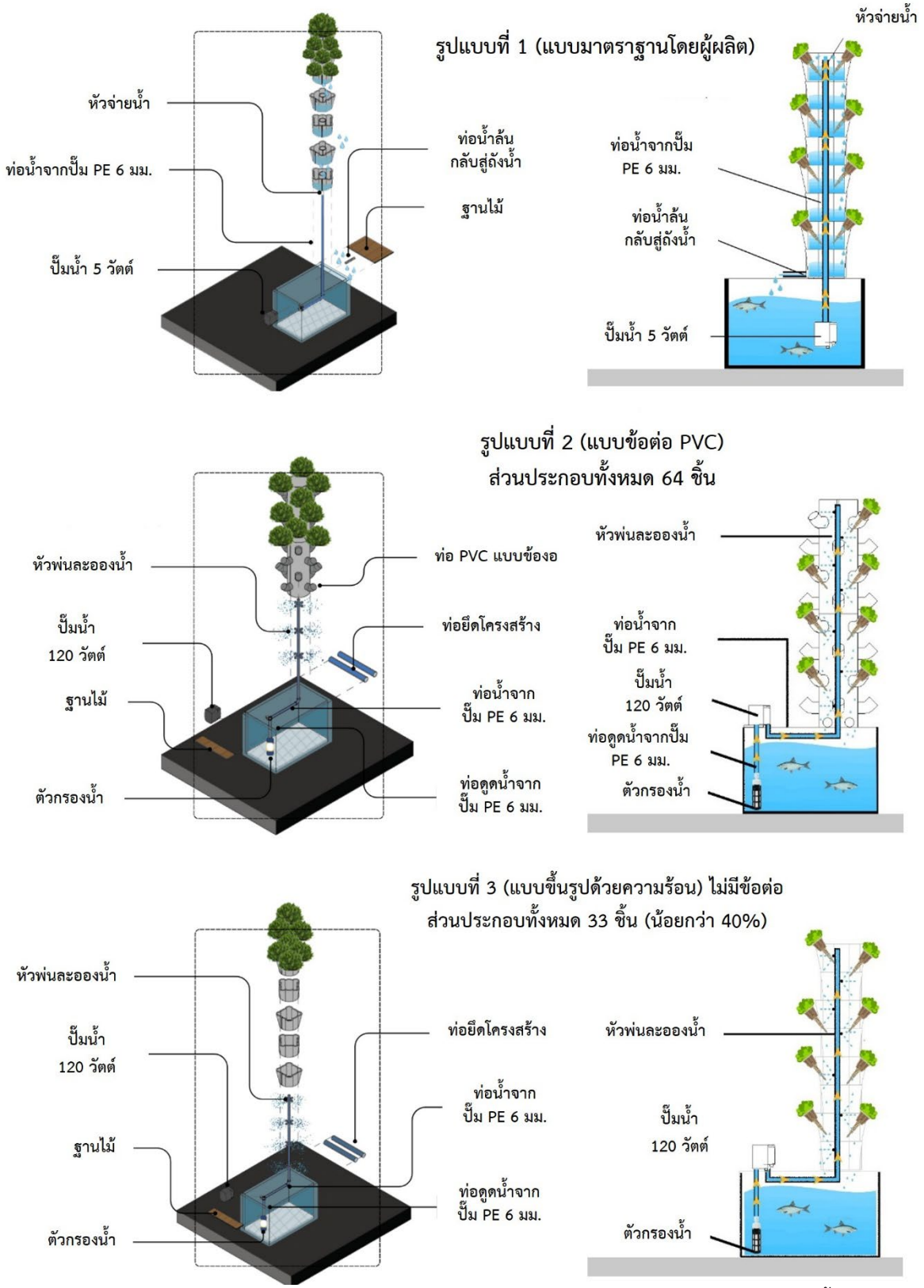
2) การพัฒนาต้นแบบและการประเมินวัสดุที่ใช้ในแต่ละรูปแบบ

ผู้วิจัยมีการพัฒนาต้นแบบ 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คือ รูปแบบ DRFT ที่ปรับแต่งได้ที่ซื้อตามท้องตลาด โดยเป็นรูปแบบที่ไว้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ รูปแบบที่ 2 คือ การใช้ท่อ PVC ขนาด 6 นิ้วมาตรฐานพร้อมรูเจาะเชื่อมด้วยข้องอพีวีซีสำหรับปลูกพืช และรูปแบบที่ 3 คือ ใช้ท่อ PVC ขึ้นรูปด้วยความร้อนเพื่อสร้างพื้นที่ปลูกพืช ลดเรื่องข้อต่อ มีการประเมินประสิทธิภาพของต้นแบบแต่ละรูปแบบและทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมเพื่อประเมินประกอบไปด้วย อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมที่ใช้ดินประสิทธิภาพการใช้น้ำและสารอาหาร การใช้พลังงาน การทำงานระบบและการบำรุงรักษา มีการเก็บรวบรวมข้อมูลตลอดช่วงการเจริญเติบโตที่กำหนด ตรวจสอบตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเข้มข้นของสารละลายสารอาหาร (ppm) อัตราการไหลของน้ำ และการผลิตชีวมวลของพืช เป็นต้น (ดังภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ระบบแอโรโปนิกส์โครงสร้างแนวตั้งรูปแบบที่ 1, 2 และ 3

