

แบบจำลองการเติบโตฐานน้ำหนักรับปลาที่เลี้ยงในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยไม่ให้อาหาร

นายชัยวัฒน์ เนติทวีทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

Weight-Based Growth Model for Nile Tilapia in Waste Water Treatment Pond without Feeding

Mr. Chaiwat Natitaweetrab

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Mathematics and Computational Science
Department of Mathematics and Computer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองการเติบโตฐานน้ำหนักรักษาปลาที่เลี้ยงใน
บ่อบำบัดน้ำเสียโดยไม่ให้อาหาร

โดย

นายชัชวัฒน์ เนติทวีทรัพย์

สาขาวิชา

คณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.รติพันธ์ บุญเคลือบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย สาตราหา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.รติพันธ์ บุญเคลือบ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.กิติพร พลายมาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี มาลีวงศ์)

ชัยวัฒน์ เนติทวีทรัพย์: แบบจำลองการเติบโตฐานน้ำหนักสำหรับปลานิลที่เลี้ยงในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยไม่ให้อาหาร. (WEIGHT-BASED GROWTH MODEL FOR NILE TILAPIA IN WASTE WATER TREATMENT POND WITHOUT FEEDING) อ.ที่ปริกษาวิทยาพนธ์หลัก: อ.ดร. รตินันท์ บุญเคลือบ, อ.ที่ปริกษาวิทยาพนธ์ร่วม: รศ.สุชาดา ศิริพันธุ์, 65 หน้า.

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดที่นิยมเพาะเลี้ยงเพื่อการบริโภคและการประมง ทำให้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปลานิลเกิดขึ้นมากมายเพื่อพัฒนาวิธีการเลี้ยงปลานิลให้ได้ผลผลิตมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองการเติบโตของปลานิลเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลาที่เลี้ยงในบ่อบำบัดน้ำเสีย และไม่มีกรให้อาหาร โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่เลี้ยงและตัวแปรในธรรมชาติที่มีผลกระทบต่อกรเติบโตของปลา ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ แอมโมเนียไม่แตกตัว (NH_3) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ค่าความสกปรกของน้ำ (BOD) ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง ปริมาณอาหารในธรรมชาติที่คำนวณจาก คาร์บอนไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่สำคัญต่อการเติบโตของสาหร่าย) จากนั้นจึงได้ปรับปรุงแบบจำลอง โดยเพิ่มการพิจารณาตัวแปรค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ เพื่อให้ได้แบบจำลองใหม่ที่มีความสมเหตุสมผล มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง และอาจนำไปประยุกต์ใช้กับการเลี้ยงปลานิลในบ่อน้ำแบบให้อาหารได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และตัวแปรที่พิจารณาในแบบจำลอง เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์และบันทึกข้อมูลตัวแปรที่สำคัญได้อย่างเหมาะสม

ภาควิชา คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา คณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคณนาลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยาพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยาพนธ์ร่วม.....

5471948423: MAJOR APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATIONAL SCIENCE

KEYWORDS : GROWTH/MODEL/NILE TILAPIA

CHAIWAT NATITAWEEETRAB: WEIGHT-BASED GROWTH MODEL FOR NILE TILAPIA IN WASTE WATER TREATMENT POND WITHOUT FEEDING. ADVISOR: RATINAN BOONKLURB, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SUCHADA SIRIPANT, 65 pp.

Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) is a popular freshwater fish which grow for consumption and aquaculture. There are many researches about Nile tilapia for developing farming and increasing product. In this research, we study the growth model for Nile tilapia to predict the weight of fish which grown in the water treatment pond without feeding by considering the amount of time and environmental factors that reasonably affect the growth. These factors are water temperature, unionized ammonia (NH_3), dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), fish stocking density and natural food which is estimated from the amount of Carbon, Nitrogen and Phosphorus (which are an important nutrient required for algal growth). The pH factor and BOD factor controller are also included in order to have a new growth model that is more reasonable and less error. This model may be adapted to predict the weight of fish that grows in freshwater with feeding. Moreover, sensitivity analysis is carried out to analyze how sensitive our parameters and variables are.

Department : Mathematics and Computer Science..... Student's Signature.....

Field of Study : Applied Mathematics and..... Advisor's Signature.....

Computational Science..... Co-advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ในฐานะนิสิตระดับปริญญาโท ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ สาขาคณิตศาสตร์ ประยุกต์และวิทยาการคณนา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยมีความภูมิใจเป็นอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสศึกษาและดำเนินงานวิจัย ณ สถาบันแห่งนี้ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ในโอกาสนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านดังนี้

ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.รตินันท์ บุญเคลือบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ สุชาติดา ศิริพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และมอบความดูแลเอาใจใส่ให้ตลอดตั้งแต่วันแรกที่เริ่มดำเนินงานวิจัย จนถึงวันสุดท้ายที่งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี มาลีวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณามอบข้อมูลการเลี้ยงปลาในบ่อบำบัดน้ำเสียและสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำที่มีประโยชน์และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.นฤชิต คำปิ่น ที่กรุณามอบข้อมูลการเลี้ยงปลาในบ่อบำบัดน้ำเสียและสละเวลาอันมีค่าเพื่อถ่ายทอดความรู้และให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดลองที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย สาตราหา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.กิติพร พลายมาศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนมอบทุนการศึกษา “ทุนวิทยบัณฑิต” ในปีการศึกษา 2555

ขอบพระคุณ ครูอาจารย์ ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้การอบรมสั่งสอน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และขอบคุณเพื่อนพี่น้องทุกคนสำหรับการดูแลและกำลังใจที่มอบให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสามารถดำเนินงานวิจัยนี้ได้สำเร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	3
ปลานิล.....	3
การเติบโต.....	4
ตัวแปรในสิ่งแวดล้อม.....	4
อาหารธรรมชาติของปลานิล.....	8
ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง.....	9
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 4 การปรับปรุงแบบจำลอง.....	22
ตัวแปรในแบบจำลอง.....	22
การวิเคราะห์องค์ประกอบ.....	29
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	33
บทที่ 5 การทดสอบแบบจำลอง.....	35
บทที่ 6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว.....	48
ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์.....	49
ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร.....	50
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
สรุปผลการวิจัย.....	52
ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงดัชนีคุณภาพน้ำ การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ และการวิเคราะห์.....	20
4.1 ตารางแสดงเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน.....	30
4.2 ตารางแสดงตารางผลการสกัดองค์ประกอบ.....	30
4.3 ตารางแสดงตารางค่าน้ำหนักองค์ประกอบ.....	31
4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง.....	34
5.1 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร.....	38
5.2 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร.....	40
5.3 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร.....	42
5.4 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร.....	44
5.5 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร.....	46
6.1 แสดงผลของค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร.....	48
6.2 ตารางแสดงผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่ คำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม.....	49
6.3 ตารางแสดงผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่ คำนวณจากค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไป 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม.....	50
ก.1 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร.....	60
ก.2 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร.....	61
ก.3 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร.....	62
ก.4 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร.....	63
ก.5 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร.....	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ภาพแสดงปลาหนีล.....	3
2.2 ภาพการเลี้ยงปลาหนีลในบ่อดินและการเลี้ยงปลาหนีลในกระชัง	4
3.1 ภาพแสดงกราฟของ τ เมื่อ $T_{\min} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 33^{\circ}\text{C}$ และ $T_{\max} = 41^{\circ}\text{C}$	11
3.2 ภาพแสดงกราฟของ k เมื่อ $k_{\min} = 0.00133$ กรัม ¹⁻ⁿ /วัน และ $j = 0.0132$ °C ⁻¹	12
3.3 ภาพแสดงกราฟของ δ เมื่อ $\text{DO}_{\text{crit}} = 1.0$ mg/l และ $\text{DO}_{\min} = 0.1$ mg/l	13
3.4 ภาพแสดงกราฟของ v เมื่อ $\text{UIA}_{\text{crit}} = 0.08$ mg/l และ $\text{UIA}_{\max} = 2.0$ mg/l	13
3.5 ภาพแสดงกราฟของ f กับ P/B เมื่อ $s = 21.38$	14
3.6 ภาพแสดงกราฟของ β เมื่อ $\text{BOD}_{\text{crit}} = 20$ mg/l และ $\text{BOD}_{\max} = 40$ mg/l	18
3.7 ภาพแสดงกราฟของ b เมื่อ $\varepsilon = 0.05$, $T_c = 130$, $c = 0.7$ และ $d = 0.9$	19
3.8 ภาพแสดงบ่อบำบัดน้ำเสียในโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมผักเป็ดเขียว.....	19
3.9 ภาพแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนัปลาที่ได้จากแบบจำลองและน้ำหนัปลาที่ได้จากการวัด.....	21
4.1 ภาพแสดงกราฟของ β^{ϕ} เมื่อ $\beta = 0.5$	23
4.2 ภาพแสดงกราฟของ $\beta(1-\phi)$ เมื่อ $\beta = 0.5$	25
4.3 ภาพแสดงกราฟของ α เมื่อ $\text{pH}_{\text{opt}} = 8$, $\text{pH}_{\max} = 10$ และ $\text{pH}_{\min} = 5$	26
4.4 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร 27	
4.5 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร 28	
4.6 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร 28	
4.7 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร 28	
4.8 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร 29	
5.1 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนัปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนัปลา ที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร.....	37
5.2 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนัปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับ น้ำหนัปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร.....	37

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่มีรสชาติดี มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เลี้ยงง่าย โตเร็ว และอดทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี จึงเป็นหนึ่งในปลาเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรเป็นจำนวนมาก แต่ปัญหาสำคัญของการเลี้ยงปลานิล คือเกษตรกรไม่สามารถคาดเดาน้ำหนักปลาที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยสาเหตุจากสภาพแวดล้อมที่กระทบต่อการกินอาหารของปลาได้ ทำให้ปลาที่เลี้ยงเติบโตได้ไม่ดี แบบจำลองการเติบโตของปลานิลที่พยากรณ์น้ำหนักของปลาจากตัวแปรในสิ่งแวดล้อม จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ต่อเกษตรกรในการเพาะเลี้ยงปลานิล เพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลาที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้การเพาะเลี้ยงปลานิลเกิดผลผลิตที่ให้มูลค่าสูงสุดได้

ในระยะแรกงานวิจัยที่สร้างแบบจำลองการเติบโตของปลานิล จะพิจารณาเพียงตัวแปรเวลาในการเลี้ยงปลาเท่านั้น แต่จากการศึกษาต่อมาพบว่ามีตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกินอาหารและการเติบโตของปลา เช่น อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ค่าความสกปรกของน้ำ (BOD) แอมโมเนียไม่แตกตัว (NH_3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงและปริมาณอาหาร เป็นต้น ซึ่งหากตัวแปรเหล่านี้มีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม จะส่งผลให้ปลากินอาหารได้เป็นปกติและเติบโตได้ดี แต่ในทางกลับกัน หากตัวแปรเหล่านี้มีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้ปลากินอาหารน้อยลง เติบโตช้า และอาจตายได้ในที่สุด

