



การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
และลดต้นทุนในการเลี้ยงปลานิล
Application of Experimental Design to Improve Efficiency
and Reduce Costs in Tilapia Farming

วรพจน์ แซงบุญเรือง¹ สมควร สงวนแพง^{2*} และ อวยพร ต๊ะวัน³

Woraphod Saengbunrueang¹ Somkuan Sanguanpang^{2*} and Aouypron Thawan¹

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย จังหวัดเชียงราย

³คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย จังหวัดเชียงราย

¹Sri Songkhram Industrial Technology College, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom Province

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai, Chiang Rai Province

³Faculty of Business Administration and Liberal Arts,

Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai, Chiang Rai Province

*Corresponding Author: tongtanghero@rmutl.ac.th

Received: March 17, 2025

Revised: April 11, 2025

Accepted: April 21, 2025

บทคัดย่อ

การเลี้ยงปลานิลเป็นอุตสาหกรรมสำคัญของภาคเกษตรกรรมไทย แต่ยังคงเผชิญกับปัญหาด้านต้นทุนการผลิตที่สูงและความแปรปรวนของผลผลิต ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทาคุชิ (Taguchi Method) เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุน โดยพิจารณา 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน การทดลองดำเนินการในบ่อดินขนาด 150 ตารางเมตร เป็นเวลา 6 เดือน และเก็บข้อมูลน้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ด้วย One-way ANOVA และ S/N Ratio ผลการศึกษาพบว่า อาหารแบบผสมให้ผลการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยให้น้ำหนักเฉลี่ย 765.66 กรัมต่อตัว ขณะที่กลุ่มอาหารผลิตเองและอาหารสำเร็จรูปให้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า อีกทั้งการควบคุมจำนวนปลาไม่เกิน 750 ตัวต่อบ่อ และให้อาหารวันละ 3-4 ครั้ง ร่วมกับการเติมออกซิเจนด้วย Venturi Aerator ช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตสูงสุดร้อยละ 99.21 ขณะที่กลุ่มที่ใช้อาหารผลิตเองร่วมกับการเติมออกซิเจนด้วย Venturi Aerator ให้ต้นทุนอาหารต่ำสุดที่ 19.35 บาทต่อกิโลกรัม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า การจัดการพารามิเตอร์อย่างเหมาะสมเป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และส่งเสริมขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลานิลในประเทศไทย

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง วิธีทาคุชิ การเลี้ยงปลานิล การลดต้นทุน การเพิ่มผลผลิต



Abstract

Tilapia farming plays a crucial role in Thailand's agricultural sector; however, it still faces persistent challenges related to high production costs and inconsistent yields. This study aims to identify the key parameters affecting farming efficiency and employs the Taguchi experimental design method to determine optimal conditions for maximizing productivity and minimizing costs. Four critical factors were investigated: feed type, fish density per pond, feeding frequency, and aeration method. The experiment was conducted over six months in 150-square-meter earthen ponds, with data collected on average fish weight, survival rate, and feed cost per unit weight gain. Statistical analyses were performed using One-way ANOVA and the Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio). The results revealed that mixed feed-combining commercial and homemade components-promoted the highest growth rate, achieving an average fish weight of 765.66 g, outperforming both standalone commercial and homemade feeds. Additionally, a stocking density of no more than 750 fish per pond, feeding three to four times per day, and using a Venturi aerator led to the highest survival rate of 99.21%. Furthermore, the lowest feed cost at 19.35 THB/kg was achieved with homemade feed combined with Venturi aeration. These findings suggest that carefully managing input parameters-especially feed formulation, stocking density, feeding schedule, and aeration system-can meaningfully improve production, lower costs, and increase the overall competitiveness of tilapia aquaculture in Thailand.

Keywords: Experimental design, Taguchi method, Tilapia farming, Cost reduction, Productivity enhancement

1. บทนำ

ประเทศไทยกำลังก้าวสู่การพัฒนาภาคเกษตรกรรมตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ซึ่งมุ่งเน้นการยกระดับจากเกษตรแบบดั้งเดิม (Traditional farming) ไปสู่เกษตรสมัยใหม่ (Smart farming) โดยใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อเพิ่มผลผลิตลดต้นทุน และเพิ่มมูลค่าเกษตรกรรม (Ngamsin et al., 2024; Tab-eam et al., 2024) ในบริบทนี้ การเพาะเลี้ยงปลานิลนับเป็นภาคการผลิตที่มีศักยภาพสูง โดยเฉพาะในจังหวัดเชิงรวยซึ่งเป็นแหล่งผลิตสำคัญของภาคเหนือ (Faria & Mixon, 2016; Pashovska et al., 2024; Popova & Dolgova, 2016) อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลานิลยังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิตสูง อัตราการรอดต่ำ และการจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพ (Hernandez-Vidal, 2024; Rayos & Macaraeg, 2024) ซึ่งยังไม่มียานวิจัยใดที่สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์เหล่านี้อย่างเป็นระบบภายใต้สภาพแวดล้อมการเลี้ยงในประเทศไทย

การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi method) เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์ปัจจัยหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องดำเนินการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full factorial design) จึงช่วยลดทรัพยากร เวลา และค่าใช้จ่าย งานวิจัยในต่างประเทศได้ประยุกต์ใช้แนวทางนี้ในหลากหลายสาขา เช่น การพัฒนาอาหารสัตว์ (Vakili, 2023), การผลิตสารโรทินอยด์จากวัชพืคลือใช้ (Mata-Gómez et al., 2023) การควบคุมการเสื่อมสภาพของปลา (Awalistyaningrum et al., 2023) และการยืดอายุความสดของผลิตภัณฑ์ปลา (Qiu & Wu, 2021) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ในการสกัดคอลลาเจนจากปลา (Makgobole et al., 2024) การจัดการโรคพืช (Ritchie et al., 2025) และการผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากของเสียจากปลา (Munang et al., 2024) เป็นต้น



ด้านการให้อาหารปลาและโภชนาการ มีงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางการจัดการที่เหมาะสม เช่น การเลือกสูตรอาหารให้สอดคล้องกับระบบการเลี้ยง (Davis & Hardy, 2022) การกำหนดความถี่ในการให้อาหารเพื่อเพิ่มผลผลิตและผลตอบแทน (Hassan et al., 2021) และการใช้ระบบให้อาหารอัจฉริยะที่ปรับปริมาณอาหารตามพฤติกรรมการกินของปลา (Adegboye et al., 2020) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแหล่งอาหารที่มีคุณภาพทางโภชนาการสูงและต้นทุนต่ำ เช่น การใช้วัตถุดิบจากพืชทดแทนปลาป่น (Lall & Dumas, 2022) รวมถึงการศึกษาและพัฒนาแหล่งอาหารทางเลือกจากสาหร่าย โดย Safavi et al. (2021) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสาหร่าย *Picochlorum* sp. ในการผลิตสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งสามารถนำมาเป็นองค์ประกอบในสูตรอาหารสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Tharek et al. (2020) ใช้ Taguchi method ในการเพิ่มปริมาณแอสตาแซนธินในสาหร่าย *Coelastrum* sp. ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีมูลค่าและมีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพของปลา

นอกจากนี้ Chary et al. (2022) ได้เสนอแบบจำลองระดับฟาร์ม (FSMs) สำหรับประเมินความยั่งยืนของฟาร์มในด้านพลังงาน สารอาหาร และการจัดการผลพลอยได้ ส่วน Araujo et al. (2022) ศึกษาการเพิ่มอัตราการรอดในระยะตัวอ่อนของปลาโดยเน้นเทคนิคการเพาะเลี้ยงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ Arici et al. (2025) เสนอการใช้ระบบ Venturi Aerator ซึ่งช่วยกระจายออกซิเจนอย่างมีประสิทธิภาพด้วยพลังงานต่ำเหมาะกับฟาร์มเชิงพาณิชย์ที่ต้องการลดต้นทุนพลังงาน

จากการรวบรวมและเปรียบเทียบผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยก่อนหน้าดัง Table 1. Summary of Key Parameters and Outcomes in Related Research Studies ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการประยุกต์ใช้ Taguchi method และวิธีการที่เกี่ยวข้องในหลากหลายสาขา โดยเน้นการวิเคราะห์พารามิเตอร์สำคัญ อาทิ สูตรอาหาร ความถี่ในการให้อาหาร ระบบการเติมอากาศ หรือกระบวนการแปรรูป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ เช่น คุณภาพผลผลิต ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต หรือการลดต้นทุน ทั้งนี้ตารางดังกล่าวช่วยให้เห็นภาพรวมขององค์ความรู้ที่สอดคล้องกันในหลายมิติ และสนับสนุนความเหมาะสมของการนำ Taguchi method มาประยุกต์ใช้กับระบบการเลี้ยงปลานิลในประเทศไทยอย่างเป็นรูปธรรม

แม้งานวิจัยก่อนหน้านี้จะชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้ Taguchi method ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้านการเกษตรและการเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปแบบการทดลองภายใต้สภาวะควบคุม หรือมุ่งเน้นเพียงพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเท่านั้น อีกทั้งยังขาดการประยุกต์ใช้กับระบบเลี้ยงปลานิลจริงที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและการจัดการแบบเกษตรกรรายย่อยในประเทศไทย งานวิจัยในอดีตยังไม่เคยวิเคราะห์ผลกระทบร่วมกันของพารามิเตอร์หลักทั้ง 4 ต่อผลลัพธ์สำคัญ 3 ด้าน ได้แก่ น้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อย่างเป็นระบบภายใต้เงื่อนไขฟาร์มจริง ส่งผลให้ยังไม่สามารถระบุ "ชุดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด" ได้อย่างชัดเจนในเชิงเศรษฐศาสตร์และชีวภาพ อีกทั้งยังไม่มีแบบจำลองหรือแนวทางที่สอดคล้องกับปัจจัยท้องถิ่นที่สามารถนำไปใช้จริงได้ในวงกว้าง