จากการศึกษาพบว่า วัสดุที่ใช้ในรูปแบบที่ 1 ระบบ DRFT เป็นส่วนประกอบที่ผลิตจากโรงงานระบุว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้สารป้องกันแสง UV ส่วนวัสดุที่ใช้ในรูปแบบที่ 2 ระบบที่มีข้อต่อ PVC ประกอบด้วย ท่อ PVC ข้อต่อ PVC 32 ชิ้น หัวฉีดน้ำ ท่อยางขนาด 6 มม. โดยรวมมีส่วนประกอบทั้งหมด 64 ชิ้น โดยมีวัสดุและอุปกรณ์จำเพาะอื่นอีก เช่น วัสดุปลูก 40 ชิ้น และชิ้นส่วนระบบน้ำ 24 ชิ้น โดยจับเวลาประกอบอยู่ที่ 20 นาที พบข้อสังเกตว่าการประกอบใช้เป็นเวลานาน เนื่องจากต้องติดตั้งและปรับข้อต่อเข้ากับท่อที่เจาะไว้ ส่วนวัสดุที่ใช้ในรูปแบบที่ 3 ระบบที่มีการปรับโดยไม่มีข้อต่อ PVC แต่เป็น PVC ขึ้นรูปแบบไม่มีข้อต่อ หัวฉีดน้ำ ท่อยางขนาด 6 มม. โดยรวมมีส่วนประกอบทั้งหมด 33 ชิ้น มีวัสดุและอุปกรณ์จำเพาะอื่น เช่น วัสดุปลูก 9 ชิ้น และชิ้นส่วนระบบน้ำ 24 ชิ้น โดยใช้เวลาประกอบอยู่ที่ 15 นาที พบข้อสังเกตการประกอบทำได้รวดเร็วขึ้น ด้วยการลดชิ้นส่วนและการออกแบบที่เรียบง่ายขึ้น (ดังภาพที่ 3) ด้านการประเมินการทำความสะอาดง่ายของและอุปกรณ์ของต้นแบบแต่ละรูปแบบ พบว่า รูปแบบที่ 2 และ 3 ทำความสะอาดง่ายกว่ารูปแบบที่ 1 เพราะไม่มีน้ำขังและการสะสมคราบน้ำ แต่ต้องบำรุงรักษาปั๊มเป็นประจำเนื่องจากมีการทำงานต่อเนื่องจนเกิดความร้อนซึ่งเสี่ยงต่อการชำรุด ด้านความทนทาน รูปแบบที่ 1 มีวัสดุป้องกันรังสี UV หลัง 109 วัน ยังคงสภาพสมบูรณ์ ส่วนรูปแบบที่ 2 (PVC ธรรมดา) มีลักษณะซีดจางและรูปแบบที่ 3 (PVC ทาสี) สีลอกออกมาแม้พยายามป้องกันด้วยการพ่นสีแล้วก็ตาม (Alahapperuma & Samarasekara, 2019; Cheng et al., 2025) (ดังภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ความแตกต่างด้านวัสดุ ส่วนประกอบและอุปกรณ์ของระบบแอโรโปนิกส์โครงสร้างแนวตั้ง รูปแบบที่ 1, 2 และ 3

3) การประเมินประสิทธิภาพผลผลิตและต้นทุนการดำเนินงาน

การประเมินประสิทธิภาพผลผลิตของระบบปลูกพืชทั้ง 3 รูปแบบ แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนทั้งในด้านน้ำหนักต่อต้นและผลผลิตต่อพื้นที่ โดยรูปแบบที่ 1 สามารถผลิตพืชที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 6-7 ต้นต่อกก. ส่งผลให้ผลผลิตรวมจาก 32 ต้นอยู่ที่ 4.16-4.80 กก. (Argo et al., 2019) อย่างไรก็ตาม เมื่อคิดเป็นผลผลิตต่อพื้นที่ ให้ผลผลิตเพียง 1.44-1.67 กก.ต่อตร.ม. ในทางตรงกันข้าม รูปแบบที่ 2 และ 3 แม้จะให้น้ำหนักต่อต้นที่น้อยกว่าเพียง 10-11 ต้นต่อกก. และผลผลิตรวมจาก 32 ต้นอยู่ที่ 2.88-3.20 กิโลกรัมเท่านั้น (Garzón et al., 2023) แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพต่อพื้นที่ พบว่ารูปแบบที่ 2 ให้ผลผลิต 9.60 กก.ต่อตร.ม. ขณะที่รูปแบบที่ 3 ให้ผลผลิตสูงสุดถึง 10.67 กก.ต่อตร.ม. ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Min et al. (2023) ที่พบว่าระบบแนวตั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ ด้านต้นทุนการใช้พลังงานตลอดระยะเวลาการปลูก 45 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปแบบต่าง ๆ โดยรูปแบบที่ 1 ใช้ปั๊มน้ำขนาด 5 วัตต์ ซึ่งมีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที และรักษาระดับ EC ที่ 1,200 ppm ส่งผลให้มีการใช้พลังงานรวมเพียง 2.25 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 38.05 บาท (Kim & Lee, 2005) ขณะที่รูปแบบที่ 2 และ 3 ต้องใช้ปั๊มขนาด 120 วัตต์ ทำงานต่อเนื่อง 22 ชั่วโมงต่อวัน รวม 990 ชั่วโมง ตลอดการปลูกทำให้ใช้พลังงานสูงถึง 118.8 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 490.54 บาท หรือสูงกว่ารูปแบบที่ 1 ถึง 12 เท่า (Argo et al., 2019) ทั้งนี้ การที่รูปแบบที่ 2 มีอัตราการไหล 3.2 ลิตรต่อนาทีที่ EC 1,200 ppm และรูปแบบที่ 3 มีอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาทีที่ EC 1,000-1,300 ppm ไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน เนื่องจากใช้ปั๊มขนาดเดียวกัน เมื่อพิจารณาต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นร่วมกับประสิทธิภาพการผลิต พบว่ารูปแบบที่ 1 มีต้นทุนสูงสุดที่ 4,760 บาท เนื่องจากใช้วัสดุคุณภาพสูงที่มีคุณสมบัติป้องกัน UV ซึ่งยังคงสภาพดีหลังการใช้งาน 109 วัน แต่ให้ผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำสุดเพียง 1.44-1.67 กก.ต่อตร.ม. (Liew et al., 2019) รูปแบบที่ 2 มีต้นทุน 4,290 บาท ใช้ท่อ PVC มาตรฐานร่วมกับข้อต่อจำนวนมาก พบว่าวัสดุมีการซีดจางหลังการใช้งาน 109 วัน แต่ให้ผลผลิตต่อพื้นที่ 9.60 กก.ต่อตร.ม. (Kim & Lee, 2005) รูปแบบที่ 3 แสดงความสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างต้นทุนและประสิทธิภาพ ด้วยต้นทุนต่ำสุดที่ 3,620 บาท จากการใช้เทคนิคปืนเป่าลมร้อนในการขึ้นรูปท่อ PVC ซึ่งช่วยลดจำนวนข้อต่อและความซับซ้อนในการประกอบ (Garzón et al., 2023) แม้วัสดุจะมีความทนทานในระดับพอเหมาะเมื่อประเมินด้วยการสังเกต แต่ให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูงสุดที่ 10.67 กก.ต่อตร.ม. สอดคล้องกับการศึกษาของ Min et al. (2023) ที่ระบุว่าการออกแบบที่เรียบง่ายให้ประสิทธิภาพการผลิตที่ดีได้หากมีการจัดการที่เหมาะสม (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ของระบบแอโรโปนิกส์โครงสร้างแนวตั้ง รูปแบบที่ 1, 2 และ 3