ในปี ค.ศ. 1967 Ursin [25] ได้เสนอสมการของอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักปลาเทียบกับเวลา ซึ่งมีพื้นฐานจากกระบวนการเผาผลาญในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Yi [27] ได้พัฒนาแบบจำลองการเติบโตเพื่อทำนายน้ำหนักปลานิลจากสมการของ Ursin [25] และพิจารณาตัวแปรในสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการกินอาหารของปลาได้แก่ อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความสกปรกของน้ำ แอมโมเนียไม่แตกตัว ชั่วแสง และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิที่คำนวณจากปริมาณแร่ธาตุ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 2011 Dampin et al. [12] ได้ปรับปรุงแบบจำลองของ Yi [27] โดยเพิ่มการพิจารณาตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ และเปลี่ยนค่าประสิทธิภาพของการดูดซึมอาหารจากเดิมซึ่งเป็นค่าคงที่ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของน้ำหนักปลา นอกจากนี้ได้คำนวณประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากความหนาแน่นของแพลงก์ตอน จากนั้นได้ทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลของ นฤชิต ดำปิ่น [4] ซึ่งทดลองเลี้ยงปลานิลด้วยความหนาแน่น 1 – 5 ตัว ในกระชังในบ่อบำบัดน้ำเสีย ที่ “โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี” และบันทึกข้อมูลน้ำหนัก ความยาวของปลา และดัชนีวัดคุณภาพน้ำได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็น

กรด-ต่าง ความเป็นต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ไนเตรท แอมโมเนียไม่แตกตัว ออร์โธฟอสเฟต ค่าความสกปรกของน้ำ สารแขวนลอย และความหนาแน่นของแพลงก์ตอน โดยเก็บข้อมูลดังกล่าวทุก 1 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ทั้งนี้จากการใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อทดสอบแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองของ Dampin et al. [12] สามารถทำนายน้ำหนัปลาได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Yi [27]

สำหรับงานวิจัยนี้จะปรับปรุงแบบจำลองการเติบโตเพื่อพยากรณ์น้ำหนักของปลานิล จากแบบจำลองของ Yi [27] และ Dampin et al. [12] โดยพิจารณาปัจจัยในสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำ แอมโมเนียไม่แตกตัว และค่าความสกปรกของน้ำ และคำนวณประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิด้วยวิธีการของ Yi [27] เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำ มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง และสมเหตุสมผลยิ่งขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบเพื่อยืนยันสมมติฐานในการเลือกตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในแบบจำลอง และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในแบบจำลองนี้ เพื่อให้ผู้ใช้แบบจำลองสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์หรือบันทึกข้อมูลตัวแปรที่สำคัญได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์

ปรับปรุงแบบจำลองการเติบโตของปลานิลเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลา โดยพิจารณาจากตัวแปรในสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลา ปริมาณความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง และอาหารธรรมชาติในแหล่งน้ำ และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในแบบจำลองที่ปรับปรุงนี้

ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) พิจารณาการเติบโตของปลานิลในส่วนของน้ำหนักเท่านั้น
- 2) พิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลา ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความสกปรกของน้ำ แอมโมเนียไม่แตกตัว ค่าความเป็นกรด-ต่าง ปริมาณอาหารในธรรมชาติ และความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง
- 3) ตัวแปรและน้ำหนักปลาที่ใช้ทดสอบแบบจำลองมาจากข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยงปลาในกระชังในบ่อ บำบัดน้ำเสียโดยไม่ให้อาหาร
- 4) วิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในแบบจำลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้แบบจำลองเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลานิลจากตัวแปรสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีความสมเหตุสมผลและมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง
- 2) ทราบถึงความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อแบบจำลอง

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

เพื่อให้แบบจำลองการเติบโตของปลานิลมีความถูกต้องและสมเหตุสมผล จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาความรู้พื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวกับปลานิล รวมถึงตัวแปรสำคัญในสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกินอาหารของปลานิล ซึ่งได้รวบรวมและสรุปไว้ดังต่อไปนี้

1) ปลานิล

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดในวงศ์ปลาหมอ (*Cichlidae*) รูปร่างคล้ายปลาหมอ บริเวณครีบท้อง ครีบก้น และลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ด้านข้างลำตัวมีแถบลายดำขาวพาดขวางสลับกัน อาหารของปลานิล คือ พืชน้ำ เศษอาหาร ตัวอ่อนของแมลง และแพลงก์ตอน ปลานิลมีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกา แต่ต่อมาได้มีผู้นำไปเพาะเลี้ยงอย่างแพร่หลายในประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา อินเดีย อินโดนีเซีย ใต้หวัน ญี่ปุ่น และไทย เนื่องจากปลานิลมีรสชาติดี คุณค่าทางอาหารสูง เติบโตเร็วและสามารถอดทนต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างได้ดี จึงเป็นที่นิยมเพาะเลี้ยงเพื่อบริโภคและการเกษตร



ภาพที่ 2.1 ภาพแสดงปลานิล [33]

ในอดีตการเลี้ยงปลานิลเพื่อการเกษตร นิยมเลี้ยงในบ่อดินซึ่งต้องใช้พื้นที่มาก และมักได้ปลาที่มีกลิ่นคาวสูง ปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่จึงปรับเปลี่ยนวิธีการเลี้ยงจากเดิมที่เลี้ยงในบ่อดินทั่วไป เป็นการเลี้ยงปลาในกระชังในบ่อหรือแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีน้ำไหลเวียน ซึ่งข้อดีของการเลี้ยงปลานิลในกระชัง คือ ใช้พื้นที่น้อย ดูแลง่าย และได้ผลผลิตสูงในระยะเวลาสั้น แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนสูง และหากเลี้ยงในแหล่งน้ำธรรมชาติ จะควบคุมสภาพแวดล้อมได้ยาก ทำให้เสี่ยงต่อการป่วย และตายของปลาทั้งกระชัง [2, 33, 40]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2 ภาพแสดงการเลี้ยงปลานิลในบ่อดินและการเลี้ยงปลานิลในกระชัง
(ก) การเลี้ยงปลานิลในบ่อดิน [39] (ข) การเลี้ยงปลานิลในกระชัง [35]

2) การเติบโต

การเติบโต หมายถึง การเพิ่มขนาด และน้ำหนักในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการเผาผลาญ (metabolism) [3] ที่ประกอบด้วยกระบวนการ 2 กระบวนการ ได้แก่

2.1 กระบวนการสร้าง (anabolism) คือ กระบวนการเปลี่ยนอาหารหรือพลังงานจากอาหารให้เป็นเนื้อเยื่อ เพื่อเสริมสร้างหรือซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่สึกหรอ ซึ่งกระบวนการสร้างจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการกินอาหารของสิ่งมีชีวิต

2.3 กระบวนการสลาย (catabolism) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ได้รับและสะสมไว้ให้กลายเป็นพลังงานที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ ซึ่งกระบวนการสลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อม

ทั้งนี้การเติบโตของสิ่งมีชีวิตจะเกิดขึ้นในกรณีที่กระบวนการสร้างเกิดขึ้นมากกว่ากระบวนการสลาย ซึ่งผลต่างของกระบวนการทั้งสอง คือ อัตราการเติบโตของสิ่งมีชีวิตนั่นเอง

3) ตัวแปรในสิ่งแวดล้อม

การเพิ่มน้ำหนักของปลานิลเป็นผลโดยตรงจากการกินอาหาร ซึ่งปริมาณการกินอาหารของปลานิลจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1) อุณหภูมิของน้ำ (water temperature)

เนื่องจากปลาเป็นสัตว์เลือดเย็น จึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ได้ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของน้ำ และสภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่ ด้วยเหตุนี้อัตราการเผาผลาญของปลาจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเป็นหลัก โดยอุณหภูมิของน้ำจะมีผลต่อกิจกรรมต่างๆ ของปลา เช่น การกินอาหาร การย่อยอาหาร การเคลื่อนไหว การหายใจ การสืบพันธุ์ และการเติบโต เป็นต้น กิจกรรมดังกล่าวจะเกิดมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางกลับกัน หากอุณหภูมิน้ำลดลง กิจกรรมดังกล่าวก็จะลดลงด้วย ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปกว่าที่ปลาจะทนได้ ปลาจะเกิดความเครียดจนหยุดกิจกรรมทั้งหมด และทำให้ปลาตายในที่สุด ทั้งนี้ปลาแต่ละชนิดมีขอบเขตของอุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตแตกต่างกันตามสายพันธุ์ ถิ่นกำเนิด และช่วงอายุของปลาชนิดนั้นๆ [1, 5, 16]

3.2) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen : DO)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดรวมทั้งปลาและสัตว์น้ำ ซึ่งใช้ออกซิเจนในการหายใจและกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกาย ออกซิเจนส่วนใหญ่ที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำจะมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ และอีกส่วนหนึ่งมาจากการละลายของออกซิเจนในอากาศ ในแหล่งน้ำสะอาดจะมีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำและทำให้สามารถเติบโตได้ดี แต่ในแหล่งน้ำที่สกปรกจะมีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำเนื่องจากมีปริมาณสิ่งมีชีวิตอยู่อย่างหนาแน่น จึงอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำ และทำให้เติบโตได้ช้ากว่าปกติ [1, 16, 18]

3.3) ค่าความสกปรกของน้ำ (biochemical oxygen demand : BOD)

ค่าความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ คือ ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ในน้ำ ซึ่งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่ใช้วัดความสกปรกของน้ำ กล่าวคือ ถ้าค่าความสกปรกของน้ำมาก แสดงว่าปริมาณความต้องการออกซิเจนสูง เนื่องจากในแหล่งน้ำมีอินทรีย์วัตถุอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งแบคทีเรียต้องใช้ออกซิเจนเป็นจำนวนมาก ในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเหล่านั้น จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงและเกิดน้ำเสียในแหล่งน้ำนั้น ดังนั้นหากแหล่งน้ำมีค่าความสกปรกของน้ำสูงเกินไป อาจทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ดำรงชีวิตนั่นเอง [1, 16, 18]

3.4) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (1.1)$$

เมื่อ $[\text{H}^+]$ คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (โมล/ลิตร)

ทั้งนี้ เมื่อจัดรูป (1.1) จะสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน จากค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้จาก