ข้อเสนอของงานวิจัยนี้อยู่ที่การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเลี้ยงปลานิลในบริบทฟาร์มจริง ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ โดยมีวัตถุประสงค์ในการค้นหาวิธีการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการเลี้ยงปลานิล ซึ่งสามารถระบุค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบร่วมกันของพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ ชนิดของอาหาร ความหนาแน่นของปลา ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ต่อผลลัพธ์ 3 ด้าน คือ น้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอด และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้สามารถวางแผนการผลิตได้อย่างแม่นยำในบริบทที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร อีกทั้งยังใช้โครงสร้างการทดลองแบบ Orthogonal Array L27 ที่ช่วยลดจำนวนชุดการทดลองลงได้อย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ลดความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการตัดสินใจของเกษตรกรเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะในกลุ่มเกษตรกรรายย่อย



นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังมีความสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ ได้แก่ SDG 8 ที่มุ่งส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจและการจ้างงานที่มีคุณค่า SDG 9 ที่ส่งเสริมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมในภาคอุตสาหกรรม และ SDG 12 ที่เน้นการผลิตและการบริโภคอย่างยั่งยืน ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของงานวิจัยนี้ในการเชื่อมโยงระหว่างความเข้มแข็งเชิงวิชาการกับประโยชน์ใช้สอยในระดับปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Table 1. Summary of key parameters and outcomes in related research studies

No.	Author(s) (Year)	Investigated Parameters	Methodology	Key Findings
1	Vakili (2023)	Production rate, particle size, temperature	Taguchi Method	Improved pellet quality in poultry feed production
2	Mata-Gómez et al. (2023)	Agricultural waste types	Taguchi Method	Increased carotenoid yield, reduced process costs
3	Arici et al. (2025)	Aeration system configurations	GRA with Taguchi	Enhanced oxygen distribution, minimized energy consumption
4	Awalistyaningrum et al. (2023)	Preservation techniques for fish	Taguchi Method	Extended shelf life, reduced spoilage
5	Makgobole et al. (2024)	Buffer concentration, pH, extraction time	Taguchi DOE	Optimized collagen extraction, reduced waste
6	Qiu & Wu (2021)	Salt level, temperature, duration	Taguchi DOE	Controlled oxidation, maintained product quality
7	Hassan et al. (2021)	Feeding frequency	Field experiment	Enhanced growth rate and survival in sea bass
8	Safavi et al. (2021)	Culture media composition	Taguchi Method	Improved antioxidant yield in <i>Picochlorum</i> sp. algae

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเลี้ยงปลานิล ซึ่งประกอบด้วย ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่เกษตรกรต้องตัดสินใจในกระบวนการเลี้ยงปลาและมีผลต่อทั้งอัตราการรอดของปลา น้ำหนักเฉลี่ย และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงใช้การออกแบบการทดลองแบบ ทากูชิ (Taguchi method) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละปัจจัยอย่างเป็นระบบ โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบในระดับเต็มรูปแบบ (Full factorial design) ซึ่งช่วยประหยัดทรัพยากรและเวลาในการทดลอง

เพื่อตอบวัตถุประสงค์ของการวิจัย ได้มีการออกแบบการทดลองในบ่อดินขนาด 150 ตารางเมตร (กว้าง 10 เมตร ยาว 15 เมตร) โดยร่วมกับเกษตรกรในอำเภอฟาน จังหวัดเชียงราย จำนวน 9 ราย แต่ละรายมีบ่อดินทดลอง 3 บ่อ รวมทั้งหมด 27 บ่อ โดยควบคุมระดับน้ำให้อยู่ที่ 1.5 เมตร ตลอดระยะเวลา 6 เดือน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่



มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของปลานิล โดยทุกบ่อเริ่มต้นการเลี้ยงด้วยลูกปลานิลที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 0.15 ± 0.22 กรัม (Kamonrat, 2017) การตั้งค่าน้ำหนักของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ด้าน ได้รับการกำหนดตามข้อมูลและแนวปฏิบัติที่เกษตรกรต้องดำเนินการทดลองใช้จริง เพื่อให้ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับบริบทเชิงปฏิบัติและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

รายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงใน Table 2. โดยผู้วิจัยได้นำปัจจัยที่มีความสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังที่ปรากฏในผลงานของ Vakili (2023), Mata-Gómez et al. (2023) และ Hassan et al. (2021) ที่ใช้ปัจจัยคล้ายกันในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้ได้กำหนดระดับของพารามิเตอร์แต่ละตัวไว้ตามที่แสดงใน Table 2.

2.1.1 การกำหนดชนิดของอาหาร (Type of feed)

ชนิดของอาหารที่ใช้ในการทดลองตามแนวทางที่เกษตรกรนิยมใช้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) อาหารสำเร็จรูป (Commercial feed) คือ อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด 2) อาหารแบบผลิตใช้เอง (Homemade feed) คือ อาหารเม็ดที่เกษตรกรผลิตเอง โดยมีส่วนประกอบหลัก เช่น รำข้าว กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว ปลาป่น กากมันสำปะหลัง และแร่ธาตุเสริม และ 3) อาหารแบบผสม (Mixed feed) อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ผสมกับอาหารเม็ดที่เกษตรกรผลิตเองในอัตราส่วนที่เท่ากัน

2.1.2 จำนวนปลาต่อบ่อ (Number of fish per pond)

เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของปลาต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ได้กำหนดจำนวนปลาต่อบ่อเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 500 ตัว 750 ตัว และ 1,000 ตัว ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของเกษตรกรผู้เลี้ยงปลาในอำเภอบางจังหวัดเชียงราย ที่ระบุว่าความหนาแน่นที่เหมาะสมของปลานิลในบ่อดินอยู่ที่ 3–10 ตัวต่อตารางเมตร โดยบ่อปลาทดลองสามารถรองรับจำนวนปลาได้ตั้งแต่ 450–1,500 ตัว

2.1.3 ความถี่ในการให้อาหาร (Feeding frequency (times per day))

ปลานิลสามารถย่อยอาหารได้ภายใน 2–4 ชั่วโมงหลังการกิน ดังนั้นควรเว้นระยะเวลาระหว่างมื้ออาหารเพื่อให้ปลาย่อยอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kamonrat, 2017) ในการทดลองนี้ได้กำหนดความถี่ในการให้อาหารเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) จำนวน 2 ครั้งต่อวัน เวลา 08:00 น. และ 16:00 น., 2) จำนวน 3 ครั้งต่อวัน เวลา 08:00 น. 13:00 น. และ 18:00 น. และ 3) จำนวน 4 ครั้งต่อวัน เวลา 06:00 น., 10:00 น., 14:00 น., และ 18:00 น.

2.1.4 วิธีการเติมออกซิเจน (Aeration method)

การเติมออกซิเจนในบ่อเลี้ยงเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการรอด น้ำหนักปลา และคุณภาพน้ำโดยออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตและกระบวนการเผาผลาญอาหารของปลา หากระดับออกซิเจนต่ำ อาจส่งผลให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตลดลง เกิดความเครียด และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิต ดังนั้นในการทดลองนี้ได้กำหนดวิธีการเติมออกซิเจนเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) No Aeration คือ ไม่ใช้เครื่องเติมอากาศ โดยพึ่งพาการแพร่กระจายออกซิเจนจากผิวน้ำตามธรรมชาติ 2) Venturi Aerator คือ ใช้แรงดันน้ำดึงอากาศเข้าสู่บ่อเป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำแต่สามารถเพิ่มค่า DO ได้ดี และ 3) Paddle Wheel Aerator คือ เครื่องเติมอากาศแบบใบพัดน้ำที่ช่วยกระจายออกซิเจนทั่วทั้งบ่อเหมาะสำหรับการเลี้ยงที่มีความหนาแน่นสูง

2.2 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและลดความแปรปรวนของพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยใช้ Orthogonal Array (OA) หรือ ตารางเชิงตั้งฉาก ซึ่งช่วยลดจำนวนการทดลองที่ต้องดำเนินการ ขณะที่ยังคงสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวได้อย่างครบถ้วน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเลี้ยงปลานิล โดยกำหนด 4 พารามิเตอร์



และ 3 ระดับ ตาม Table 2. ซึ่งประกอบด้วยชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน เพื่อให้สามารถศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้ต่ออัตราการรอด และการเจริญเติบโตของปลาได้อย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Orthogonal Array L27 (3^4) ซึ่งช่วยลดจำนวนการทดลองจาก 81 กรณี ($3^4 = 81$) ให้เหลือเพียง 27 กรณี แต่ยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง จะดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) เพื่อประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ต่อตัวแปรตาม ได้แก่ น้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักปลา โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ใช้ตรวจสอบนัยสำคัญทางสถิติของแต่ละพารามิเตอร์ผ่านค่า p-value ขณะที่ S/N Ratio ใช้ระบุค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดตาม Table 2. โดยใช้เกณฑ์ของผลตอบสนองทั้ง 3 ตัว คือ น้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต โดยใช้เกณฑ์คือ ยิ่งมีค่าสูงยิ่งดี (Larger-the-Better) และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เกณฑ์คือ ยิ่งต่ำยิ่งดี (Smaller-the-Better) ดังนั้นในการวิเคราะห์ใช้โปรแกรม Minitab สำหรับกำหนดเกณฑ์การประเมินแบบ S/N Ratio ให้สอดคล้องกับลักษณะของแต่ละตัวแปร เพื่อให้การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพสามารถทำได้ถูกต้อง และเพื่อให้ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีช่วยระบุพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเพิ่มผลผลิตและปรับปรุงประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลอย่างเป็น

Table 2. Primary experimental parameters and factors

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Type of feed	Commercial Feed	Homemade Feed	Mixed Feed
Number of fish per pond	500 fish	750 fish	1000 fish
Feeding frequency (times per day)	2 times	3 times	4 times
Aeration method	No Aeration	Venturi Aerator	Paddle Wheel Aerator