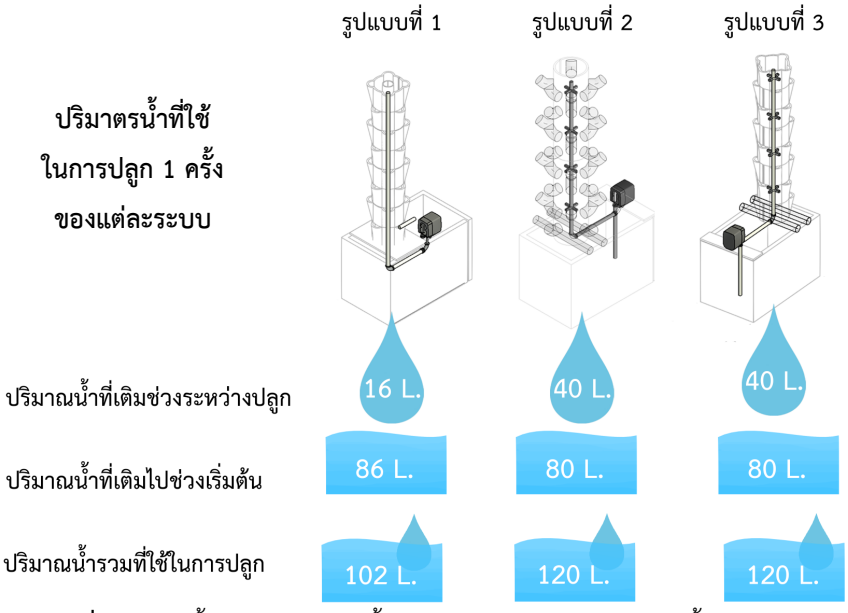
รายการเปรียบเทียบ	**รูปแบบที่1 DRFT สำเร็จรูป (ป้องกัน UV)**	**รูปแบบที่ 2 PVC + ข้อต่อ**	**รูปแบบที่ 3 PVC ขึ้นรูปด้วยความร้อน**
น้ำหนักเฉลี่ยต่อต้น (ต้น/กก.)	6-7	10-11	10-11
ผลผลิตรวม (32 ต้น/กก.)	4.16-4.80	2.88-3.20	2.88-3.20
ผลผลิตต่อพื้นที่ (กก./ตร.ม.)	1.44-1.67	9.60	10.67
ต้นทุนเริ่มต้น (บาท)	4,760	4,290	3,620
วัสดุหลัก	PVC ป้องกัน UV	PVC มาตรฐาน + ข้อต่อ	PVC ขึ้นรูปด้วยความร้อน

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ของระบบแอโรโปนิกส์โครงสร้างแนวตั้ง รูปแบบที่ 1, 2 และ 3 (ต่อ)

รายการเปรียบเทียบ	**รูปแบบที่1 DRFT สำเร็จรูป (ป้องกัน UV)**	**รูปแบบที่ 2 PVC + ข้อต่อ**	**รูปแบบที่ 3 PVC ขึ้นรูปด้วยความร้อน**
ความทนทานหลัง 109 วัน	คงสภาพดี	ซีดจาง	สีลอก
พลังงานที่ใช้ (kWh/รอบ)	2.25	118.8	118.8
ค่าไฟฟ้า (บาท/รอบ)	38.05	490.54	490.54
ข้อสังเกต	ผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำสุด ทนทานสูง ต้นทุนสูง	ผลผลิตต่อพื้นที่สูง ต้นทุนปานกลาง วัสดุซีดจาง	ผลผลิตต่อพื้นที่สูงสุด ต้นทุนต่ำสุด ประกอบง่าย วัสดุทนทานปานกลาง