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \quad (1.2)$$

ความเป็นกรด-ด่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0 – 14 และไม่มีหน่วย ถ้าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 7 แสดงว่าน้ำมีสภาพเป็นกรด ถ้าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 แสดงว่าน้ำมีสภาพเป็นกลาง และ ถ้าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 7 แสดงว่าน้ำมีสภาพเป็นด่าง โดยทั่วไปความเป็นกรด-ด่างไม่มีผลต่อสัตว์น้ำโดยตรง แต่จะมีผลต่อกระบวนการหรือปฏิกิริยาซึ่งควบคุมปริมาณสารประกอบต่างๆ ที่เป็นพิษในน้ำ ดังนั้นในแหล่งน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเหมาะสม จะส่งผลให้สารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำ มีปริมาณเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และทำให้สัตว์น้ำเติบโตได้ดี [1, 16, 18, 32]

3.5) แอมโมเนีย (ammonia)

แอมโมเนียเป็นสารประกอบของไนโตรเจน ซึ่งแอมโมเนียในแหล่งน้ำจะเกิดจากการขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำ และเกิดจากการย่อยสลายสารประกอบโปรตีนหรืออินทรีย์ไนโตรเจนโดยแบคทีเรีย ดังนั้นการให้อาหารปลาที่มีโปรตีนสูง รวมถึงเศษอาหารและของเสีย จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในบ่อปลาสูงขึ้น สำหรับแอมโมเนียที่พบในน้ำมีอยู่ 2 รูปแบบคือ [16, 18, 38, 43]

3.5.1) แอมโมเนียแตกตัว (ionized ammonia : NH_4^+)

เป็นแอมโมเนียรูปแบบที่ไม่มีพิษต่อสัตว์น้ำ นอกจากจะมีความเข้มข้นมากๆ ส่วนใหญ่พบในน้ำที่มีสภาวะเป็นกรด ซึ่งแอมโมเนียในรูปแบบนี้เป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อการเติบโตของสาหร่าย พืชน้ำ และแพลงก์ตอนพืช

3.5.2) แอมโมเนียไม่แตกตัว (unionized ammonia : NH_3)

เป็นแอมโมเนียรูปแบบที่มีพิษต่อสัตว์น้ำ พบมากในน้ำที่มีสภาวะเป็นด่าง และมีอุณหภูมิสูง หากปลาสัมผัสแอมโมเนียไม่แตกตัวในปริมาณสูง จะหยุดกินอาหารและตายในที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียไม่แตกตัวมีผลรบกวนระบบการหายใจ โดยเฉพาะในสภาวะที่ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดต่ำลง จะยิ่งทำให้ปลามีความไวต่อปริมาณแอมโมเนียมากขึ้น

ผลรวมของแอมโมเนียทั้งสองรูปแบบนี้เรียกว่า “แอมโมเนียรวม” (Total Ammonia : TAN) ซึ่งปริมาณของแอมโมเนียรวมสามารถใช้คำนวณหาปริมาณของแอมโมเนียไม่แตกตัว (NH_3) ได้ดังนี้ [38, 42]

$$\text{NH}_3 = f_{\text{NH}_3} \times \text{TAN} \quad (1.3)$$

เมื่อ f_{NH_3} คือ สัดส่วนของแอมโมเนียไม่แตกตัวในแอมโมเนียรวมซึ่งคำนวณจากค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิของน้ำ ($T, ^\circ\text{C}$) โดยสมการ [41]

$$f_{\text{NH}_3} = \frac{1}{1 + 10^{\text{pK} - \text{pH}}} \quad (1.4)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \text{pK} = 0.09018 + \frac{2729.92}{273.2 + T} \quad (1.5)$$

จาก (1.2) สามารถจัดรูปเพื่อหาปริมาณของแอมโมเนียแตกตัว (NH_4^+) ได้ดังนี้

$$\text{NH}_4^+ = \left(\frac{1 - f_{\text{NH}_3}}{f_{\text{NH}_3}} \right) \times \text{NH}_3 \quad (1.6)$$

3.6) ไนเตรท (nitrate : NO_3^-)

ไนเตรทเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของไนโตรเจนที่สามารถพบได้ในระบบนิเวศน้ำ เกิดจากการออกซิเดชันของแอมโมเนียรวม ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) อย่างสมบูรณ์ โดยปกติแล้ว ไนเตรทเป็นสารอาหารสำคัญของพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืช และไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แต่เนื่องจากในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ไนเตรทจะเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ และแอมโมเนียรวมจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรมีปริมาณออกซิเจนละลายในปริมาณที่มากเพียงพอ จึงจะทำให้ไนเตรทมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งเป็นประโยชน์และไม่ส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำ [29]

3.7) ไนไตรท์ (nitrite : NO_2^-)

ไนไตรท์เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของไนโตรเจน ซึ่งเกิดระหว่างกลางของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ไนไตรท์มีความเป็นพิษสูง และเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ แต่โดยทั่วไปไนไตรท์จะเปลี่ยนสภาพเป็นไนเตรทอย่างรวดเร็ว จึงไม่สะสมอยู่ในแหล่งน้ำ ยกเว้นในกรณีที่แหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ อัตราการออกซิเดชันของแอมโมเนียจะสูงกว่าอัตราการออกซิเดชันของไนไตรท์ จึงเกิดการสะสมของไนไตรท์ในแหล่งน้ำ ดังนั้นในแหล่งน้ำที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงเพียงพอ เพื่อควบคุมปริมาณไนไตรท์ในแหล่งน้ำไม่ให้เกิดการสะสมมากจนเกิดอันตรายแก่สัตว์น้ำได้ [1, 29]

3.8) ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate : PO_4^{3-})

ออร์โธฟอสเฟตเป็นรูปหนึ่งของฟอสฟอรัสที่พบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ซึ่งพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืชจะนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเติบโต แต่หากแหล่งน้ำมีปริมาณฟอสฟอรัสจำนวนมาก อาจทำให้เกิดภาวะที่แหล่งน้ำมีความอุดมสมบูรณ์มากเกินไป (eutrophication) จนพืชน้ำ และแพลงก์ตอนพืชเติบโตอย่างรวดเร็ว จนเกิดสภาวะขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำได้ [16, 18, 29,]

3.9) ความเป็นด่าง (Alkalinity)

คือ ความสามารถของน้ำในการเปลี่ยนสภาพจากกรดกลายเป็นกลาง ความเป็นด่างของน้ำส่วนใหญ่เกิดจาก คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) แต่จะคำนวณในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยทั่วไปค่าความเป็นด่างจะไม่มีผลต่อสัตว์น้ำโดยตรง แต่มีความสำคัญต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ซึ่งแหล่งน้ำที่มีค่าความเป็นด่างสูงจะควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำได้ดีกว่าน้ำที่มีความเป็นด่างต่ำ นอกจากนี้ ในส่วนของ คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ยังเป็นสารประกอบของคาร์บอน ซึ่งเป็นหนึ่งในธาตุที่จำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารของพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำ [29, 31, 32]

4) อาหารธรรมชาติของปลานิล

ปลานิลกินอาหารได้หลากหลายทั้งพืชและสัตว์ ทั้งนี้ในขณะที่ปลามีขนาดเล็กจะกินอาหารจำพวกแพลงก์ตอน ตัวอ่อนของแมลง หรืออินทรีย์วัตถุที่สลายตัวอยู่ในแหล่งน้ำ แต่เมื่อปลามีขนาดใหญ่ขึ้นจะกินอาหารจำพวกพืชชั้นสูงที่เจริญเติบโตบริเวณแหล่งน้ำ เช่น ผักบุ้ง สาหร่าย หรือแห่น เป็นต้น ซึ่งพืชน้ำดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารหลักเพื่อการเติบโตได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) โดยธาตุอาหารเหล่านี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของสารอนินทรีย์รวมละลายน้ำ ดังต่อไปนี้ [29, 43]

4.1 คาร์บอนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (total dissolved inorganic carbon : DIC)

คือ ผลรวมของสารละลายคาร์บอนอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ คาร์บอเนต (CO_3^{2-})

4.2 ไนโตรเจนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (total dissolved inorganic nitrogen : DIN)

คือ ผลรวมของสารละลายไนโตรเจนอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วย แอมโมเนียแตกตัว (NH_4^+) ไนเตรต (NO_3^-) และ ไนไตรท์ (NO_2^-)

4.3 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (total dissolved inorganic phosphorus : DIP)

คือ ผลรวมของสารละลายฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำในรูปออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-})

5) ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง

ความหนาแน่นของปลาเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการเติบโตของปลานิล หากในแหล่งน้ำมีความหนาแน่นของปลามากเกินไป อาจทำให้ปริมาณอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการของปลาแต่ละตัว นอกจากนี้ความแออัดในพื้นที่เป็นสาเหตุทำให้ปลาเกิดความเครียดและกินอาหารได้น้อยกว่าปกติ ส่งผลให้ปลาเติบโตได้ช้าและมีน้ำหนักเฉลี่ยต่ำกว่าปลาที่อยู่ในแหล่งน้ำที่มีความหนาแน่นของปลาน้อยกว่า ดังนั้นโดยทั่วไปอัตราการเติบโตของปลาจึงมีค่าลดลงตามความหนาแน่นของปลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเลี้ยงปลานิลเพื่อการเกษตรให้ได้ผลผลิตสูงสุดควรกำหนดความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงให้เหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ เช่น วิธีการเลี้ยง ปริมาณอาหาร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง หรือน้ำหนักปลาที่ต้องการ เป็นต้น [36]

โดยทั่วไปการเลี้ยงปลานิลในบ่อดินนิยมเลี้ยงด้วยความหนาแน่นของปลาประมาณ 1 – 3 ตัว/ตารางเมตร ซึ่งในระยะเวลา 1 ปี ปลาจะมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 500 กรัม/ตัว ส่วนการเลี้ยงปลานิลในกระชังมักเลี้ยงด้วยความหนาแน่นประมาณ 60 – 100 ตัว/ตารางเมตร ซึ่งในระยะเวลา 2 – 3 เดือน ปลาจะมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 300 – 400 กรัม/ตัว แต่ด้วยคุณภาพและปริมาณอาหารที่เหมาะสม ร่วมกับระบบการจัดการที่ดี จะช่วยให้ได้ปลานิลที่มีน้ำหนักมากขึ้นในระยะเวลาที่น้อยลงได้ [2]

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตมีงานวิจัยเกี่ยวกับปลาในลักษณะของการสร้างแบบจำลองการเติบโตที่พยากรณ์น้ำหนักของปลาเกิดขึ้นอย่างหลากหลาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย และแบบจำลองที่สำคัญและเกี่ยวข้อง โดยรวบรวมและสรุปไว้ดังต่อไปนี้

Ursin [25] ได้สร้างแบบจำลองการเติบโตของปลาที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักปลาต่อวันที่เกิดจากผลต่างระหว่างน้ำหนักปลาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้าง กับน้ำหนักปลาที่สูญเสียไปจากกระบวนการสลาย ในรูป

$$\frac{dW}{dt} = HW^m - kW^n \quad (3.1)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักปลา (กรัม)

t คือ เวลา (วัน)