2.3 การกำหนดสมมติฐาน (Hypothesis Testing) สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการศึกษานี้ได้กำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) จำนวน 3 ตัว ได้แก่ 1) น้ำหนักปลาเฉลี่ย (Average fish weight; g/fish) ซึ่งสะท้อนประสิทธิภาพการเจริญเติบโต 2) อัตราการรอดชีวิต (Survival rate; %) ที่แสดงถึงความแข็งแรงของปลาในสภาพจริง และ 3) ต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Feed cost per weight gain; THB/kg) ซึ่งสะท้อนความคุ้มค่าทางต้นทุน ทั้งสามตัวแปรได้จากการทบทวนวรรณกรรมและสอดคล้องกับเป้าหมายของเกษตรกร โดยสะท้อนผลลัพธ์ในมิติชีวภาพและเศรษฐศาสตร์ น้ำหนักปลาเฉลี่ย บ่งชี้การเปลี่ยนอาหารเป็นมวลชีวภาพ อัตราการรอดชีวิตบ่งชี้ความเหมาะสมของระบบการเลี้ยง ส่วนต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักเป็นตัววัดประสิทธิผลด้านเศรษฐกิจ ตัวแปรเหล่านี้ไม่เพียงเป็นค่าทางสถิติ แต่ยังสามารถนำไปใช้ตัดสินใจเชิงปฏิบัติ และรองรับการวิเคราะห์แบบหลายเป้าหมาย (Multi-objective) เพื่อกำหนดสถานะที่ได้ผลผลิตสูง คงอัตราการรอด และควบคุมต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้มีการกำหนดสมมติฐานทางสถิติเพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาทดลอง ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน เป็นตัวแปรต้น (Independent variables) มีผลต่อผลตอบสนองหรือไม่ โดยพิจารณาตัวแปรตาม (Dependent variables) ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การวิเคราะห์จะช่วยให้สามารถระบุได้ว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อผลผลิตและต้นทุนของการเลี้ยงปลานิลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่



ดังนั้นสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis; H_0) จึงถูกกำหนดให้ตัวแปรต้นไม่มีผลต่อตัวแปรตาม ขณะที่สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis; H_1) ระบุว่าตัวแปรต้นมีผลกระทบต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ค่า p -value ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) หากค่า p -value ≤ 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายความว่า พารามิเตอร์ที่ศึกษามีผลกระทบต่อค่าตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 95% แต่หากค่า p -value > 0.05 จะยอมรับ H_0 ซึ่งหมายความว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่มีผลต่อค่าตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ

2.4 การเตรียมการทดลอง

เพื่อให้การทดลองมีความแม่นยำและลดความแปรปรวนจากพารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ได้ วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยกำหนดให้เกษตรกรแต่ละรายเลี้ยงปลานิลในบ่อทดลอง 3 บ่อ ซึ่งแต่ละบ่อได้รับการสุ่มจัดสรรชนิดอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ตามหลัก Orthogonal Array (OA) การจัดสรรบ่อทดลองช่วยลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความถูกต้องของการวิเคราะห์ โดยบางบ่อได้รับการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบางพารามิเตอร์ขณะที่พารามิเตอร์อื่นถูกควบคุมให้คงที่ เพื่อให้สามารถศึกษาผลกระทบของแต่ละตัวแปรได้อย่างชัดเจน

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์และดำเนินการทดลองแล้ว ข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติ เช่นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) เพื่อประเมินผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ที่ศึกษา โดยมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลในด้านของอัตราการรอด น้ำหนักเฉลี่ยของปลา และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น รายละเอียดของผลการวิเคราะห์จะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป เพื่อสรุปแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลานิล

3. ผลการวิจัย

การศึกษานี้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิล โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ เพื่อระบุค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ข้อมูลถูกวิเคราะห์ใน 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อน้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอด และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักปลา โดยพิจารณาช่องทางหลัก ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน และ 2) การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมผ่าน ANOVA และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) เพื่อระบุค่าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการวิเคราะห์ช่วยกำหนดแนวทางจัดการฟาร์มปลานิล เพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิล

การศึกษานี้ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ในการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิล โดยพิจารณา 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อน้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอด ชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังแสดงใน Table 3.



Table 3. Experimental results of factors affecting tilapia farming efficiency

Type of Feed	Number of Fish per Pond	Feeding Frequency	Aeration Method	Avg. Fish Weight (g/fish)	Survival Rate (%)	Feed Cost per Weight Gain (THB/kg)
Commercial	500	2	No Aeration	704.97	87.75	46.03
	500	2	No Aeration	698.62	85.8	45.93
	500	2	No Aeration	706.48	86.42	44.16
	750	3	Venturi Aeration	740.73	84.1	35.19
	750	3	Venturi Aeration	723.16	89	35.83
	750	3	Venturi Aeration	723.16	85.27	36.48
	1000	4	Paddle Wheel	721.79	73.98	28.52
	1000	4	Paddle Wheel	713.67	77.75	28.81
	1000	4	Paddle Wheel	701.31	73.66	27.89
Homemade	500	3	Paddle Wheel	738.43	94.72	34.8
	500	3	Paddle Wheel	728.37	90.38	36.81
	500	3	Paddle Wheel	728.34	91.64	37.36
	750	4	No Aeration	700.92	80.99	29.43
	750	4	No Aeration	679.37	82.08	30.5
	750	4	No Aeration	681.25	80.94	29.86
	1000	2	Venturi Aeration	694.38	73.27	19.35
	1000	2	Venturi Aeration	689.87	72.9	20.36
	1000	2	Venturi Aeration	703.14	70.54	21.54
Mixed	500	4	Venturi Aeration	741.92	95.66	37.96
	500	4	Venturi Aeration	736.88	96.18	39.56
	500	4	Venturi Aeration	765.66	99.21	35.38
	750	2	Paddle Wheel	705.24	83.19	32.32
	750	2	Paddle Wheel	708.18	78.97	31.59
	750	2	Paddle Wheel	693.25	83.15	31.2
	1000	3	No Aeration	667.56	68.03	25.09
	1000	3	No Aeration	674.11	67.45	23.01
	1000	3	No Aeration	661.49	70.02	24.78

3.1.1 น้ำหนักปลาเฉลี่ย (Average fish weight)

น้ำหนักปลาเฉลี่ยได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน พบว่า กลุ่มที่ใช้อาหารแบบผสม จำนวนปลา 500 ตัวต่อบ่อ ให้อาหารวันละ 4 ครั้ง และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi Aerator ให้น้ำหนักปลาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 661.49 ถึง 765.66 กรัมต่อตัว ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 765.66 กรัมต่อตัว ในขณะที่กลุ่มที่ใช้ อาหารแบบผสม จำนวนปลา 1000 ตัวต่อบ่อ ให้อาหารวันละ 3 ครั้ง และไม่มีการเติมออกซิเจน (No aeration) ให้น้ำหนักปลาดำต่ำสุดที่ 661.49 กรัมต่อตัว ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบของความหนาแน่นของปลาและปริมาณออกซิเจนต่อการเจริญเติบโต



โดยอาหารแบบผสมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากมีสารอาหารครบถ้วน ขณะที่อาหารแบบผลิตเอง แม้มีต้นทุนต่ำกว่าแต่ให้การเติบโตที่ต่ำกว่า การเพิ่มจำนวนปลาในบ่อทำให้เกิดการแย่งอาหารและออกซิเจนสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักเฉลี่ยลดลง โดยปลา 500 ตัวต่อบ่อให้ค่าที่ดีกว่าปลา 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 4 ครั้งช่วยเพิ่มอัตราการเติบโตได้ดีที่สุด เนื่องจากตอบสนองการเผาผลาญของปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนการเติมออกซิเจนมีผลอย่างชัดเจน โดยการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกระจายออกซิเจน ส่งผลให้ปลาเติบโตได้ดีขึ้น ในขณะที่กลุ่มที่ไม่มีการเติมออกซิเจนให้น้ำหนักต่ำที่สุด สะท้อนถึงข้อจำกัดของระดับออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเพิ่มน้ำหนักปลาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ การใช้อาหารแบบผสม จำนวนปลาไม่ให้เกิน 750 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 4 ครั้ง และเติมออกซิเจนด้วย Venturi Aerator

3.1.2 อัตราการรอดชีวิต (Survival rate)

พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่ออัตราการรอดชีวิต ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน พบว่า อัตราการรอดชีวิตอยู่ในช่วงร้อยละ 67.45 ถึง 99.21 โดยกลุ่มที่ใช้อาหารผสม จำนวนปลา 500 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 4 ครั้งต่อวัน และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator มีอัตราการรอดสูงสุดที่ร้อยละ 99.21 ขณะที่กลุ่มที่ใช้อาหารผสม จำนวนปลา 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 3 ครั้งต่อวัน และไม่มีการเติมอากาศ มีอัตราการรอดต่ำสุดที่ร้อยละ 67.45 สะท้อนให้เห็นว่าความหนาแน่นของปลาและระดับออกซิเจนมีผลต่อการดำรงชีวิตโดยตรง

อาหารผสมช่วยให้ปลามีอัตราการรอดที่สูงขึ้น เนื่องจากให้สารอาหารครบถ้วนมากกว่าอาหารที่ผลิตเอง ขณะที่การเพิ่มจำนวนปลาต่อบ่อทำให้เกิดการแย่งกันอาหารและออกซิเจนสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการรอดลดลง ซึ่งพบว่าบ่อที่มี 500 ตัวต่อบ่อให้อัตราการรอดที่ดีกว่าบ่อที่มี 1,000 ตัวต่อบ่อ ในขณะที่การให้อาหาร 4 ครั้งต่อวัน ช่วยลดการแย่งอาหารและเพิ่มอัตราการรอดได้ดีกว่าการให้อาหาร 2 หรือ 3 ครั้งต่อวัน