4) การประเมินประสิทธิภาพการใช้น้ำและการสูญเสียน้ำ

ผลการศึกษาด้านประสิทธิภาพการใช้น้ำและการสูญเสียน้ำ พบว่า ในช่วงการเติมน้ำครั้งแรกของรูปแบบที่ 2 และ 3 อยู่ที่ 80 ลิตร และเติมเพิ่มเติมระหว่างการปลูกอยู่ที่ 40 ลิตร (สารละลายธาตุอาหาร 30 ลิตร น้ำเปล่า 10 ลิตร) รวม 120 ลิตรต่อรอบ ขณะที่รูปแบบที่ 1 ใช้ 100 ลิตร ผลการศึกษาที่เกิดขึ้นพบว่า ระบบเปิดจะเกิดการสูญเสียน้ำสูงจากการระเหยและไหลออก ส่งผลให้ความเข้มข้นสารอาหารผันผวนกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช (Ares et al., 2001) (ดังภาพที่ 3)



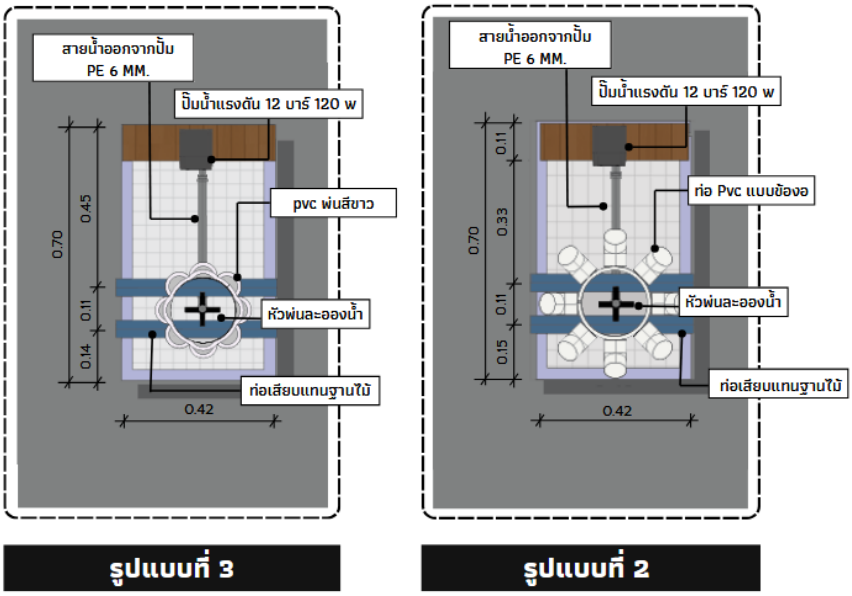
ภาพที่ 3 การใช้น้ำและการสูญเสียน้ำของต้นแบบระบบแอโรโปนิกส์ทั้ง 3 รูปแบบ

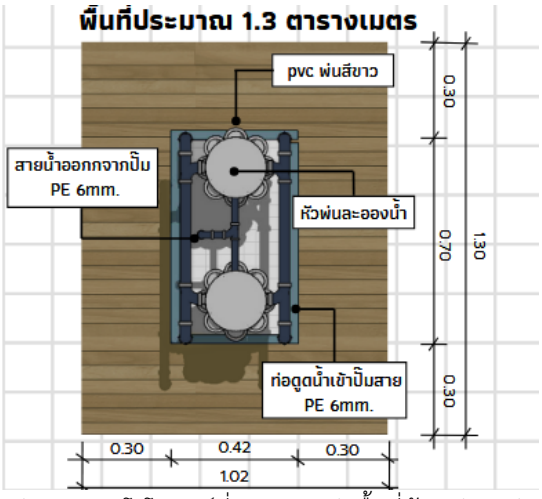
5) แนวทางปฏิบัติสำหรับการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด

ผลการศึกษาการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด ควรวางระบบหันสู่ทิศใต้หรือทิศตะวันออกเพื่อรับแสงแดดสูงสุดระบบแนวตั้งประสบปัญหาร่มเงากระทบการเติบโต หากใช้ไฟเทียมยิ่งเพิ่มต้นทุน (Francis et al., 2018; He et al., 2025; Karuniawati et al., 2021) ด้านการบูรณาการการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่า ในการทดลองเลี้ยงปลาไม่สำเร็จเนื่องจากแสงแดดส่งผลเสียต่อสุขภาพของปลา ความหนาแน่นของปลาในช่วงเริ่มต้นที่สูงทำให้เกิดความเครียดและอัตราการตาย จึงไม่เหมาะกับพื้นที่ในเมืองที่มีแสงแดดจำกัด (Adugna & Goshu, 2010; Dong, 2011) ด้านข้อจำกัดด้านพื้นที่ พบว่า ระบบแอโรโปนิกส์รูปแบบที่ 2 และ 3 เหมาะกับพื้นที่แคบใช้พื้นที่ขั้นต่ำ 1.3 ตร.ม. ซึ่งรวมพื้นที่เก็บสารอาหารและบำรุงรักษา (ดังภาพที่ 4) เมื่อเทียบกับการปลูกลงดินแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้พื้นที่มากกว่า ดังนั้นข้อจำกัดด้านพื้นที่ระบบแอโรโปนิกส์จึงเหมาะทั้งบ้านและคอนโดถ้าติดตั้งระบบอย่างถูกตำแหน่งและวิธีการ