H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการสร้างสุทธิ (กรัม^{1-m}/วัน)

m คือ เลขชี้กำลังของน้ำหนักตัวสำหรับกระบวนการสร้างสุทธิ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการสลายจากการอดอาหาร (กรัม¹⁻ⁿ/วัน)

n คือ เลขชี้กำลังของน้ำหนักตัวสำหรับกระบวนการสลายจากการอดอาหาร

โดยที่ HW^m คือ น้ำหนักปลาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้าง และ kW^n คือ น้ำหนักปลาที่สูญเสียไปจากกระบวนการสลาย

Winberg [26] เสนอว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักปลา จะเพิ่มขึ้นจากผลของกระบวนการสร้างซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการกินอาหารของปลา ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักปลา จะลดลงจากผลของกระบวนการสลายซึ่งประกอบด้วยกระบวนการสลายจากการกินอาหาร (feeding catabolism) รวมกับกระบวนการสลายจากการอดอาหาร (fasting catabolism) จึงสามารถเขียน (3.1) ได้ในรูป

$$\frac{dW}{dt} = b \frac{dR}{dt} - \left(a b \frac{dR}{dt} + kW^n \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ $\frac{dR}{dt}$ คือ อัตราการกินอาหารของปลาต่อวัน (กรัม/วัน)

a คือ สัดส่วนของอาหารที่ดูดซึมเพื่อใช้ในกระบวนการสลายจากการกินอาหาร

b คือ ค่าประสิทธิภาพของการดูดซึมอาหาร

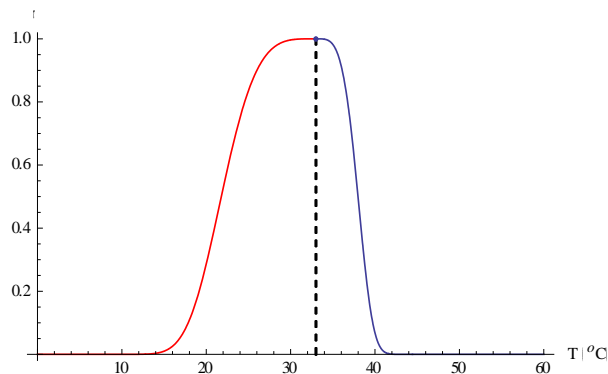
โดยที่ $b \frac{dR}{dt}$ คือ น้ำหนักปลาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างสุทธิ $ab \frac{dR}{dt}$ คือน้ำหนักปลาที่สูญเสียจากกระบวนการสลายจากการกินอาหาร เมื่อจัดรูป (3.2) ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{dW}{dt} = (1-a)b \frac{dR}{dt} - kW^n \quad (3.3)$$

Brett et al. [8] ได้อธิบายว่าอุณหภูมิ (T) มีผลต่อการกินอาหารของปลา คือ ปลาจะกินอาหารเมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (T_{\min}) และกินเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิเหมาะสม (T_{opt}) หลังจากนั้นปลาก็จะกินอาหารลดลงจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (T_{\max}) ปลาจะหยุดกินอาหาร ซึ่ง Svirezhev et al. [23] และ Bolte et al. [7] ได้แสดงฟังก์ชัน τ ของตัวแปรอุณหภูมิเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกินอาหารของปลาไว้ดังนี้

$$\tau = \begin{cases} \exp\left\{-4.6\left[\frac{(T_{\text{opt}} - T)}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})}\right]^4\right\} & ; T < T_{\text{opt}} \\ \exp\left\{-4.6\left[\frac{(T - T_{\text{opt}})}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})}\right]^4\right\} & ; T \geq T_{\text{opt}} \end{cases} \quad (3.4)$$

โดยที่ τ จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากภาพที่ 3.1 แสดงตัวอย่างกราฟของ τ เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ อุณหภูมิเหมาะสม และอุณหภูมิสูงสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ เท่ากับ 15°C , 33°C และ 44°C ตามลำดับ

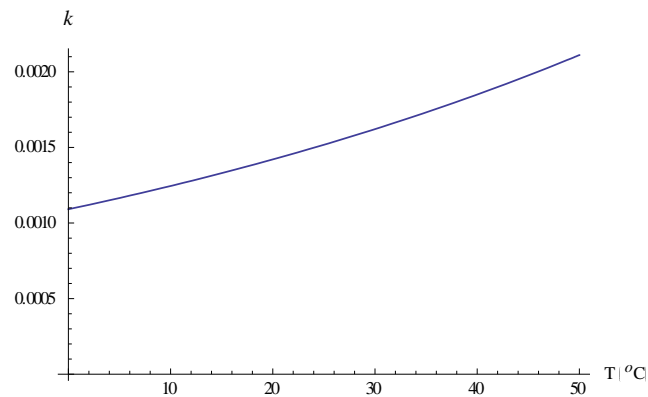


ภาพที่ 3.1 ภาพแสดงกราฟของ τ เมื่อ $T_{\min} = 15^\circ\text{C}$, $T_{\text{opt}} = 33^\circ\text{C}$ และ $T_{\max} = 44^\circ\text{C}$

Ursin [25] และ Sperber et al. [22] ตั้งสมมติฐานว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการสลายจากการอดอาหารจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่ง Nath et al. [20] ได้แสดงฟังก์ชัน k ในรูปของตัวแปรอุณหภูมิไว้ดังนี้

$$k = k_{\min} e^{j(T - T_{\min})} \quad (3.5)$$

เมื่อ k_{\min} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการสลายจากการอดอาหารที่อุณหภูมิ T_{\min} (กรัม¹⁻ⁿ/วัน)
 j คือ ค่าคงตัวที่อธิบายผลกระทบบของอุณหภูมิต่อกระบวนการเผาผลาญ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)



ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงกราฟของ k เมื่อ $k_{\min} = 0.00133$ กรัม¹⁻ⁿ/วัน และ $j = 0.0132$ °C⁻¹

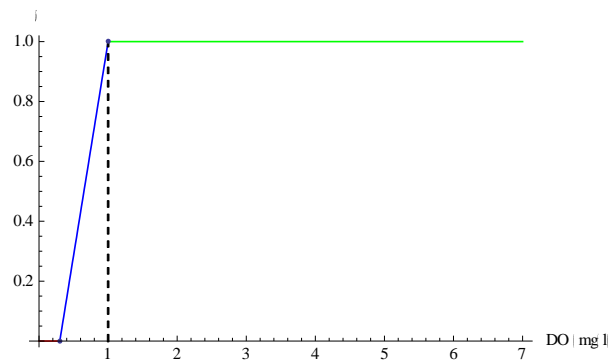
Caulton [9] รายงานว่ามีปลาหลากหลายชนิดรวมถึงปลานิลที่กินอาหารในช่วงเวลาที่มีแสงแดดเท่านั้น โดยช่วงแสง (Photoperiod) คำนวณจากช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตกดิน และจากสมมติฐานของอัตราส่วนของช่วงเวลากลางวันต่อกลางคืน เป็น 12:12 ชั่วโมง สามารถแสดงสมการตัวแปรช่วงแสง (ρ) ได้ดังนี้

$$\rho = \frac{\text{Photoperiod}}{12} \quad (3.6)$$

Cuenco et al. [11] ศึกษาพบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) มีความสัมพันธ์ต่อการกินอาหารของปลา คือ เมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำวิกฤต (DO_{crit}) ปลาจะกินอาหารน้อยลง และเมื่อค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลงถึงค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (DO_{min}) ปลาจะหยุดกินอาหาร ซึ่ง Bolte et al. [7] ได้แสดงฟังก์ชัน δ ของตัวแปรค่าออกซิเจนละลายน้ำ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำกับการกินอาหารของปลา ไว้ดังนี้

$$\delta = \begin{cases} 0.0 & ; DO < DO_{\min} \\ (DO - DO_{\min}) / (DO_{\text{crit}} - DO_{\min}) & ; DO_{\min} \leq DO \leq DO_{\text{crit}} \\ 1.0 & ; DO > DO_{\text{crit}} \end{cases} \quad (3.7)$$

โดยที่ δ จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากภาพที่ 3.3 แสดงตัวอย่างกราฟของ δ เมื่อกำหนดให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำวิกฤต และค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ เท่ากับ 1.0 และ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

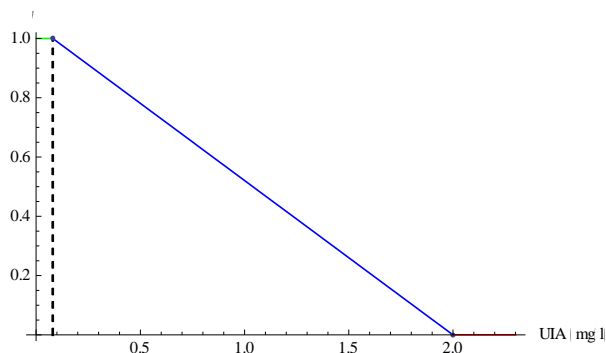


ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงกราฟของ δ เมื่อ $DO_{crit} = 1.0 \text{ mg/l}$ และ $DO_{min} = 0.3 \text{ mg/l}$

Colt และ Armstrong [10] และ Cuenco et al. [11] ได้เสนอว่าแอมโมเนียไม่แตกตัว (UIA) ในน้ำ มีความสัมพันธ์กับการกินอาหารของปลา คือ เมื่อแอมโมเนียไม่แตกตัวมีค่ามากกว่าแอมโมเนียไม่แตกตัววิกฤต (UIA_{crit}) ปลาจะกินอาหารลดลง และเมื่อแอมโมเนียไม่แตกตัวเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแอมโมเนียไม่แตกตัวที่มากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (UIA_{max}) ปลาจะหยุดกินอาหาร ซึ่ง Bolte et al. [7] ได้แสดงฟังก์ชัน v ของตัวแปรแอมโมเนียไม่แตกตัว เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียไม่แตกตัวกับการกินอาหารของปลา ไว้ดังนี้

$$v = \begin{cases} 1.0 & ; UIA < UIA_{crit} \\ (UIA_{max} - UIA) / (UIA_{max} - UIA_{crit}) & ; UIA_{crit} \leq UIA \leq UIA_{max} \\ 0.0 & ; UIA > UIA_{max} \end{cases} \quad (3.8)$$

โดยที่ v จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากภาพที่ 3.4 แสดงตัวอย่างกราฟของ v เมื่อกำหนดให้แอมโมเนียไม่แตกตัววิกฤต และแอมโมเนียไม่แตกตัวที่มากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ เท่ากับ 0.08 และ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงกราฟของ v เมื่อ $UIA_{crit} = 0.08 \text{ mg/l}$ และ $UIA_{max} = 2.0 \text{ mg/l}$