นอกจากนี้การเติมออกซิเจนมีผลอย่างชัดเจน โดยการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator สามารถช่วยเพิ่มการกระจายออกซิเจนในบ่อได้ดีกว่าระบบอื่น ส่งผลให้อัตราการรอดสูงขึ้น ขณะที่กลุ่มที่ไม่มีการเติมอากาศให้อัตราการรอดต่ำที่สุด แสดงถึงข้อจำกัดของระดับออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่ออัตราการรอดชีวิตที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ การใช้อาหารผสม ควบคุมจำนวนปลาไม่ให้เกิน 750 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 4 ครั้งต่อวัน และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ซึ่งช่วยลดความเครียดของปลา เพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ และลดอัตราการสูญเสียในกระบวนการเลี้ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.3 ต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Feed cost per weight gain)

ต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน โดยพบว่าต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 19.35 ถึง 46.03 บาทต่อกิโลกรัม โดยกลุ่มที่ใช้ อาหารแบบผลิตเอง จำนวนปลา 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator มีต้นทุนต่ำสุดที่ 19.35 บาทต่อกิโลกรัม ขณะที่กลุ่มที่ใช้ อาหารสำเร็จรูป จำนวนปลา 500 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน และไม่มีการเติมอากาศ มีต้นทุนสูงสุดที่ 46.03 บาทต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าการเลือกอาหารที่เหมาะสมและการจัดการที่มีประสิทธิภาพช่วยลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ

อาหารแบบผลิตเองมีต้นทุนต่ำสุด เนื่องจากใช้วัตถุดิบในท้องถิ่น เช่น ข้าว้าว กากถั่วเหลือง กากมะพร้าวและปลาป่น ในขณะที่อาหารสำเร็จรูปแม้มีสารอาหารครบถ้วน แต่ให้ต้นทุนอาหารสูงกว่า การเพิ่มจำนวนปลาต่อบ่อเป็น 1,000 ตัวต่อบ่อ มีแนวโน้มลดต้นทุนอาหาร เนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากอาหารและลดอาหารเหลือทิ้ง ความถี่ในการให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน ให้ต้นทุนต่ำที่สุด เนื่องจากช่วยลดการสูญเสียอาหารในน้ำ และลดต้นทุนการจัดการเมื่อเทียบกับการให้อาหาร 4 ครั้งต่อวัน



ส่วนการเติมออกซิเจนมีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเติมออกซิเจนแบบ Venturi aerator และ Paddle wheel aerator ช่วยลดต้นทุนอาหาร เนื่องจากเพิ่มประสิทธิภาพการเผาผลาญอาหารของปลาและลดอัตราการสูญเสียอาหาร ขณะที่กลุ่มที่ไม่มีการเติมอากาศมีต้นทุนอาหารสูงที่สุด เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตต่ำลงและต้องใช้เวลาเลี้ยงนานขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ช่วยลดต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้ดีที่สุด คือ การให้อาหารแบบผลิตเอง จำนวนปลาอยู่ที่ 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักปลา ลดระยะเวลาเลี้ยง และช่วยให้กระบวนการเลี้ยงมีความคุ้มค่ามากที่สุด

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มน้ำหนักปลาเฉลี่ยและอัตราการรอดชีวิตสูงสุด ได้แก่ อาหารแบบผสม จำนวนปลา 500 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 4 ครั้ง และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ซึ่งให้ผลน้ำหนักเฉลี่ยของปลานิลสูงถึง 765.66 กรัมต่อตัว และอัตราการรอดชีวิตสูงสุดถึงร้อยละ 99.21 ความสำเร็จของชุดพารามิเตอร์นี้มาจากการที่อาหารแบบผสมสามารถให้สารอาหารที่หลากหลายและครบถ้วน ความหนาแน่นระดับ 500 ตัวต่อบ่อช่วยลดการแข่งขันในการกินอาหารและการใช้ออกซิเจน การให้อาหารวันละ 4 ครั้ง ช่วยให้ปลาดูดซึมสารอาหารได้อย่างต่อเนื่อง และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ส่งเสริมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

ในขณะที่พารามิเตอร์ที่ช่วยลดต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้ดีที่สุด ได้แก่ อาหารแบบผลิตเอง จำนวนปลา 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 2 ครั้ง และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ซึ่งให้ต้นทุนต่ำสุดอยู่ที่ 19.35 บาทต่อกิโลกรัม โดยกลุ่มนี้สามารถลดต้นทุนจากการใช้วัตถุดิบอาหารที่ทำได้ในท้องถิ่น ความหนาแน่นที่สูงขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่และอาหาร การให้อาหารเพียงวันละ 2 ครั้งช่วยลดการสูญเสีย และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและการเผาผลาญอาหาร

จาก Table 3. สามารถสรุปได้ว่า การจัดการพารามิเตอร์อย่างเหมาะสมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการเลี้ยงปลานิล ทั้งในมิติชีวภาพและเศรษฐศาสตร์ โดยการใช้ชุดพารามิเตอร์ควรขึ้นอยู่กับเป้าหมายของเกษตรกรว่าจะเน้นที่การเพิ่มผลผลิตหรือการลดต้นทุน เพื่อให้สามารถบริหารจัดการการเลี้ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

3.2.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (Figure 1.) พารามิเตอร์ทั้ง 4 ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน มีอิทธิพลต่อน้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value = 0.000, α = 0.05) ส่งผลให้สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลกระทบต่อผลผลิตของการเลี้ยงปลานิล โดยค่าทางสถิติ R-Sq เท่ากับร้อยละ 99.74 และ R-Sq (adj) เท่ากับร้อยละ 99.74 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าจำนวนปลาต่อบ่อและวิธีการเติมออกซิเจนเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุด โดยการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นสูงเกินไปทำให้การแย่งอาหารและออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักปลาเฉลี่ยและอัตราการรอดลดลง ขณะที่การเติมออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพ เช่น การเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator มีส่วนช่วยเพิ่มอัตราการรอดและส่งเสริมการเจริญเติบโตของปลา จากผลการทดลองแนวทางที่ให้ผลผลิตดีที่สุด คือ การให้อาหารแบบผสม ควบคุมจำนวนปลาไม่เกิน 750 ตัวต่อบ่อ ให้อาหารวันละ 4 ครั้ง และเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ช่วยเพิ่มผลผลิตสูงสุด ลดต้นทุน และเพิ่มอัตราการรอดของปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่าวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ จะสามารถบ่งชี้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้จากค่าเฉลี่ยและค่า S/N Ratio แต่ไม่สามารถระบุค่าความมีนัยสำคัญทางสถิติได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ One-way ANOVA ควบคู่กันเพื่อพิจารณาค่า p -value ในการวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้วิธีการออกแบบ



การทดลองทางสถิติ มีข้อดี คือ ลดจำนวนการทดลองจาก 81 กรณีใน Full factorial design เหลือเพียง 27 กรณีใน Orthogonal Array (L27) และยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลของแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจนและเป็นขั้นตอน

ในกรณีนี้การตรวจสอบความมีนัยสำคัญของแต่ละพารามิเตอร์พิจารณาจากค่า p -value ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ANOVA หาก p -value ≤ 0.05 หมายความว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบแทนของระบบการเลี้ยงปลานิล ใน Figure 1. ค่า p -value ของทั้งสี่พารามิเตอร์ (ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน) ล้วนมีค่า ≤ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละพารามิเตอร์มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของระบบการเลี้ยง ทั้งด้านน้ำหนักปลา อัตรารอด และต้นทุนอาหาร

One-way ANOVA: Avg. Fish Weight, Survival Rate (%), Feed Cost per Weight Gain (THB/kg)

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	7670022	3835011	15125.83	0.000
Error	78	19776	254		
Total	80	7689798			

S = 15.92 R-Sq = 99.74% R-Sq(adj) = 99.74%

Figure 1. One-way ANOVA results for fish farming efficiency analysis

รวมถึงการวิเคราะห์ที่ใช้ One-way ANOVA ซึ่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับในแต่ละพารามิเตอร์ เพื่อระบุว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่ โดยไม่สนใจปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ที่ออกแบบมาสำหรับการลดจำนวนการทดลอง แต่เมื่อนำ ANOVA มาประกอบการวิเคราะห์ จึงสามารถยืนยันความมีนัยสำคัญทางสถิติของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ตารางค่าผลตอบแทนเฉลี่ย (Response Table for Means)

ผลการวิเคราะห์ตารางค่าผลตอบแทนเฉลี่ย (Figure 2) พบว่า จำนวนปลาต่อบ่อ เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อผลเฉลี่ย (Delta = 23.7, Rank = 1) โดยเมื่อจำนวนปลาเพิ่มขึ้น น้ำหนักปลาเฉลี่ยลดลงจากการแย่งกันด้านอาหารและออกซิเจน รองลงมา คือ วิธีการเติมออกซิเจน (Delta = 14.2, Rank = 2) โดยการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ให้ผลเฉลี่ยสูงที่สุดเนื่องจากสามารถกระจายออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ความถี่ในการให้อาหารมีผลกระทบปานกลาง (Delta = 6.4, Rank = 3) โดยการให้อาหารถี่ขึ้นช่วยเพิ่มน้ำหนักปลาเล็กน้อยแต่ไม่ใช่ปัจจัยหลัก ส่วน ชนิดของอาหาร มีอิทธิพลน้อยที่สุด (Delta = 6.1, Rank = 4) แสดงว่าการใช้อาหารแบบผลิตเอง หรืออาหารแบบผสมสามารถช่วยลดต้นทุนโดยไม่กระทบการเติบโตของปลานิลอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มผลผลิต คือ การควบคุมจำนวนปลาต่อบ่อในระดับที่เหมาะสม ร่วมกับการเติมออกซิเจนแบบ Venturi aerator ขณะที่ความถี่ในการให้อาหารและชนิดของอาหารเป็นปัจจัยรองที่มีผลกระทบน้อยกว่า สามารถปรับใช้เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลได้