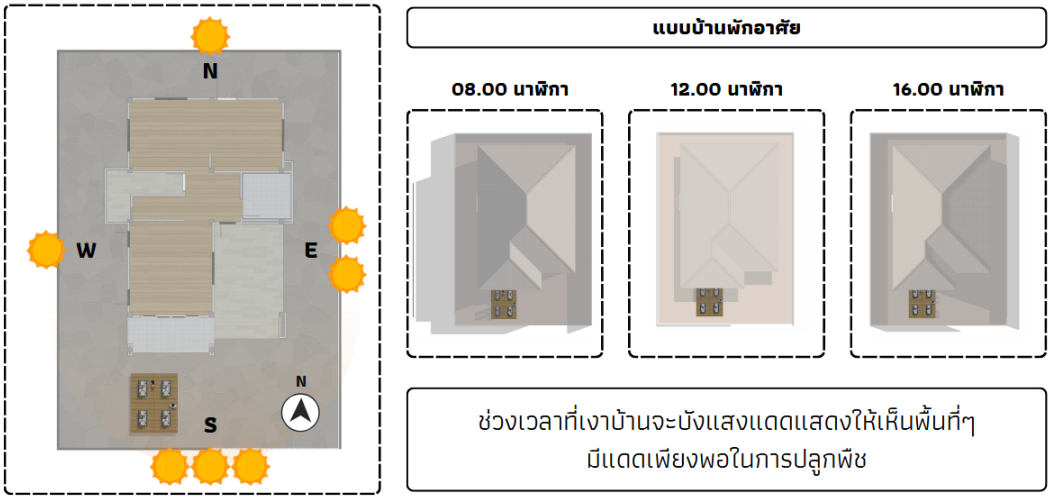
ผลการศึกษาการนำระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำไปใช้ในที่อยู่อาศัยเขตเมือง

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำสำหรับพื้นที่จำกัดในเมืองพบว่า ระบบรูปแบบที่ 2 และ 3 ใช้พื้นที่ขั้นต่ำเพียง 1.3 ตร.ม. ซึ่งรวมพื้นที่เก็บสารอาหารและบำรุงรักษาแล้ว การวางตำแหน่งที่เหมาะสมคือหันระบบสู่ทิศใต้หรือทิศตะวันออกเพื่อรับแสงแดดสูงสุด (Francis et al., 2018; Karuniawati et al., 2021) ซึ่งต้องหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีร่มเงาจากต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างที่อาจขัดขวางการสังเคราะห์แสงของพืช การใช้แสงเทียมเสริมแม้จะช่วยแก้ปัญหาแสงไม่เพียงพอ (ดังภาพที่ 5) แต่จะเพิ่มต้นทุนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ (He et al., 2025) ในด้านผลผลิต ระบบรูปแบบที่ 1 ให้ผลผลิตเฉลี่ย 1.44-1.67 กก./ตร.ม. ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น (Ares et al., 2001; Jame & Cutforth, 1996) ระบบนี้ใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กส่งผลให้ค่าไฟฟ้าต่ำเพียง 38.05 บาท/รอบการปลูก ในขณะที่รูปแบบที่ 2 และ 3 มีค่าไฟฟ้า 490.54 บาท/รอบ แต่ชดเชยด้วยการใช้พื้นที่แนวตั้งอย่างมีประสิทธิภาพและต้นทุนโครงสร้างที่ต่ำกว่า จึงเหมาะสำหรับพื้นที่จำกัดในเขตเมือง อย่างไรก็ตาม การบูรณาการระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบข้อจำกัดสำคัญ การทดลองเลี้ยงปลาไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากแสงแดดโดยตรงทำให้อุณหภูมิน้ำสูงเกินไป ส่งผลกระทบต่อสุขภาพปลาและคุณภาพผัก ประกอบกับความหนาแน่นของปลาที่สูงในช่วงเริ่มต้นก่อให้เกิดความเครียดและเพิ่มอัตราการตาย (Adugna & Goshu, 2010) ปัญหานี้รุนแรงขึ้นในพื้นที่เมืองที่มีข้อจำกัดด้านแสงธรรมชาติ (Dong, 2011) ดังนั้นหากต้องการเลี้ยงปลาควบคู่กับระบบ จำเป็นต้องใช้วัสดุปิดถังเพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำให้เหมาะสม สำหรับแนวทางการประยุกต์ใช้ตามประเภทที่อยู่อาศัย พบว่าบ้านพักอาศัยควรติดตั้งระบบกลางแจ้งบริเวณที่รับแสงเต็มที่ โดยหันทางทิศใต้หรือทิศตะวันออกตามที่กล่าวมา ส่วนห้องชุดหรือคอนโดมิเนียมแนะนำให้ติดตั้งที่ระเบียง (ดังภาพที่ 6) แต่ต้องประเมินปริมาณแสงที่ได้รับซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งห้องและอาคารข้างเคียง กรณีที่แสงธรรมชาติไม่เพียงพอต้องลงทุนไฟปลูกพืชเสริม ซึ่งจะเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานแต่ช่วยให้ผลผลิตมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