Ivlev [17] ได้แสดงสมการของระดับการกินอาหารสัมพันธ์ ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ และผลผลิตหรือน้ำหนักปลาทั้งหมดที่มีอยู่ ไว้ดังนี้

$$f = \frac{r}{R} = 1 - e^{-s\left(\frac{P}{B}\right)} \quad (3.9)$$

เมื่อ f คือ ระดับการกินอาหารสัมพันธ์

r คือ ปริมาณการกินอาหารจริงของปลาต่อวัน (กรัม/วัน)

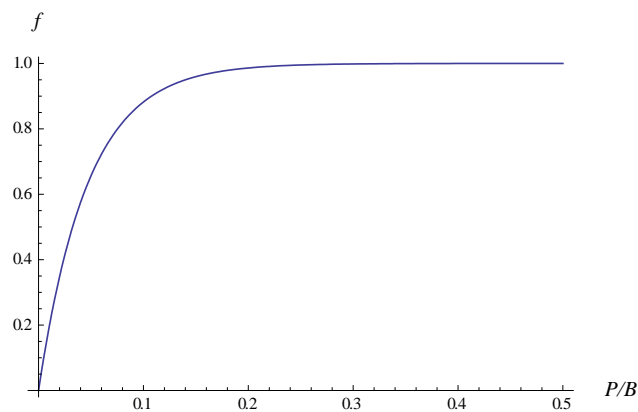
R คือ ปริมาณการกินอาหารสูงสุดของปลาต่อวัน (กรัม/วัน)

s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความได้สัดส่วนของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิต่ออาหารธรรมชาติ

P คือ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

B คือ ผลผลิตหรือน้ำหนักปลาทั้งหมดที่มีอยู่ (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

โดยจากภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างกราฟของ f กับ P/B เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความได้สัดส่วนของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิต่ออาหารธรรมชาติ เท่ากับ 21.38



ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงกราฟของ f กับ P/B เมื่อ $s = 21.38$

จากการศึกษาของ Yi [27] การเติบโตของปลานิลในบ่อที่เติมปุ๋ย มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับค่าความเป็นด่าง (CaCO_3) ซึ่งเป็นสารประกอบของคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่า การเติบโตของสาหร่ายซึ่งเป็นอาหารธรรมชาติของปลานิล ต้องใช้ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 40 ต่อ 7 ต่อ 1 ดังนั้นแม้ว่าในแหล่งน้ำจะมีปริมาณไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัส แต่หากปริมาณคาร์บอนมีไม่เพียงพอในอัตราส่วนดังกล่าว ก็อาจส่งผลให้สาหร่ายเติบโตได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรือในกรณีที่ในแหล่งน้ำจะมีปริมาณคาร์บอนสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัส น้อยเกินไป ก็อาจส่งผลให้สาหร่ายเติบโตได้เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้น Yi [27] จึงตั้งสมมติฐานว่า คาร์บอนเป็นแร่ธาตุหลักที่ควบคุมปริมาณอาหารธรรมชาติของแหล่งน้ำ และคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ (P) จากน้ำหนักเทียบเท่าคาร์บอนที่มีปริมาณน้อยที่สุด ที่คำนวณได้จาก คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส อนินทรีย์รวมละลายน้ำ ดังนี้

$$P = \min(P_c, P_n, P_p) \quad (3.10)$$

เมื่อ P_c คือ ปริมาณเทียบเท่าคาร์บอนที่คำนวณจากคาร์บอนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (กรัม/ลบ.ม.ค)

P_n คือ ปริมาณเทียบเท่าคาร์บอนที่คำนวณจากไนโตรเจนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (กรัม/ลบ.ม.ค)

P_p คือ ปริมาณเทียบเท่าคาร์บอนที่คำนวณจากฟอสฟอรัสอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (กรัม/ลบ.ม.ค)

และใช้สมการของ Lannan [19] คำนวณค่า P_c ได้ดังนี้

$$P_c = \lambda \left(\frac{12A}{50} \right) \left\{ \frac{(H^+)^2 / k_1 + H^+ + k_2}{H^+ + 2k_2} \right\} \quad (3.11)$$

เมื่อ λ คือ ค่าประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอน ซึ่งคำนวณจากสัดส่วนของคาร์บอนอนินทรีย์รวมละลายน้ำที่สามารถใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ ($\lambda = \text{Photoperiod}/24$)

A คือ ความเป็นด่าง (มิลลิกรัม/ลิตร CaCO_3)

H^+ คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (โมล/ลิตร)

k_1 คือ ค่าคงตัวการแตกตัวครั้งที่หนึ่งสำหรับระบบคาร์บอเนต/ไบคาร์บอเนต

k_2 คือ ค่าคงตัวการแตกตัวครั้งที่สองสำหรับระบบคาร์บอเนต/ไบคาร์บอเนต

$$k_1 = \left(\frac{T}{15} + 2.6 \right) \times 10^{-7} \quad (3.12)$$

$$k_2 = \left(\frac{T}{10} + 2.2 \right) \times 10^{-11} \quad (3.13)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิน้ำ

ในขณะที่คำนวณค่า P_n โดย

$$P_n = \frac{40}{7} \text{DIN} \quad (3.14)$$

เมื่อ DIN คือ ไนโตรเจนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร N)

และคำนวณค่า P_p โดย

$$P_p = 40 \text{DIP} \quad (3.15)$$

เมื่อ DIP คือ ฟอสฟอรัสอนินทรีย์รวมละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร P)

โดยค่าคงที่ 40 และ 7 ใน (3.14) และ (3.15) มาจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแร่ธาตุที่สาหร่ายใช้เพื่อการเจริญเติบโต คือ คาร์บอน:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 40:7:1

ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ

จากการบันทึกข้อมูลพบว่า ช่วงแสงเท่ากับ 12.5 ชั่วโมง วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.5 อุณหภูมิน้ำ 31.3 °C ความเป็นต่าง 124 มิลลิกรัม/ลิตร แอมโมเนียไม่แตกตัว 1.13 มิลลิกรัม/ลิตร ไนเตรท 0.65 มิลลิกรัม/ลิตร และออร์โธฟอสเฟต 0.59 มิลลิกรัม แต่ไม่พบไนไตรท์ (เนื่องจากค่าออกซิเจนในน้ำมีปริมาณสูงเพียงพอ จึงไม่เกิดการสะสมของไนไตรท์จากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน)

สามารถคำนวณค่า P_c ได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จากช่วงแสง สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนได้เป็น

$$\lambda = \frac{12.5}{24} = 0.52$$

- 2) จากค่าความเป็นกรด-ด่าง สามารถคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนด้วย (1.2) จะได้ว่า

$$H^+ = 10^{-8.5} \quad \text{โมล/ลิตร}$$

- 3) จากอุณหภูมิน้ำ สามารถคำนวณค่าคงตัวการแตกตัวครั้งที่หนึ่งสำหรับระบบคาร์บอเนต/ไบคาร์บอเนต และค่าคงตัวการแตกตัวครั้งที่สองสำหรับระบบคาร์บอเนต/ไบคาร์บอเนต ด้วย (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ จะได้ว่า

$$k_1 = \left(\frac{31.3}{15} + 2.6 \right) \times 10^{-7} = 4.69 \times 10^{-7}$$

$$k_2 = \left(\frac{31.3}{10} + 2.2 \right) \times 10^{-11} = 5.33 \times 10^{-11}$$

- 4) จาก 1) ถึง 3) และความเป็นต่าง สามารถคำนวณค่า P_c ด้วย (3.11) ได้เป็น

$$P_c = (0.52) \left(\frac{12(124)}{50} \right) \left\{ \frac{(10^{-8.5})^2 / (4.69 \times 10^{-7}) + (10^{-8.5}) + (5.33 \times 10^{-11})}{(10^{-8.5}) + 2(5.33 \times 10^{-11})} \right\}$$

$$= 15.32 \quad \text{กรัม/ลบ.ม. C}$$

สามารถคำนวณค่า P_n ได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จากอุณหภูมิน้ำ และ (1.5) จะได้

$$pK = 0.09018 + \frac{2729.92}{273.2 + 31.3} = 9.06$$

และจาก pK และค่าความเป็นกรด-ด่าง สามารถคำนวณสัดส่วนของแอมโมเนียไม่แตกตัวในแอมโมเนียรวม ด้วย (1.4) ได้เป็น

$$f_{\text{NH}_3} = \frac{1}{1 + 10^{9.06 - 31.1}} = 0.22$$

- 2) จากแอมโมเนียไม่แตกตัว สามารถคำนวณแอมโมเนียแตกตัว ด้วย (1.6) ได้เป็น

$$\text{NH}_4^+ = \left(\frac{1-0.22}{0.22} \right) \times 1.13 = 4.06 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร}$$

- 3) จากแอมโมเนียแตกตัวและไนเตรท จะได้ปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ เป็น

$$\text{DIN} = 4.06 + 0.65 = 4.71 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร N}$$

- 4) จากปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์รวมละลายน้ำ สามารถคำนวณค่า P_n ด้วย (3.14) ได้เป็น

$$P_n = \frac{40}{7}(4.71) = 26.91 \quad \text{กรัม/ลบ.ม. C}$$

สามารถคำนวณค่า P_p ได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จากออร์โทฟอสเฟต จะได้ปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์รวมละลายน้ำ เป็น

$$\text{DIP} = 0.59 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร P}$$

- 2) จากปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์รวมละลายน้ำ สามารถคำนวณค่า P_p ด้วย (3.15) ได้เป็น

$$P_p = 40(0.59) = 23.6 \quad \text{กรัม/ลบ.ม. C}$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ ด้วย (3.10) ได้เป็น

$$P = \min(15.32, 26.91, 23.6) = 15.32 \quad \text{กรัม/ลบ.ม. C}$$

จากตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิดังกล่าว สังเกตว่าแม้สำหรับ จะต้องการคาร์บอนเพื่อการเติบโตในสัดส่วนที่มากที่สุดคือ 40 ส่วน เมื่อเทียบกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส คือ 7 ส่วน และ 1 ส่วน ตามลำดับ แต่มีความเป็นไปได้ที่คาร์บอนจะเป็นแร่ธาตุที่มีปริมาณน้อยที่สุดและเป็นตัวกำหนดปริมาณอาหารในธรรมชาติของแหล่งน้ำดังกล่าวข้างต้น