ในการวิเคราะห์ตารางค่าผลตอบแทนเฉลี่ย (Response table for means) จะใช้ชุดข้อมูลเดียวกันกับ Figure 1 แต่มีจุดประสงค์และวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดย Figure 2. มุ่งเน้นการเปรียบเทียบค่าผลเฉลี่ย (Mean comparison) และการจัดลำดับความสำคัญ (Rank) ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเลี้ยงปลานิล เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการวิเคราะห์



ดังนั้นเพื่อให้เห็นแนวโน้มของค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ตัว ได้แก่ น้ำหนักปลาเฉลี่ย (Average fish weight), อัตราการรอดชีวิต (Survival rate) และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Feed cost per weight gain) ภายใต้แต่ละระดับของพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้นำเสนอแผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ย (Mean Plot) ดังแสดงใน Figure 3. ซึ่งครอบคลุมพารามิเตอร์หลัก 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของอาหาร (Feed type), จำนวนปลาต่อบ่อ (Fish density), ความถี่ในการให้อาหาร (Feeding frequency) และวิธีการเติมออกซิเจน (Aeration method)

Response Table for Means

Level	Type of Feed	Number of Fish per Pond	Feeding Frequency	Aeration Method
1	278.0	286.5	271.1	266.0
2	271.9	273.9	274.6	280.2
3	273.2	262.8	277.4	276.9
Delta	6.1	23.7	6.4	14.2
Rank	4	1	3	2

Figure 2. Response Table for Means in Tilapia Farming Efficiency Analysis

*Note: Figure 2. illustrates mean comparisons based on S/N analysis and is complementary to the statistical significance results presented in Figure 1.

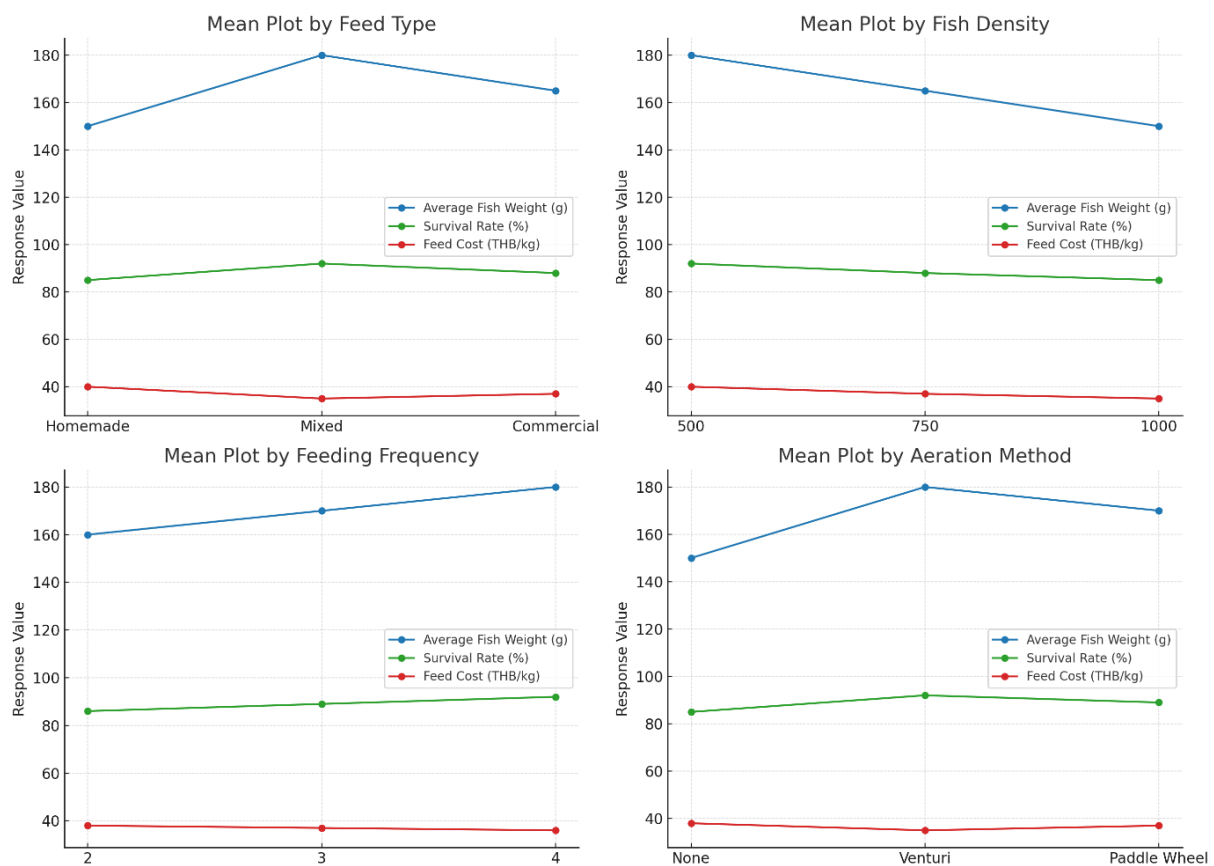


Figure 3. Mean plots of (a) Average Fish Weight, (b) Survival Rate, and (c) Feed Cost per Weight Gain across all experimental levels



จาก Figure 3. (a) พบว่าอาหารแบบผสมให้ผลตอบสนองดีที่สุด โดยมีน้ำหนักปลาเฉลี่ย (180 กรัมต่อตัว) อัตราการรอด (ร้อยละ 92) และต้นทุนอาหารต่ำสุด (35 บาทต่อกิโลกรัม) เมื่อเทียบกับอาหารผลิตเองและอาหารสำเร็จรูป แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมทั้งด้านชีวภาพและเศรษฐศาสตร์ ส่วน Figure 3. (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนปลาในบ่อ จาก 500 เป็น 1,000 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยและอัตราการรอดลดลง ขณะที่ต้นทุนอาหารต่อหน่วยลดลงเพียงเล็กน้อย สะท้อนถึงความสมดุลระหว่างผลผลิตรวมและประสิทธิภาพการผลิต โดยความหนาแน่นที่สูงเกินไปอาจกระทบต่อสุขภาพปลา

ใน Figure 3. (c) การให้อาหารบ่อยขึ้น โดยเฉพาะวันละ 4 ครั้ง ส่งผลให้น้ำหนักปลาและอัตราการสูงชันพร้อม ต้นทุนที่มีแนวโน้มลดลง แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความถี่ในการให้อาหารกับผลผลิต สุดท้าย Figure 3. (d) พบว่า Venturi aerator ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในด้านน้ำหนัก อัตราการรอด และต้นทุน ขณะที่การไม่เติมออกซิเจนให้ผลลัพธ์ต่ำสุดอย่างชัดเจน สะท้อนถึงบทบาทสำคัญของระบบเติมออกซิเจนในกระบวนการเลี้ยงปลานิล

โดยสรุปแผนภูมิตารางค่าผลตอบสนองเฉลี่ย (Response table for means) ทั้ง 4 รายการแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติจาก Figure 2. (Response table for means) และการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผลตอบสนอง (Signal-to-Noise Ratios (S/N Ratios)) แสดงในหัวข้อ 3.2.4 ซึ่งสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลได้อย่างเป็นระบบ

3.2.3 ผลการวิเคราะห์ตารางค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนอง (Response table for standard deviations)

ผลการวิเคราะห์ตารางค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนอง (Figure 4.) พบว่า วิธีการเติมออกซิเจนเป็น พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความแปรปรวนของผลผลิตมากที่สุด (Delta = 18.2, Rank = 1) โดยการไม่เติมออกซิเจนทำให้ปลาเติบโต ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากระดับออกซิเจนในน้ำต่ำ ส่งผลให้อัตราการเติบโตของปลาแตกต่างกันในแต่ละส่วนของ บ่อรองลงมา จำนวนปลาต่อบ่อ (Delta = 9.2, Rank = 2) โดยค่าความแปรปรวนลดลงเมื่อจำนวนปลาเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของอาหารและพื้นที่อยู่อาศัยที่มีความเหมาะสมมากขึ้น ความถี่ในการให้อาหาร มีผลกระทบระดับปานกลาง (Delta = 6.9, Rank = 3) โดยการให้อาหารบ่อยขึ้นอาจทำให้เกิดการกระจายอาหารที่ไม่สม่ำเสมอ และชนิดของอาหาร มีผลต่อ ความแปรปรวนน้อยที่สุด (Delta = 2.9, Rank = 4) แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดอาหารไม่มีผลต่อความสม่ำเสมอของผลผลิต อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากผลการทดลอง พบว่าการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ให้ผลเฉลี่ยของค่าผลตอบสนองสูง ที่สุด (280.2) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการกระจายออกซิเจนที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของปลาได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับ การเติมออกซิเจนด้วย Paddle wheel aerator (276.9) และ ไม่เติมออกซิเจน (266.0) แม้ว่าค่าความแปรปรวนของการเติม ออกซิเจนด้วย Venturi aerator อาจสูงกว่าบางวิธี แต่ด้วยระดับค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุด จึงแสดงให้เห็นว่าการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator มีศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตได้อย่างชัดเจน ดังนั้นแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมทั้งค่าเฉลี่ยและ ความสม่ำเสมอของผลผลิต คือ การเลือกระบบเติมออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพสูง เช่นการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ร่วมกับการกำหนดจำนวนปลาต่อบ่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมมากกว่าการเปลี่ยนชนิดของอาหารหรือความถี่ในการให้อาหาร เพื่อเสริมความสม่ำเสมอของกระบวนการเลี้ยง และลดความแปรปรวนของผลผลิตให้ได้มากที่สุด