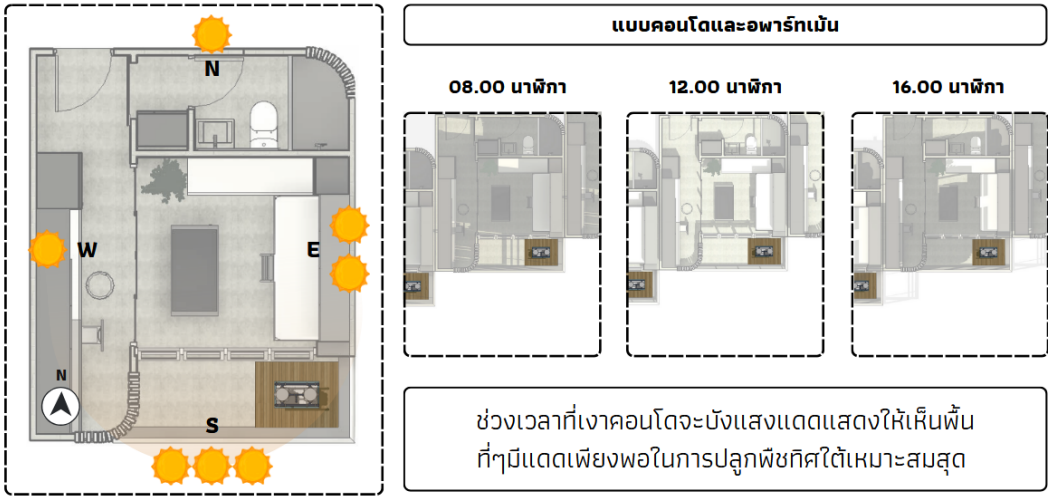




ภาพที่ 4 พื้นที่รองรับระบบแอโรโปนิกส์ที่เหมาะสมกับพื้นที่บ้านพักอาศัยและคอนโดมิเนียม



ภาพที่ 5 ความเข้มข้นของทิศทางเงาและแสงแดดในพื้นที่คอนโดมิเนียมที่มีการติดตั้งระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ



ภาพที่ 6 ความเข้มข้นของทิศทางเงาและแสงแดดในพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีการติดตั้งระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ

การสรุปผลและอภิปรายผล

เป็นการพัฒนาระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำทั้ง 3 รูปแบบตามหลักการออกแบบโมดูลาร์ (He, 2015; Mateus-Rodriguez et al., 2013) พบว่ารูปแบบที่ 3 มีศักยภาพสูงสุดสำหรับพื้นที่จำกัดในเมือง ด้วยต้นทุนเริ่มต้นต่ำสุด 3,620 บาท เทียบกับรูปแบบที่ 2 (4,290 บาท) และรูปแบบที่ 1 (4,760 บาท) (Liew et al., 2019) ใช้เทคนิคปืนเป่าลมร้อนขึ้นรูปท่อ PVC ลดชิ้นส่วนเหลือ 33 ชิ้น ประกอบใน 15 นาที เหมาะกับผู้ใช้ที่มีทักษะจำกัด ด้านประสิทธิภาพการผลิต พบความแตกต่างระหว่างผลผลิตต่อต้นและต่อพื้นที่อย่างชัดเจน รูปแบบที่ 1 ให้น้ำหนักต่อต้นสูงสุด (6-7 ต้น/กก.) แต่ผลผลิตต่อพื้นที่เพียง 1.44-1.67 กก./ตร.ม. ($p < 0.05$) (Ares et al., 2001; Jame & Cutforth, 1996) ขณะที่รูปแบบที่ 3 แม้ให้น้ำหนักต่อต้น 10-11 ต้น/กก. (Garzón et al., 2023) แต่ให้ผลผลิตสูงถึง 10.67 กก./ตร.ม. สอดคล้องกับ Min et al. (2023) ที่ยืนยันประสิทธิภาพของระบบแนวตั้ง อย่างไรก็ตาม ต้นทุนพลังงานแตกต่างกันมาก รูปแบบที่ 1 ใช้ปั๊ม 5 วัตต์ คิดเป็น 38.05 บาท/รอบ (Kim & Lee, 2005) ขณะที่รูปแบบที่ 2 และ 3 ใช้ปั๊ม 120 วัตต์ คิดเป็น 490.54 บาท/รอบ สูงกว่า 12 เท่า (Argo et al., 2019) ระบบใช้น้ำใกล้เคียงกัน 100-120 ลิตร/รอบ แต่ระบบเปิดมีการสูญเสียจากการระเหยทำให้ความเข้มข้นสารอาหารผันผวน (Ares et al., 2001) การประยุกต์ใช้ในพื้นที่เมืองควรติดตั้งหันสู่ทิศใต้หรือทิศตะวันออก (Francis et al., 2018; Karuniawati et al., 2021) หลีกเลี่ยงร่มเงา การใช้แสงเทียมเพิ่มต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญ (He et al., 2025) การบูรณาการเลี้ยงปลาไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากอุณหภูมิน้ำสูงและความหนาแน่นปลาทำให้เกิดความเครียด (Adugna & Goshu, 2010; Dong, 2011) จึงควรใช้วัสดุปิดถังควบคุมอุณหภูมิหากต้องการเลี้ยงปลาร่วมด้วย เมื่อพิจารณาในเชิงเปรียบเทียบกับระบบไร้ดินอื่น ๆ ในบริบทของไทย แต่ผลผลิตที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับระบบไฮโดรโปนิกส์ (อนันต์ พิริยะภัทรกิจ และคณะ, 2565) ที่ต้องใช้พื้นที่แนวนอนมากกว่า หรือระบบอควาโปนิกส์ที่มีความซับซ้อนในการจัดการสมดุลระหว่างพืชและสัตว์น้ำสูงกว่า (ชำนาญ ขวัญสกุล, 2567; พีระ มีทรัพย์ และคณะ, 2565) อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละระบบในบริบทการผลิตผักสลัดในพื้นที่จำกัดของเมืองไทย