Brett et al. [8] ศึกษาพบว่าตัวแปรในสิ่งแวดล้อมมีผลต่อการกินอาหารของปลา คือ ถ้าตัวแปรในสิ่งแวดล้อมมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปลา จะทำให้ปลากินอาหารได้เป็นปกติ แต่ในทางกลับกัน หากตัวแปรในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป จะทำให้ปลาหยุดกินอาหารหรือกินได้น้อยกว่าปกติ ซึ่ง Yi [27] พบว่า อุณหภูมิ น้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ แอมโมเนีย และระดับการกินอาหารสัมพันธ์ที่คำนวณจากปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส คือ ตัวแปรในธรรมชาติที่มีผลต่ออัตราการกินอาหารของปลา ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย (3.4) – (3.15) และแสดงสมการอัตราการกินอาหารของปลาต่อวันในรูป

$$\frac{dR}{dt} = \tau \rho \delta v f h W^m \quad (3.16)$$

เมื่อ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการกินอาหาร (กรัม^{1-m}/วัน)

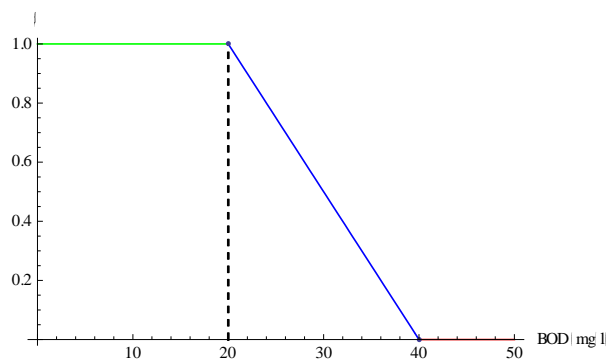
จาก (3.3) และ (3.16) จึงได้แบบจำลองการเติบโตของปลาในรูป

$$\frac{dW}{dt} = (1-a)b\tau\rho\delta\nu fhW^m - kW^n \quad (3.17)$$

Dampin et al. [12] อธิบายว่าค่าความสกปรกของน้ำ (BOD) มีผลต่อการกินอาหารของปลา คือ เมื่อค่าความสกปรกของน้ำมีค่ามากกว่าค่าความสกปรกของน้ำวิกฤต (BOD_{crit}) ปลาจะกินอาหารลดลง และเมื่อค่าความสกปรกของน้ำเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าค่าความสกปรกของน้ำมากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (BOD_{max}) ปลาจะหยุดกินอาหาร และได้แสดงฟังก์ชัน β ของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสกปรกของน้ำกับการกินอาหารของปลา ไว้ดังนี้

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & ; BOD < BOD_{crit} \\ (BOD_{max} - BOD) / (BOD_{max} - BOD_{crit}) & ; BOD_{crit} \leq BOD \leq BOD_{max} \\ 0.0 & ; BOD > BOD_{max} \end{cases} \quad (3.18)$$

โดยที่ β จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากภาพที่ 3.6 แสดงตัวอย่างกราฟของ β เมื่อกำหนดให้ค่าความสกปรกของน้ำวิกฤต และค่าความสกปรกของน้ำมากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ เท่ากับ 20 และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 ภาพแสดงกราฟของ β เมื่อ $BOD_{crit} = 20$ mg/l และ $BOD_{max} = 40$ mg/l

Dampin et al. ได้ปรับปรุงแบบจำลอง (3.17) ของ Yi [27] โดยเพิ่มตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำจาก (3.18) ทำให้ได้แบบจำลองการเติบโตของปลาดังสมการ

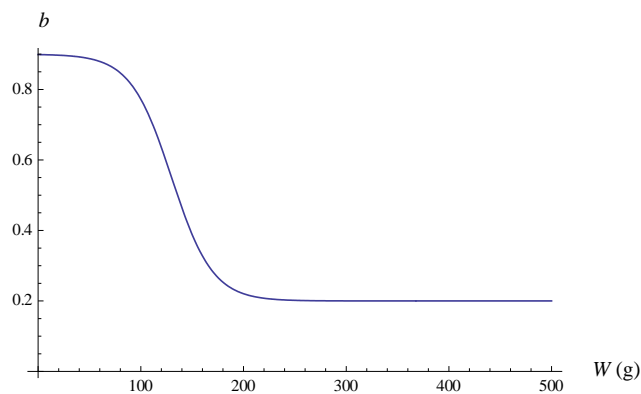
$$\frac{dW}{dt} = (1-a)b\tau\rho\delta\nu\beta fhW^m - kW^n \quad (3.19)$$

นอกจากนี้ Dampin et al. ยังได้เปลี่ยนแปลงการคำนวณปริมาณอาหารในธรรมชาติโดยคำนวณจากปริมาณแพลงก์ตอนในน้ำ และเปลี่ยนค่าประสิทธิภาพของการดูดซึมอาหาร ซึ่งจากเดิมในแบบจำลองของ Yi [27] กำหนดให้เท่ากับ 0.62 ให้กลายเป็นฟังก์ชันที่มีน้ำหนักปลาเป็นตัวแปรดังนี้

$$b = d - \frac{c}{1 + e^{-\varepsilon(W-T_c)}} \quad (3.20)$$

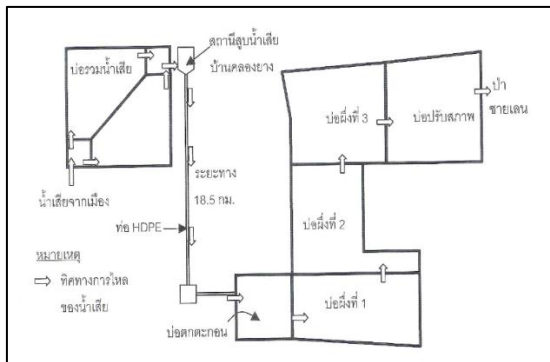
- เมื่อ W คือ น้ำหนักปลา (กรัม)
 ε คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดถึงค่าต่ำสุดของ b (กรัม⁻¹)
 T_c คือ ช่วงเวลาเปลี่ยนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ b (เป็นค่าที่ปรับได้)
 c และ d คือ ค่าคงตัวซึ่ง $d - c \leq b \leq d$

โดยจากภาพที่ 3.7 แสดงตัวอย่างกราฟของ b เมื่อกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดถึงค่าต่ำสุดของ b , ช่วงเวลาเปลี่ยนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ b , ค่าคงที่ c และ d เท่ากับ 0.05, 130, 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงกราฟของ b เมื่อ $\varepsilon = 0.05$, $T_c = 130$, $c = 0.7$ และ $d = 0.9$

ที่ "โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี" ได้มีการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนโดยวิธีการทางธรรมชาติ ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวประกอบด้วยบ่อดิน 5 บ่อที่ต่อกันแบบอนุกรม ได้แก่ บ่อที่ 1 เป็นบ่อดกตะกอน (sedimentation pond) บ่อที่ 2 – 4 เป็นบ่อฝ่ิง (oxidation ponds) และบ่อที่ 5 เป็นบ่อปรับสภาพหรือบ่อป้อม (maturaion หรือ polishing pond) โดยรับน้ำเสียที่ต้องการบำบัดจากชุมชนในเขตเทศบาลเมืองเพชรบุรี ที่มีปริมาณมากกว่า 4,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน และถูกรวบรวมมายังบ่อรวมน้ำเสีย (sump pond) บริเวณบ้านคลองยาง จากนั้นได้ส่งน้ำเสียต่อไปที่โครงการฯ ผ่านระบบท่อ HDPE (High Density Polyethylene) เป็นระยะทาง 18.5 กิโลเมตร โดยน้ำเสียดังกล่าวจะเริ่มต้นบำบัดโดยการพักน้ำในบ่อดกตะกอน 5 วัน จากนั้นจึงใช้วิธีไหลล้นสูบ่อที่ 2 – 4 (บ่อฝ่ิงที่ 1 – 3) ซึ่งมีระยะพักน้ำ 13, 14, และ 14 วัน ตามลำดับ จากนั้นจึงใช้วิธีเดียวกันเพื่อถ่ายน้ำสูบ่อสุดท้าย คือ บ่อปรับสภาพ ซึ่งมีระยะพักน้ำ 16 วัน ก่อนจะปล่อยน้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วให้ไหลลงสู่ป่าชายเลนธรรมชาติต่อไป



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.8 ภาพแสดงบ่อน้ำบำบัดน้ำเสียในโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย

ภาพ (ก) แผนที่บ่อน้ำบำบัดน้ำเสียในโครงการฯ [5] ภาพ (ข) การเลี้ยงปลานิลแบบกระชังในบ่อฝังที่ 2 [12]

เนื่องจากในกระบวนการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำไปยังบ่อต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของ แพลงก์ตอน สาหร่าย และพืชน้ำ ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบคุณภาพน้ำ และใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์ ทางโครงการฯ จึงได้ทดลองเลี้ยงปลาน้ำจืดชนิดต่างๆ โดยไม่ให้อาหารในบ่อฝังที่ 1, 2 และ 3 พบว่าปลาบางชนิด เช่น ปลานิล สามารถเติบโตได้ดี

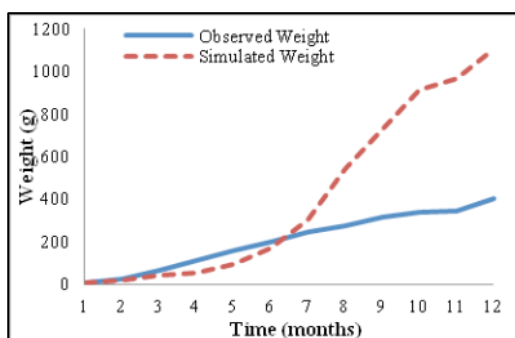
นฤชิต คำปิ่น [4] ได้ทำการทดลองเลี้ยงปลานิลแบบกระชังในบ่อน้ำบำบัดน้ำเสีย ที่ “โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี” โดยเลี้ยงปลาด้วยความหนาแน่น 1, 2, 3, 4 และ 5 ตัว ตามลำดับ ในกระชังเปิดที่วางตาข่ายถาวร ขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร และลึก 1.5 เมตร กลางบ่อน้ำบำบัดน้ำเสียบ่อที่ 3 (บ่อฝังที่ 2) ซึ่งเป็นบ่อที่มีคุณภาพน้ำและปริมาณอาหารที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลามากที่สุด โดยแบ่งความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงเป็นชุดทดลอง (treatments) จำนวน 5 ชุด แต่ละชุดทดลองมีการทดลองซ้ำ (replications) จำนวน 3 ชุด ระหว่างการเลี้ยงได้บันทึกข้อมูล น้ำหนัก (weight, g) ความยาวของปลา (length, cm) ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ (temperature, °C) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเป็นด่าง (alkalinity, mg/l) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO, mg/l) ไนเตรท (nitrate, mg/l) แอมโมเนียไม่แตกตัว (un-ionize ammonia, mg/l) ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate, mg/l) ค่าความสกปรกของน้ำ (BOD, mg/l) สารแขวนลอย (suspended solids, mg/l) และความหนาแน่นของแพลงก์ตอน (cell/m³) โดยทำการบันทึกข้อมูลดังกล่าวจากแต่ละกระชังทุก 1 เดือน ในช่วงเวลา 9.00 – 12.00 น. ตลอดระยะเวลาการทดลอง 1 ปี โดยสำหรับข้อมูลน้ำหนักปลา ได้ใช้วิธีการจับปลาทุกตัวในแต่ละกระชังเพื่อชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักปลา สำหรับข้อมูลความยาวปลา ได้ใช้วิธีการจับปลาทุกตัวในแต่ละกระชังเพื่อวัดความยาวจากปลายปากของปลาไปถึงปลายครีบหางของปลาด้วยไม้บรรทัด แล้วหาค่าเฉลี่ยของความยาวปลา สำหรับข้อมูลดัชนีที่วัดคุณภาพน้ำ ได้ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละกระชังที่ระดับความลึกของน้ำ 30 – 50 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องมือและวิธีการต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงดัชนีคุณภาพน้ำ การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ และการวิเคราะห์ [4]