Response Table for Means

Level	Type of Feed	Number of Fish per Pond	Feeding Frequency	Aeration Method
1	278.0	286.5	271.1	266.0
2	271.9	273.9	274.6	280.2
3	273.2	262.8	277.4	276.9
Delta	6.1	23.7	6.4	14.2
Rank	4	1	3	2

Figure 4. Response table for means in tilapia farming efficiency analysis

3.2.4 ผลการวิเคราะห์ตารางอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผลตอบสนอง (Response table for Signal-to-Noise ratios)

ผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ (Figure 5.) พบว่า จำนวนปลาต่อบ่อ เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของผลผลิตมากที่สุด (Delta = 0.510, Rank = 1) โดยเมื่อจำนวนปลาต่อบ่อเพิ่มขึ้น ค่า S/N Ratios (Signal-to-Noise Ratios) ลดลงอย่างชัดเจน สะท้อนถึงความแปรปรวนของผลผลิตที่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากการแย่งอาหารและออกซิเจน รองลงมา คือ ชนิดของอาหาร (Delta = 0.126, Rank = 2) โดยอาหารสำเร็จรูปให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอาหารแบบผลิตเอง หรือ อาหารแบบผสม เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของสารอาหาร ส่วนวิธีการเติมออกซิเจน (Delta = 0.038, Rank = 3) พบว่า การเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ช่วยลดความแปรปรวนของผลผลิตได้ดีที่สุด ขณะที่ความถี่ในการให้อาหาร มีผลน้อยที่สุด (Delta = 0.019, Rank = 4) แสดงว่าการให้อาหารวันละ 2 3 หรือ 4 ครั้ง ไม่ได้ช่วยลดความแปรปรวนของการเลี้ยงปลาอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ คือ จำนวนปลาต่อบ่อ รองลงมา คือ ชนิดของอาหารและวิธีการเติมออกซิเจน ขณะที่ความถี่ในการให้อาหารมีผลกระทบน้อยที่สุด โดยการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator และการควบคุมจำนวนปลาในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยลดความแปรปรวนของการเลี้ยงปลานิล และทำให้ผลลัพธ์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

Response Table for Signal to Noise Ratios
Nominal is best ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

Level	Type of Feed	Number of Fish per Pond	Feeding Frequency	Aeration Method
1	-1.443	-1.273	-1.518	-1.492
2	-1.569	-1.485	-1.521	-1.530
3	-1.528	-1.782	-1.502	-1.518
Delta	0.126	0.510	0.019	0.038
Rank	2	1	4	3

Figure 5. Response Table for Signal-to-Noise Ratios

3.2.5 การวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยแผนภูมิช่วงความเชื่อมั่น (Interval plot)

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของชนิดอาหารต่อค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ตัว ได้แก่ น้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้นำเสนอแผนภูมิช่วงความเชื่อมั่น (Interval Plot)

ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของผลตอบแทนแต่ละตัว พร้อมช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (95% Confidence Interval) สำหรับแต่ละกลุ่มอาหารดังแสดงใน Figure 6.

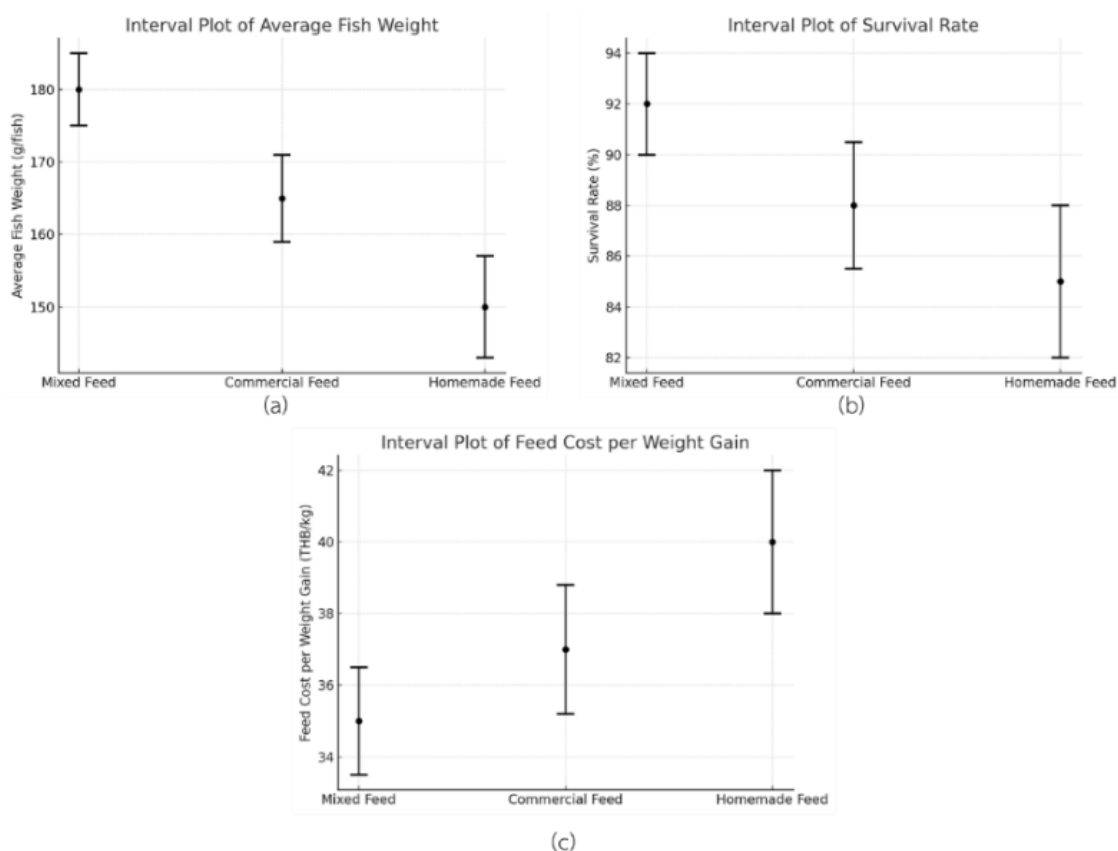


Figure 6. Interval plots of growth, survival, and feed cost by feed type

จาก Figure 6. (a) พบว่าอาหารแบบผสมให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักปลาสูงสุด (180 กรัมต่อตัว) พร้อมช่วงความเชื่อมั่นที่แคบที่สุด สะท้อนผลลัพธ์ที่มั่นคงและสม่ำเสมอ อีกทั้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากอาหารแบบผลิตเองที่ให้ค่าเฉลี่ยต่ำสุด (150 กรัมต่อตัว) ส่วน Figure 6. (b) แสดงว่าอาหารแบบผสมยังให้อัตรารอดเฉลี่ยสูงสุด (ร้อยละ 92) แม้จะมีช่วงทับซ้อนของความเชื่อมั่นกับอาหารแบบอื่น แต่แนวโน้มบ่งชี้ถึงการเจริญเติบโตและสุขภาพที่ดีกว่า ขณะที่ Figure 6. (c) แสดงว่าอาหารแบบผสมมีต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักต่ำสุด (35 บาทบาทต่อกิโลกรัม) ในขณะที่อาหารผลิตเองมีต้นทุนสูงสุด (40 บาทต่อกิโลกรัม) แม้วัตถุดิบจะถูกกว่า แต่การเปลี่ยนน้ำหนักได้ไม่ดี ทำให้ค่าใช้จ่ายต่อผลผลิตสูงขึ้นโดยรวม

แผนภูมิทั้ง 3 ใน Figure 6. (a)–(c) จึงยืนยันว่าอาหารแบบผสมให้ผลตอบแทนที่ดีที่สุด ทั้งด้านการเจริญเติบโต อัตรารอด และความคุ้มค่าทางต้นทุน สอดคล้องกับการวิเคราะห์ S/N Ratio และค่าเฉลี่ยก่อนหน้า ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ใช้วิธี Multi-objective optimization โดยพิจารณาเกณฑ์ ยิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better) สำหรับน้ำหนักและอัตรารอด และ ยิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) สำหรับต้นทุน จากนั้นพิจารณาค่าเฉลี่ย S/N Ratio และจัดลำดับความเหมาะสมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักเท่าเทียม (Equal weighting) ผลลัพธ์พบว่า ชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ อาหารแบบผสม จำนวนปลา 500 ตัวต่อบ่อ ให้อาหารวันละ 4 ครั้ง และเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งด้านชีวภาพและเศรษฐศาสตร์ โดยไม่ต้องเลือกเพียงด้านใดด้านหนึ่ง



4. อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลา ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลา ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และ วิธีการเติมออกซิเจน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อน้ำหนักปลาเฉลี่ย อัตราการรอดชีวิต และต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตของการเลี้ยงปลา (p -value = 0.000, α = 0.05) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Ngamsin et al., 2024; Pashovska et al., 2024; Rayos & Macaraeg, 2024)

4.1 อิทธิพลของชนิดอาหารต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอด

จากผลการทดลอง พบว่า อาหารแบบผสม ซึ่งประกอบด้วยอาหารสำเร็จรูป และอาหารแบบผลิตเอง ในอัตราส่วน 50:50 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดต่อน้ำหนักปลาเฉลี่ยและอัตราการรอด เนื่องจากมีสารอาหารที่สมดุล ทำให้ปลาสามารถดูดซึมสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ Vakili (2023) ที่พบว่า การปรับองค์ประกอบของอาหารด้วยวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอาหารสัตว์ได้ นอกจากนี้ Qiu & Wu (2021) ยังแสดงให้เห็นว่าการปรับสูตรอาหารสามารถเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อปลาที่ผ่านกระบวนการแปรรูป อย่างไรก็ตาม แม้ว่าอาหารแบบผลิตเองจะมีต้นทุนต่ำกว่า แต่หากไม่มีการปรับสูตรให้เหมาะสม อาจส่งผลให้สารอาหารที่ได้รับไม่ครบถ้วน และอาจทำให้ปลาเติบโตช้ากว่าอาหารสำเร็จรูป (Faria and Mixon, 2016; Mata-Gómez et al., 2023)