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาระบบแอโรโปนิกส์ต้นทุนต่ำทั้ง 3 รูปแบบ เห็นถึงศักยภาพที่แตกต่างกันตามบริบทการใช้งาน รูปแบบที่ 3 แม้จะมีต้นทุนเริ่มต้นต่ำสุดและผลผลิตต่อพื้นที่สูงสุด แต่ต้นทุนพลังงานที่สูงกว่า 12 เท่า เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 สะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้น โดยเฉพาะการใช้ตัวตั้งเวลาแบบอัจฉริยะที่ปรับการทำงานของปั๊มตามความต้องการของพืชในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต สำหรับการประยุกต์ใช้ในเขตเมือง ควรพิจารณาตามลักษณะที่อยู่อาศัย บ้านเดี่ยวที่มีพื้นที่กลางแจ้งเหมาะกับรูปแบบที่ 1 เนื่องจากต้นทุนพลังงานต่ำและการบำรุงรักษาง่าย ขณะที่คอนโดมิเนียมควรเลือกรูปแบบที่ 3 ที่ใช้พื้นที่แนวตั้งอย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้องลงทุนระบบแสง LED เสริมในระยะยาวเพื่อความคุ้มค่า ซึ่งภาครัฐควรสนับสนุนการวิจัยพัฒนาวัสดุทดแทนที่มีความทนทานต่อ UV และราคาไม่สูง รวมถึงส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีผ่านศูนย์เรียนรู้ชุมชน การพัฒนาต่อยอดควรมุ่งเน้นการผสมผสานพลังงานทดแทน พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับติดตามและควบคุมระบบผ่านสมาร์ทโฟน ทำให้เกษตรกรเมืองสามารถจัดการระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้มีเวลาจำกัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมงานวิจัยฯ ทุนนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2565 ในหัวข้อเรื่อง การออกแบบระบบอควาโปนิกส์แบบต้นทุนต่ำที่เหมาะสมต่อการลงทุนของเกษตรกรในพื้นที่ภาคใต้ งบประมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ เป็นส่วนหนึ่งของประโยชน์ด้านการออกแบบพื้นที่เพาะปลูกในพื้นที่จำกัดในเขตเมือง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และ ผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับระบบ พร้อมนักศึกษาที่ร่วมงานวิจัย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหลายที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

ชำนาญ ขวัญสกุล. (2567). ความหนาแน่นที่เหมาะสมของการปลูกผักบุ้งจีนร่วมกับการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบอควาโปนิกส์. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร,* 41(1), 52-64. https://doi.org/10.14456/jare-mju.2024.5

พีระ มีทรัพย์, พวงเพชร พิมพ์จันทร์, กฤติมา กษมาวุฒิ และสำเนาว์ เสาวกูล. (2565). ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม คะน้าใบหยิก และคุณภาพน้ำในระบบอะควาโปนิกส์ที่ใช้น้ำหมุนเวียน. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี, 3*(2), 97-109.

อนันต์ พิริยะภัทรกิจ, พัชรี เดชเลย์, พรกมล รูปเลิศ และปุญญพัฒน์ พลพิมพ์. (2565). การเจริญเติบโตและผลผลิตบัวบกจาก 5 แหล่งปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช, 41*(2), 127-140.

Abbey, M., Anderson, N. O., Yue, C., Schermann, M., Phelps, N., Venturelli P., et al. (2022). Basil, Ocimum basilicum, yield in northern latitudinal aquaponic growing conditions. *Journal of the World Aquaculture Society,* 53(1), 77-94. https://doi.org/10.1111/jwas.12819

Adugna, B. T., & Goshu, G. (2010). Integrating aquaculture with traditional farming system: socioeconomic assessment in the Amhara Region, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology,* 10(2-4), 223–230. https://doi.org/10.2478/v10104-011-0010-y

Alahapperuma, K. G., & Samarasekara, A. M. P. B. (2019). Degradation of unplasticised poly vinyl chloride based engineering products upon exposure to ultra violet radiation. *Tropical Agricultural Research,* 30(4), 117-123. http://doi.org/10.4038/tar.v30i4.8333

Ares, J., Bertiller, M., & del Valle, H. (2001). Functional and structural landscape indicators of intensification, resilience and resistance in agroecosystems in southern Argentina based on remotely sensed data. *Landscape Ecology,* 16(3), 221-234. http://doi.org/ 10.1023/A:1011172006029

Argo, B. D., Hendrawan, Y., & Ubaidillah, U. (2019). A fuzzy micro-climate controller for small indoor aeroponics systems. *TELKOMNIKA,* 17(6), 3019-3026. http://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i6.12214

Cheng, J., Shi, C., Dong, Y., & Han, J. (2025). Application of titanium dioxide nanorod (TNr)@SiO_2 with low photocatalytic effect and high UV resistance in poly (vinyl chloride) film. *Journal of Thermoplastic Composite Materials,* 38(1), 74-92. https://doi.org/10.1177/08927057241241507