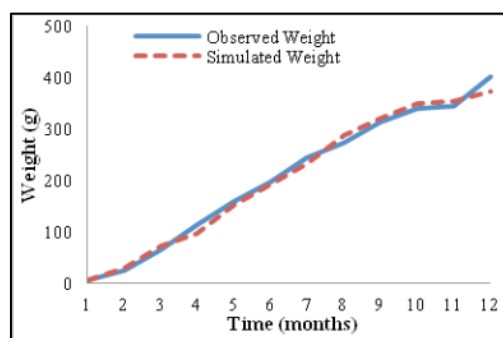
ดัชนีคุณภาพน้ำ	การเก็บรักษาตัวอย่าง	เครื่องมือและวิธีการ
1. อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	วิเคราะห์ภาคสนาม	เทอร์โมมิเตอร์
2. ความเป็นกรด-ด่าง	วิเคราะห์ภาคสนาม	pH-มิเตอร์
3. ความเป็นต่าง (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	วิธีการไตเตรท
4. ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l)	วิเคราะห์ภาคสนาม	DO-มิเตอร์
5. ไนเตรท (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	หลอดแคดเมียมรีดักชัน
6. แอมโมเนียไม่แตกตัว (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	วิธีการฟีนอล
7. ออร์โทฟอสเฟต (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	วิธีการกรดแอสคอบิก
8. ค่าความสกปรกของน้ำ (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	อะไซด์โมดิฟิเคชัน ที่ 20°C 5 วัน
9. สารแขวนลอย (mg/l)	แช่เย็นที่ 4°C	ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $103 - 105^{\circ}\text{C}$

สำหรับข้อมูลความหนาแน่นของแพลงก์ตอน ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละกระชังด้วยกระบอกเก็บน้ำความจุ 20 ลิตร จากนั้นกรองน้ำผ่านถุงกรองแพลงก์ตอนขนาดช่องตา 60 ไมครอน แล้วนำตัวอย่างแพลงก์ตอนที่ใส่ในขวดเก็บตัวอย่างเพื่อตองในน้ำยาฟอรัมาลิน เพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการชีววิทยาต่อไป

Dampin et al. [12] ใช้ข้อมูลการทดลองของ นฤชิต คำปิ่น [4] เพื่อทดสอบแบบจำลองโดยหาผลเฉลยเชิงตัวเลขของ (3.19) ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข รุงเงอ-คูทา อันดับ 4 โดย แทนค่าข้อมูลดัชนีคุณภาพน้ำจากกระชังปลาที่มีความหนาแน่นปลา 1 ตัวต่อตารางเมตร ใน (3.19) เพื่อหาน้ำหนักปลา และแสดงผลการเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลองกับน้ำหนักปลาจากข้อมูลจริงดังภาพที่ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองของ Yi [27] พบว่าแบบจำลองของ Dampin et al. [12] มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.9 ภาพแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลองและน้ำหนักปลาที่ได้จากการวัด [12]

ภาพ (ก) แบบจำลองของ Yi [27] และภาพ (ข) แบบจำลองของ Dampin et al. [12]

บทที่ 4

การปรับปรุงแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแบบจำลองการเติบโตของปลาไนจากแบบจำลองในอดีตที่ผ่านมา โดยเพิ่มการพิจารณาตัวแปรทางธรรมชาติและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองให้มีความเหมาะสมดังนี้

1) ตัวแปรในแบบจำลอง

จากบทที่ 3 แม้ว่าการเพิ่มตัวแปรค่าความสกปรกในแบบจำลองของ Dampin et al. [12] จะช่วยให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองของ Yi [27] แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าความสกปรกของน้ำเป็นค่าที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของแหล่งน้ำ โดยบ่งบอกถึงความต้องการออกซิเจนในน้ำของแบคทีเรีย ซึ่งในความเป็นจริง แม้ว่าแหล่งน้ำจะมีค่าความสกปรกสูง แต่หากค่าออกซิเจนละลายน้ำมีปริมาณสูงเพียงพอต่อความต้องการของปลา ค่าความสกปรกของน้ำจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโตน้อยลง ทำให้อิทธิพลของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำในแบบจำลองลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาค่าความสกปรกของน้ำด้วยฟังก์ชันตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำเพียงอย่างเดียว อาจทำให้แบบจำลองของ Dampin et al. [12] เกิดความคลาดเคลื่อน สังเกตจากข้อมูลในช่วงแรกของการเลี้ยงปลา ที่มีค่าความสกปรกของน้ำในกระชังปลาสูงประมาณ 24.00 – 42.50 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ในขณะเดียวกัน ค่าออกซิเจนในน้ำที่มีค่าประมาณ 10.37 – 16.13 มิลลิกรัม/ลิตร ถือว่ามากเพียงพอต่อการดำรงชีวิตของปลาไน จึงทำให้ค่าความสกปรกของน้ำดังกล่าวมีผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของปลาไนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในแบบจำลอง Dampin et al. [12] พบว่าตัวแปรค่าความสกปรก (β) ที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก จึงมีผลในการลดการเติบโตของปลาไนที่พยากรณ์ด้วยแบบจำลอง (3.19) สังเกตได้จากน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลองซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักปลาจริงมาก และทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในช่วงเวลาดังกล่าวจึงสูงถึงประมาณร้อยละ 26.92 – 72.79

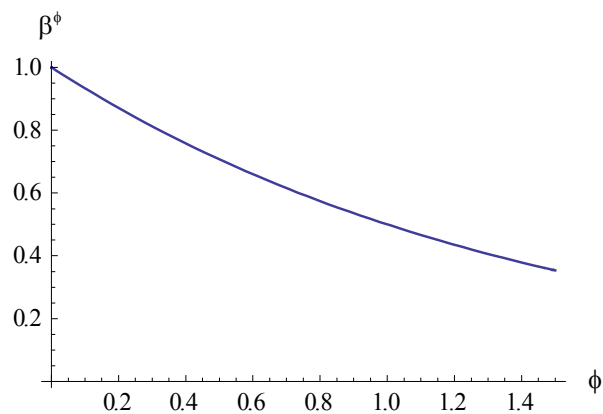
ดังนั้นจากแนวคิดที่ว่า ความแตกต่างต่างระหว่างค่าความสกปรกของน้ำกับค่าออกซิเจนละลายน้ำเป็นค่าที่ควบคุมอิทธิพลของค่าความสกปรกของน้ำที่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลา งานวิจัยนี้จึงเพิ่มการพิจารณาฟังก์ชันที่ควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่เรียกว่า “ค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ (ϕ)” ซึ่งแสดงได้ในรูป

$$\phi = \frac{BOD - DO}{BOD_{\max} - DO_{\min}} \quad (4.1)$$

โดย ϕ เป็นสัดส่วนของปริมาณออกซิเจนที่ขาดแคลนของแหล่งน้ำ ที่คำนวณจากผลต่างระหว่างค่าความสกปรกของน้ำกับค่าออกซิเจนละลายน้ำ ($BOD - DO$) ต่อปริมาณออกซิเจนที่ขาดแคลนของแหล่งน้ำ

ในกรณีที่ปลาไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ที่คำนวณจากผลต่างระหว่างค่าความสกปรกของน้ำสูงสุดกับค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุด ($BOD_{max} - DO_{min}$) ดังนั้นหากปริมาณออกซิเจนที่ขาดแคลนของแหล่งน้ำมีค่ามาก จะทำให้ ϕ มีค่ามาก ซึ่งหมายความว่าค่าความสกปรกของน้ำส่งผลเสียต่อปลามาก และทำให้ปลากินอาหารลดลง แต่หากปริมาณออกซิเจนที่ขาดแคลนของแหล่งน้ำมีค่าน้อย จะทำให้ ϕ มีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าค่าความสกปรกของน้ำส่งผลเสียต่อปลาน้อย และทำให้ปลา กินอาหารเพิ่มขึ้น

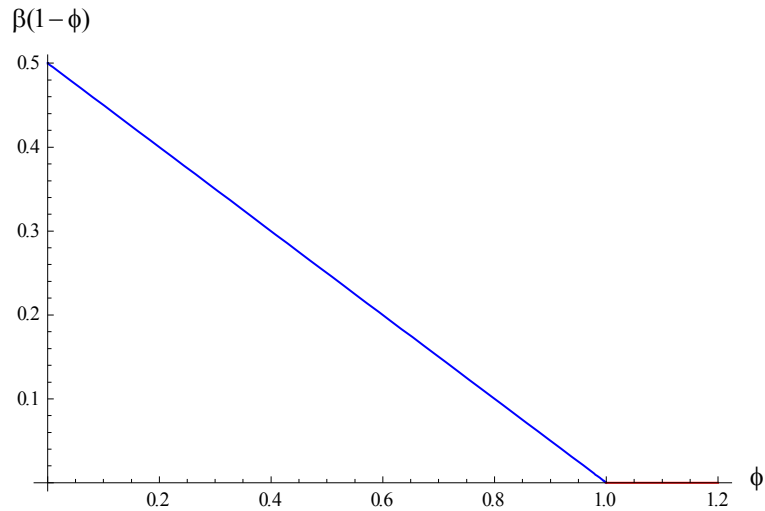
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำกับค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ พบว่าค่าของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่ยกกำลังด้วยค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ แปรผกผันกับค่าควบคุมค่าความสกปรกของน้ำ ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งแสดงกราฟของค่าของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำยกกำลังด้วยค่าควบคุมค่าความสกปรกของน้ำ ที่มีค่าลดลงเมื่อค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำเท่ากับ 0.5 กล่าวคือหากค่าควบคุมค่าความสกปรกของน้ำยังมีค่ามาก จะทำให้อิทธิพลของค่าความสกปรกของน้ำที่มีผลต่อการกินอาหารของปลามีค่ามากขึ้น หรือปลา กินอาหารได้น้อยลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าความสกปรกของน้ำที่มีผลต่อการกินอาหารของปลาในรูปแบบของ ตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ (3.18) ที่ยกกำลังด้วย ค่าควบคุมค่าความสกปรกของน้ำ (4.1) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการควบคุมอิทธิพลของค่าความสกปรกของน้ำที่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลาดังที่กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 4.1 ภาพแสดงกราฟของ β^ϕ เมื่อ $\beta = 0.5$