4.2 ผลของจำนวนปลาต่อบ่อต่อประสิทธิภาพการเลี้ยง

การเพิ่มจำนวนปลาต่อบ่อจาก 500 ตัวเป็น 1,000 ตัว มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของปลาลดลง ซึ่งเกิดจากการแย่งกันด้านอาหารและออกซิเจนภายในบ่อ ส่งผลให้ปลามีภาวะเครียดและการเผาผลาญอาหารลดลง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Chary et al. (2022) ที่พบว่า การควบคุมความหนาแน่นของปลาในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและลดการสูญเสียในกระบวนการเลี้ยง ทั้งนี้ผลการศึกษา พบว่าบ่อที่มีปลาความหนาแน่นต่ำกว่า 750 ตัวต่อบ่อให้ผลผลิตที่ดีกว่าในแง่ของน้ำหนักเฉลี่ยและอัตราการรอด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการเลี้ยงปลาให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3 ความถี่ในการให้อาหารและผลต่ออัตราการรอด

จากการทดลอง พบว่า การให้อาหาร 4 ครั้งต่อวัน ส่งผลให้ปลามีน้ำหนักเฉลี่ยและอัตราการรอดสูงขึ้น เนื่องจากปลามีระบบเผาผลาญอาหารที่เร็ว และต้องการพลังงานต่อเนื่องตลอดทั้งวัน อย่างไรก็ตามการให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน มีต้นทุนอาหารต่ำสุด ซึ่งแสดงถึงความสมดุลระหว่างการเจริญเติบโตและต้นทุนการผลิต ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ Davis & Hardy (2022) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเลือกความถี่ในการให้อาหารที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปลาโดยไม่กระทบต้นทุนมากเกินไป นอกจากนี้ Adegboye et al. (2020) ได้ศึกษาระบบการให้อาหารอัตโนมัติที่สามารถช่วยลดความแปรปรวนของการบริโภคอาหารในกลุ่มปลา ซึ่งสนับสนุนว่าการให้อาหารที่ขึ้นสามารถช่วยให้ปลาที่มีอัตราการเติบโตที่ดีขึ้น และลดการแย่งอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 ผลของวิธีการเติมออกซิเจนต่ออัตราการเจริญเติบโตของปลา

การเติมออกซิเจนด้วย Venturi Aerator มีผลทำให้ปลามีอัตราการรอดและน้ำหนักเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเติมอากาศ (No Aeration) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการที่ออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเผาผลาญอาหารของปลา ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ Arici et al. (2025) ที่ใช้ Gray Relational Analysis (GRA) และวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบเติมอากาศสำหรับ



การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยพบว่าการเติมอากาศที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและลดต้นทุนพลังงาน นอกจากนี้ยังพบว่า บ่อที่ไม่มีการเติมอากาศ (No aeration) มีแนวโน้มให้อัตราการรอดต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการขาดออกซิเจนที่เพียงพอต่อกระบวนการเจริญเติบโตของปลา

4.5 ต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Feed Cost per Weight Gain)

จากการทดลอง พบว่า อาหารแบบผลิตเอง ช่วยลดต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่า ปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารชนิดนี้มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารแบบผสม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสมดุลระหว่างต้นทุนและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร งานวิจัยของ (Safavi et al., 2021) ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบการทดลองทางภูมิศาสตร์ สามารถนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอาหารเลี้ยงสัตว์น้ำและปรับสภาวะโภชนาการให้เหมาะสม

4.6 ปัจจัยที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมและการควบคุมตัวแปรบวกรในการทดลอง

แม้ว่างานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาผลของปัจจัยหลัก 4 ประการ ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และวิธีการเติมออกซิเจน แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิล ซึ่งควรพิจารณาเพิ่มเติมในงานวิจัยในอนาคต เช่น คุณภาพน้ำ (pH, อุณหภูมิ, แอมโมเนีย) สายพันธุ์ปลานิล และอายุของลูกปลาเริ่มต้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจควบคุมได้หากมีระบบติดตามและบริหารจัดการที่เหมาะสม

ในขณะเดียวกันการทดลองภาคสนามในบ่อดินยังต้องเผชิญกับ ตัวแปรบวกร (Noise factors) ที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยตรง เช่น สภาพอากาศ ฝนตก ความแปรปรวนของคุณภาพน้ำจากแหล่งธรรมชาติ หรือแม้กระทั่งพฤติกรรม การกินอาหารของปลาแต่ละกลุ่ม เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยรบกวนเหล่านี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการควบคุมตัวแปรสำคัญร่วม ได้แก่ 1) ใช้ลูกปลาที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากันจากแหล่งเดียวกัน 2) ดำเนินการทดลองในช่วงเวลาเดียวกันของปี (ฤดูฝน) เพื่อให้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีความสม่ำเสมอ 3) ใช้ระบบการให้อาหารและเติมออกซิเจนตามกำหนดเวลาแบบอัตโนมัติ 4) กระจายกลุ่มการทดลองในหลายบ่อเพื่อเฉลี่ยผลกระทบจาก Noise factors

ดังนั้นแนวทางนี้ช่วยให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงการเลี้ยงปลานิลในระดับฟาร์มได้อย่างเหมาะสม โดยงานวิจัยในอนาคตอาจพัฒนาเป็นระบบการติดตามและวิเคราะห์แบบอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) เพื่อตรวจสอบตัวแปรแวดล้อมแบบเรียลไทม์ เพื่อเสริมความแม่นยำในการวิเคราะห์

4.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่ากลุ่มที่ใช้ฟาร์มอเตอร์ต้นทุนต่ำสุด ได้แก่ อาหารแบบผลิตเอง จำนวนปลา 1,000 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 2 ครั้ง และเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator ให้ต้นทุนอาหารต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียง 19.35 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้อาหารสำเร็จรูปซึ่งมีต้นทุนสูงถึง 46.03 บาทต่อกิโลกรัมเกือบ 2.4 เท่า หากพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยสมมติว่าอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อปลานิล คือ ประมาณ 700 กรัม และราคาขายปลานิลหน้าฟาร์มอยู่ที่ 60 บาทต่อกิโลกรัม จะมีรายรับต่อปลาประมาณ 42 บาทต่อรอบการเลี้ยง ในขณะที่ต้นทุนอาหารอยู่ที่ประมาณ 13.55 บาท (700 กรัม $\times$ 19.35 บาทต่อกิโลกรัม) คิดเป็นสัดส่วนต้นทุนอาหารเพียงร้อยละ 32 ของรายรับ ขณะที่กลุ่มที่ใช้อาหารสำเร็จรูปจะมีต้นทุนอาหารสูงถึงร้อยละ 75 ของรายรับ

ดังนั้นการเลือกใช้ชุดฟาร์มอเตอร์ที่ช่วยลดต้นทุนอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงไม่เพียงแต่ช่วยลดภาระค่าใช้จ่าย แต่ยังเพิ่ม ผลตอบแทนสุทธิ ของเกษตรกรในแต่ละรอบการเลี้ยงอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการเลี้ยงเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยที่มีข้อจำกัดด้านเงินทุน ซึ่งต้องการเพิ่มกำไรสุทธิจากต้นทุนจำกัดที่มีอยู่



โดยสรุปผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบหลักของการเลี้ยงปลาไนล์ โดยใช้แนวทางของ วิธีการออกแบบการทดลองทากูชิ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงปลาได้อย่างเป็นระบบ โดยเกษตรกรสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปปรับปรุงการจัดการเลี้ยงปลา เพื่อลดต้นทุนการผลิต เพิ่มผลผลิต และเพิ่มอัตราการรอด ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลาไนล์ในระดับประเทศต่อไป และผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้การออกแบบการทดลองทากูชิ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการเลี้ยงปลาไนล์ โดยการใช้อาหารแบบผสม การควบคุมความหนาแน่นของปลา การให้อาหารอย่างเหมาะสม และการเติมออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพ สามารถช่วยให้อุตสาหกรรมเลี้ยงปลาไนล์มีความคุ้มค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ Sustainable Development Goal (SDG) 12 ที่มุ่งเน้นการบริโภคและการผลิตที่ยั่งยืน

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองทากูชิ ในการออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการเลี้ยงปลาไนล์ โดยพิจารณา 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของอาหาร จำนวนปลาต่อบ่อ ความถี่ในการให้อาหาร และ วิธีการเติมออกซิเจน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การเลือกใช้อาหารแบบผสม การควบคุมจำนวนปลาไม่เกิน 750 ตัวต่อบ่อ การให้อาหารวันละ 3-4 ครั้ง และการเติมออกซิเจนด้วย Venturi aerator เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงปลาไนล์ โดยช่วยให้ปลามีน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุด อัตราการรอดที่ดีขึ้น และต้นทุนอาหารต่อหน่วยน้ำหนักที่ลดลง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติจาก One-way ANOVA ระบุว่าทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษา มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของการเลี้ยงปลาไนล์อย่างมีนัยสำคัญ โดยชนิดของอาหารและจำนวนปลาต่อบ่อเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของปลา ในขณะที่วิธีการเติมออกซิเจนมีผลโดยตรงต่ออัตราการรอดและต้นทุนอาหารต่อหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น การใช้วิธีการออกแบบการทดลองทากูชิ (Taguchi method) ยังช่วยลดความแปรปรวนของกระบวนการเลี้ยง ทำให้สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้จึงเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและผู้ประกอบการในการปรับปรุงกระบวนการเลี้ยงปลาไนล์ให้มีความคุ้มค่ามากขึ้น