Dong, S. (2011). History, principles, and classification of integrated aquaculture in China. *Journal of Fishery Sciences of China,* 18(5), 970-977.. https://doi.org/10.3724/sp.j.1118.2011.01202

Francis, F., Vishnu, P. L., Jha, M., & Rajaram, B. (2018). IOT-Based Automated Aeroponics System. Lecture Notes in Electrical Engineering. *Intelligent Embedded Systems, 492,* 337-345. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8575-8_32

Garzón, J., Montes, L., Garzón, J., & Lampropoulos, G. (2023). Systematic Review of Technology in Aeroponics: Introducing the Technology Adoption and Integration in Sustainable Agriculture Model. *Agronomy,* 13(10), 2517. https://doi.org/10.3390/agronomy13102517

Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., & Angel, D. L. (2021). Monetizing environmental impact of integrated aquaponic farming compared to separate systems. *Science of the Total Environment,* 792, 148459. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148459

Hao, Y., Ding, K., Xu, Y., Tang, Y., Liu, D., & Li, G. (2020). States, trends, and future of aquaponics research. *Sustainability,* 12(18), 7783. https://doi.org/10.3390/su12187783

Hayden, A. L. (2006). Aeroponic and Hydroponic Systems for Medicinal Herb, Rhizome, and Root Crops. *HortScience,* 41(3), 536-538. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.536

He, J. I. E. (2015). Farming of vegetables in space-limited environments. *Cosmos, 11*(1), 21-36. https://doi.org/10.1142/S0219607715500020

He, J., Goh, K. J., Qin, L., Shen, Y., & Rahardjo, H. (2025). Identifying Plant Healthy Indicators of Five Tropical Perennials Using Certain Leaf Physiological Traits During Drought Stress and Re-Watering. Horticulturae, 11(3), 230. https://doi.org/10.3390/horticulturae11030230

Jame, Y. W., & Cutforth, H. W. (1996). Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science,* 76(1), 9-19. https://doi.org/10.4141/cjps96-003

Karuniawati, H., Marjan, A., Islam, R., Uddin, P., Afjal, M. I., & Mamun, A. (2021). Design of autonomous hydroponics system based on Internet of Things (IoT) with NFT method. TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control, 19(5), 1622–1629. https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v19i5.19566

Kim, H. S., & Lee, D. G. (2005). Optimal design of the press fit joint for a hybrid aluminum/composite drive shaft. Composite Structures, 70(1), 33–47. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.08.010

Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The Basics. In S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (pp. 113-143). Springer.

Liew, G., Nishinohira, Y., Ikeda, M., Oshima, C., Matsui, H., & Nakayama, K. (2019). Rapid prototyping of a modular aeroponics system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 705, https://doi.org/012006. 10.1088/1757-899X/705/1/012006

Mahmoud, M. K., & Tantawi, S. H. (2004). Corrosive Effect of Different Media on PolyVinyl Chloride Pipes. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 43(4), 1265-1275. https://doi.org/10.1081/PPT-200030089

Mateus-Rodriguez, J. R., de Haan, S., Andrade-Piedra, J. L., Maldonado, L., Hareau, G., Barker, I., et al. (2013). Technical and Economic Analysis of Aeroponics and other Systems for Potato Mini-Tuber Production in Latin America. *American Journal of Potato Research,* 90(4), 357-368. https://doi.org/10.1007/s12230-013-9312-5

Min, A., Nguyen, N., Howatt, L., Tavares, M., & Seo, J. (2023). Aeroponic systems design: considerations and challenges. Journal of Agricultural Engineering, 54(1), 1387. https://doi.org/10.4081/jae.2022.1387

Nguyen, N. D., & Weiss, J. N. Factors influencing decision making in agricultural land preservation. *Journal of Food, Agriculture & Environment, 6*(2), 483–487.

Reyes-Lúa, A., Straus, J., Skjervold, V. T., Durakovic, G., & Nordtvedt, T. S. (2021). A Novel Concept for Sustainable Food Production Utilizing Low Temperature Industrial Surplus Heat. *Sustainability,* 13(17), 9786. https://doi.org/10.3390/su13179786

Shao, H., Xia, T., Wu, D., Chen, F., & Mi, G. (2018). Root growth and root system architecture of field-grown maize in response to high planting density. Plant and Soil, 430(1), 395–411. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3720-8

Silva, J. P. R. D., Schoeninger, V., Oliveira, F. C. D., Jordan, R. A., Siqueira, V. C., Martins, E. A. S., et al. (2019). Postharvest Quality of Yellow Pear Tomato Cultivated in Aquaponic System. *Journal of Agricultural Science,* 11(15), 227-235. https://doi.org/10.5539/jas.v11n15p227

Suárez-Cáceres, G. P., Fernández-Cabanás, V. M., Lobillo-Eguíbar, J., & Pérez-Urrestarazu, L. (2022). Characterisation of aquaponic producers and small-scale facilities in Spain and Latin America. *Aquaculture International,* 30(2), 517-532. https://doi.org/10.1007/s10499-021-00793-4

Vatcharadze, A. (2021). Innovative Technologies in Agriculture and Economic Challenges (On the Example of Aeroponics). Economic Profile, 16(1(21)), 82-91. https://doi.org/10.52244/ep.2021.21.08

Yazid, Y. (2021). The Effect of Biophilic on the Design of Smart Aquaponic Apartments in Surabaya. *Gestalt,* 3(2), 91-100. https://doi.org/10.33005/gestalt.v3i2.100