จากมุมมองด้านการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDG) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ SDG 12 การบริโภคและการผลิตที่ยั่งยืน โดยเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ลดของเสีย และปรับปรุงวิธีการผลิตให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ SDG 9 อุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐานที่ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรม ในการเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมเกษตร นอกจากนี้ผลการศึกษายังเชื่อมโยงกับ SDG 8 การเติบโตทางเศรษฐกิจและการจ้างงานที่มีคุณค่า เนื่องจากสามารถช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของเกษตรกรในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

5.1 แนวทางในอนาคต

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธีการออกแบบการทดลองทากูชิ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงปลาไนล์ อย่างไรก็ตามยังมีแนวทางที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ในอนาคต ได้แก่

5.1.1 การศึกษาการใช้สูตรอาหารเฉพาะพื้นที่ ควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรอาหารเฉพาะพื้นที่ (Localized feed formula) เพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในแต่ละภูมิภาค ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบอาหารและเพิ่มความยั่งยืนของกระบวนการผลิต

5.1.2 การพัฒนาเทคโนโลยีระบบเติมออกซิเจนอัจฉริยะ โดยการใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automated aeration system) เพื่อปรับระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงตามสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงและลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเลี้ยงปลาได้



5.1.3 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ควรมีการศึกษาวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับ Economic feasibility analysis เพื่อตรวจสอบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแนวทางที่ปรับปรุงแล้ว และสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบให้กับเกษตรกรรายย่อยได้

5.1.4 การพัฒนาแนวทางการเลี้ยงปลาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ควรมีการศึกษาการใช้ระบบบำบัดน้ำ และการนำของเสียจากกระบวนการเลี้ยงปลากลับมาใช้ใหม่ (Waste recycling) เพื่อส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) ในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

5.1.5 การศึกษาอัตราการเติบโตของปลาในระบบเพาะเลี้ยงแบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System; RAS); ควรมีการศึกษาการเลี้ยงปลานิลในระบบเพาะเลี้ยงน้ำหมุนเวียน (RAS) เพื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบบ่อดิน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการเพิ่มผลผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้

จากผลการศึกษาเกษตรกรสามารถนำแนวทางที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงปลานิลได้ทันทีโดยควรเน้นที่การใช้สูตรอาหารที่เหมาะสม การควบคุมความหนาแน่นของปลา การจัดการให้อาหารที่เหมาะสม และการเติมออกซิเจนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงขึ้น ลดต้นทุน และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในตลาด นอกจากนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ หรือสถาบันการศึกษาควรสนับสนุนการนำแนวทางเหล่านี้ไปเผยแพร่ในกลุ่มเกษตรกร พร้อมทั้งพัฒนาองค์ความรู้เพิ่มเติม เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการวิจัยทุน Fundamental Fund (FF) ประจำปีงบประมาณ 2566 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยฯ ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ ทรัพยากร และอุปกรณ์ในการดำเนินงาน รวมถึงคณะผู้บริหาร คณาจารย์ ทีมวิจัย และกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงปลานิล ที่มีส่วนร่วมในกระบวนการศึกษาวิจัย ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ความสำเร็จของงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาความรู้และนวัตกรรมเพื่อการประยุกต์ใช้ในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- Adegboye, MA., Aibinu, AM., Kolo, JG., Aliyu, I., Folorunso, TA., & Lee, SH. (2020). Incorporating Intelligence in Fish Feeding System for Dispensing Feed Based on Fish Feeding Intensity. IEEE Access, 8, 91948–91960. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994442>
- Araujo, GS., Silva, JWAD., Cotas, J., & Pereira, L. (2022). Fish Farming Techniques: Current Situation and Trends. Journal of Marine Science and Engineering, 10(11), 1598. <https://doi.org/10.3390/jmse10111598>
- Arici, E., Tuna, MC., Aytac, A., & Kelestemur, GT. (2025). Multi-Objective Optimization of a Pond Aeration System using Taguchi-Based Gray Relational Analysis. Aquaculture International, 33(1), 50. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01758-z>
- Awalistyaningrum, N., Jumeri, J., & Supartono, W. (2023). Optimization of Skipjack Tuna (Katsuwonus Pelamis) Quality Factors in Chilled Box Storage using Taguchi Method. Agroindustrial Journal, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.22146/aij.v10i1.84730>
- Chary, K., Brigolin, D., & Callier, MD. (2022). Farm-Scale Models in Fish Aquaculture – An Overview of Methods and Applications. Reviews in Aquaculture, 14(4), 2122–2157. <https://doi.org/10.1111/raq.12695>
- Davis, DA., & Hardy, RW. (2022). Feeding and Fish Husbandry. In Fish Nutrition (pp. 857–882). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819587-1.00015-X>



- Faria, J., & Mixon, F. (2016). Farmer-Entrepreneurs, Agricultural Innovation, and Explosive Research and Development Cycles. *Administrative Sciences*, 6(4), 13. <https://doi.org/10.3390/admsci6040013>
- Hassan, HU., Ali, QM., Khan, W., Masood, Z., Abdel-Aziz, MFA., Shah, MIA., Gabol, K., Wattoo, J., Mahmood Chatta, A., Kamal, M., Zulfiqar, T., & Hossain, Md. Y. (2021). Effect of Feeding Frequency as a Rearing System on Biological Performance, Survival, Body Chemical Composition and Economic Efficiency of Asian Seabass Lates Calcarifer (Bloch, 1790) Reared Under Controlled Environmental Conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(12), 7360–7366. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.031>
- Hernandez-Vidal, U. (2024). Estrategias De Alimentación Y Retos De La Acuicultura Tropical. *Tropical Aquaculture*, 2(2). <https://doi.org/10.19136/ta.a2n2.5740>
- Kamonrat, N. (2017). A Study of Fish Feeding Pattern to Reduce Cost of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Production in Cage-Cum-Pond Culture System. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 19(3), 80–87.
- Lall, SP., & Dumas, A. (2022). Nutritional Requirements of Cultured Fish: Formulating Nutritionally Adequate Feeds. In *Feed and Feeding Practices in Aquaculture* (pp. 65–132). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821598-2.00005-9>
- Makgobole, MU., Onwubu, SC., Baruwa, A., Mpofana, N., Obiechefu, Z., Naidoo, D., Khathi, A., & Mkhwanazi, B. (2024). Optimization of Collagen Extraction from Fish Scales Using Tris-Glycine Buffer: A Taguchi Methodological Approach. *Marine Drugs*, 22(12), 562. <https://doi.org/10.3390/md22120562>
- Mata-Gómez, LC., Mapelli-Brahm, P., Meléndez-Martínez, AJ., Méndez-Zavala, A., Morales-Oyervides, L., & Montañez, J. (2023). Microbial Carotenoid Synthesis Optimization in Goat Cheese Whey using the Robust Taguchi Method: A Sustainable Approach to Help Tackle Vitamin A Deficiency. *Foods*, 12(3), 658. <https://doi.org/10.3390/foods12030658>
- Munang, A., Latifah, N., Nurisulawati, I., & Setiawan, AW. (2024). Fish Waste-Based Organic Fertilizer Formulation with Taguchi Design of Experiment Approach. *2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/DASA63652.2024.10836370>
- Ngamsin, P., Janprachom, W., Seesaprai, Y., & Vanpetch, Y. (2024). Development of Smart Farming System using Internet of Things (Case Study: Hom Nil Chakraphat Rice, Bang Bo District, Samut Prakan Province, Thailand). *The EURASEANS: Journal on Global Socio-Economic Dynamics*, 6(49), 63–73. [https://doi.org/10.35678/2539-5645.6\(49\).2024.63-73](https://doi.org/10.35678/2539-5645.6(49).2024.63-73)
- Pashovska, S., Srbinska, M., & Bahtijari, G. (2024). The Role of the Entrepreneur in Modern Agribusiness and Choosing the Most Favorable Entrepreneurial Strategy. *Journal of Agriculture and Sustainable Rural Development-JASRD*, 2(3–4), 128–133. <https://doi.org/10.62792/ut.jasrd.v2.i3-4.p2678>
- Popova, OV., & Dolgova, SA. (2016). Modern State and Tendencies of Development of Entrepreneurship in Russian Agribusiness. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 56(8), 171–180. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2016-08.21>
- Qiu, X., & Wu, Y. (2021). Application of Taguchi Method to Improve the Sous Vide Processed Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) Fillet Product Quality During Cold Storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15565>
- Rayos, JCC., & Macaraeg, NA. (2024). Determinants of Production and Technical Efficiency of Tilapia Farming in the Philippines. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 26(6), 1–16. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2024/v26i6771>
- Ritchie, F., Sapelli, L., Smith, JA., Paveley, ND., Lees, AK., Bain, RA., & Ritchie, JM. (2025). Testing the Taguchi method to design and analyze integrated disease management strategies, for the control of late blight (PHYTOPHTHORA INFESTANS) on potato. *Pest Management Science*, ps.8629. <https://doi.org/10.1002/ps.8629>
- Safavi, M., Jafari Olia, MS., Abolhasani, MH., Amini, M., & Kianirad, M. (2021). Optimization of the Culture Medium and Characterization of Antioxidant Compounds of a Marine Isolated Microalga as a Promising Source in Aquaculture Feed. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 35, 102098. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102098>



- Tab-eam, R., Lata, P., & Thawornsujaritkul, T. (2024). Guidelines for Future Agricultural Technology Development to Increase Productivity in the Agricultural Sector. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(7), 5180. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i7.5180>
- Tharek, A., Yahya, A., Salleh, MM., Jamaluddin, H., Yoshizaki, S., Dolah, R., Hara, H., Iwamoto, K., & Mohamad, SE. (2020). Improvement of Astaxanthin Production in *Coelastrum* sp. By Optimization using Taguchi Method. *Applied Food Biotechnology*, 7(4), 205–214. <https://doi.org/10.22037/afb.v7i4.29697>
- Vakili, R. (2023). The Application of Taguchi Method to Optimize Pellet Quality in Broiler Feeds. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 45, e58931. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v45i1.58931>