ทั้งนี้หากลองพิจารณาการดำเนินการระหว่างตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำกับค่าควบคุมค่าความสกปรกของน้ำในรูปแบบอื่นนอกเหนือจากรูปแบบของการยกกำลัง เช่น กรณีที่ค่าความสกปรกของน้ำคูณกับตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำในรูปแบบของ $\beta(1-\phi)$ เพื่อมีให้ $1-\phi$ เป็นจำนวนจริงลบ และทำให้อัตรากินอาหารของปลาต่อวันมีค่าเป็นจำนวนจริงลบ ซึ่งขัดแย้งกับความเป็นจริง จึงกำหนดฟังก์ชันของ ϕ ในรูป (4.2) และแสดงกราฟของ $\beta(1-\phi)$ เมื่อกำหนดให้ตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำเท่ากับ 0.5 ได้ดังภาพที่ 4.2

$$\phi = \begin{cases} \frac{\text{BOD} - \text{DO}}{\text{BOD}_{\max} - \text{DO}_{\min}} & ; \text{BOD} - \text{DO} \leq \text{BOD}_{\max} - \text{DO}_{\min} \\ 1 & ; \text{BOD} - \text{DO} > \text{BOD}_{\max} - \text{DO}_{\min} \end{cases} \quad (4.2)$$



ภาพที่ 4.2 ภาพแสดงกราฟของ $\beta(1-\phi)$ เมื่อ $\beta = 0.5$

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากราฟของ $\beta(1-\phi)$ มีแนวโน้มเดียวกับ β^ϕ แต่จากข้อมูลของ นฤชิต ตำปิ่น [4] เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัปลา ($\frac{dW}{dt}$), $\beta(1-\phi)$ และ β^ϕ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ $\frac{dW}{dt}$ กับ $\beta(1-\phi)$ เท่ากับ 0.0199 ซึ่งน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ $\frac{dW}{dt}$ กับ β^ϕ ที่เท่ากับ 0.0492 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงตั้งสมมติฐานให้ค่าความสกปรกของน้ำมีผลกระทบต่อ การกินอาหารและการเติบโตของปลานิลในรูปของ β^ϕ

สำหรับการคำนวณค่า β^ϕ สามารถแสดงตัวอย่างได้ ดังเช่นกรณีที่แหล่งน้ำที่เลี้ยงปลานิลมีค่าความสกปรกของน้ำเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อกำหนดให้ DO_{\min} , BOD_{crit} และ BOD_{\max} เท่ากับ 0.3, 20 และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ จะคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) คำนวณค่าของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ (β) ด้วย (3.18) ได้ว่า

$$\beta = \frac{40-30}{40-20} = 0.5$$

2) คำนวณค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ (ϕ) ด้วย (4.1) ได้ว่า 0.63

$$\phi = \frac{30-5}{40-0.3} = 0.63$$

3) จากข้อ 1) และ 2) จะได้ว่า

$$\beta^\phi = 0.5^{0.63} = 0.65$$

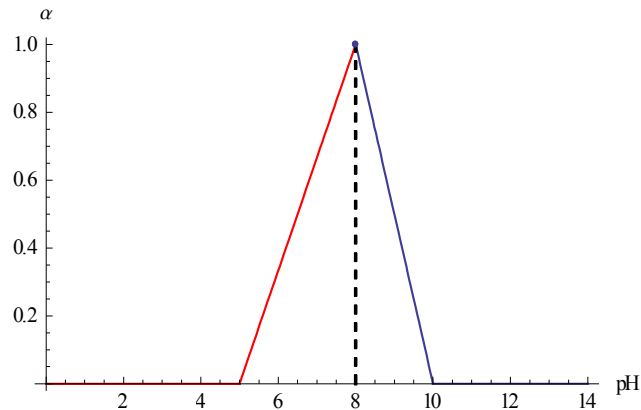
จากตัวอย่างข้างต้นสังเกตว่าแม้ค่าความสกปรกของน้ำสูงถึง 30 มิลลิกรัม/ลิตร แต่จากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถคำนวณค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำได้เท่ากับ 0.63 ทำให้ได้ตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่ถูกยกกำลังด้วยค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ เท่ากับ 0.65 ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่เท่ากับ 0.5 นั่นคือ เมื่อพิจารณาเพียงตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ ยกกำลังด้วยค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ พบว่า ปลากินอาหารมากกว่า การพิจารณาตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำมีโอกาสเป็นจำนวนจริงลบได้ แต่เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีสัตว์น้ำอาศัยอยู่ทั่วไป มีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงสุดประมาณ 15 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้กรณีนี้ที่ค่าความสกปรกของน้ำมีค่าน้อยกว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำ จะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าความสกปรกของน้ำมีค่าน้อยกว่า 15 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งน้อยกว่าค่าความสกปรกของน้ำวิกฤตที่กำหนดให้เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร และจาก (3.18) สามารถคำนวณค่าตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำได้เท่ากับ 1 ดังนั้น ค่าตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่ยกกำลังด้วยค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำที่เป็นจำนวนจริงลบ จึงมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าค่าความสกปรกของน้ำไม่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารของปลานั้นเอง

นอกจากนี้ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ยังเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพน้ำ งานวิจัยนี้จึงเพิ่มการพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างในแบบจำลองการเติบโตของปลานิล โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลกระทบต่อการกินอาหารของปลานิล ดังนั้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม (pH_{opt}) ปลาจะกินอาหารลดลง และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (pH_{max}) หรือน้อยกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ (pH_{min}) ปลาจะหยุดกินอาหาร และแสดงฟังก์ชัน α ของตัวแปรความเป็นกรด-ด่าง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างกับการกินอาหารของปลา ได้ดังนี้

$$\alpha = \begin{cases} 0.0 & ; pH < pH_{min} \\ (pH - pH_{min}) / (pH_{opt} - pH_{min}) & ; pH_{min} \leq pH \leq pH_{opt} \\ (pH_{max} - pH) / (pH_{max} - pH_{opt}) & ; pH_{opt} < pH \leq pH_{max} \\ 0.0 & ; pH > pH_{max} \end{cases} \quad (4.3)$$

โดยที่ α จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากภาพที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟของ α เมื่อกำหนดให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ค่าความเป็นกรด-ด่างมากที่สุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ และค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยสุดที่ปลาดำรงชีวิตอยู่ได้ เท่ากับ 8, 10 และ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงกราฟของ α เมื่อ $\text{pH}_{\text{opt}} = 8$, $\text{pH}_{\text{max}} = 10$ และ $\text{pH}_{\text{min}} = 5$

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแบบจำลองของ Dampin et al. [12] โดยเพิ่มพิจารณาค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ และตัวแปรค่าความเป็นกรด-ด่าง ใน (3.19) จึงได้แบบจำลองการเติบโตของปลาเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลาสำหรับงานวิจัยนี้ คือ

$$\frac{dW}{dt} = (1-a)b\tau\delta v\beta^{\phi}\alpha fhW^m - kW^n \quad (4.4)$$

ทั้งนี้ตัวแปรในธรรมชาติที่มีผลต่ออัตราการกินอาหารของปลา ได้แก่ ตัวแปรอุณหภูมิ ในฟังก์ชัน τ โดย (3.4) ตัวแปรค่าออกซิเจนละลายน้ำ ในฟังก์ชัน δ โดย (3.7) ตัวแปรแอมโมเนียไม่แตกตัว ในฟังก์ชัน v โดย (3.8) ตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ ในฟังก์ชัน β โดย (3.18) ค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ ในฟังก์ชัน ϕ โดย (4.1) ตัวแปรค่าความเป็นกรด-ด่าง ในฟังก์ชัน α โดย (4.3) และค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการสลายจากการอดอาหาร ในฟังก์ชัน k โดย (3.5)

สำหรับการคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซึมอาหารของปลา (b) จะใช้รูปแบบของฟังก์ชันที่ปรับปรุงจาก (3.20) ในรูป

$$b = d - \frac{c}{1 + e^{-\varepsilon(W - W_c)}} \quad (4.5)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักปลา (กรัม)

ε คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดถึงค่าต่ำสุดของ b (กรัม⁻¹)

W_c คือ ช่วงน้ำหนักเปลี่ยนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ b (เป็นค่าที่ปรับได้)

c และ d คือ ค่าคงตัวซึ่ง $d - c \leq b \leq d$

และคำนวณค่าระดับการกินอาหารสัมพันธ์ (f) จากสมการที่ปรับปรุงจาก (3.9) โดยเพิ่มตัวแปรความหนาแน่นของปลา ในรูป

$$f = 1 - e^{-s\left(\frac{P}{NW}\right)} \quad (4.6)$$

- เมื่อ s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความได้สัดส่วนของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิต่ออาหารธรรมชาติ
- P คือ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- W คือ น้ำหนักปลา (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- N คือ ความหนาแน่นของปลา (ตัว/ลูกบาศก์เมตร)

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ด้วยวิธีการของ Yi [27] ต่างจาก Dampin et al. [12] ซึ่งคำนวณจากความหนาแน่นของแพลงก์ตอน ทั้งนี้หากกำหนดให้

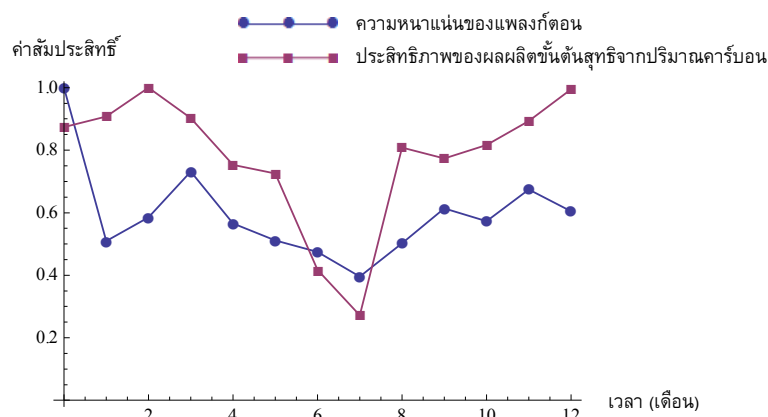
$$\text{สัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน} = \frac{Plk}{Plk_{\max}} \quad (4.7)$$

- เมื่อ Plk คือ ความหนาแน่นของแพลงก์ตอน (เซลล์/ลูกบาศก์เมตร)
- Plk_{\max} คือ ความหนาแน่นของแพลงก์ตอนที่มากที่สุด (เซลล์/ลูกบาศก์เมตร)

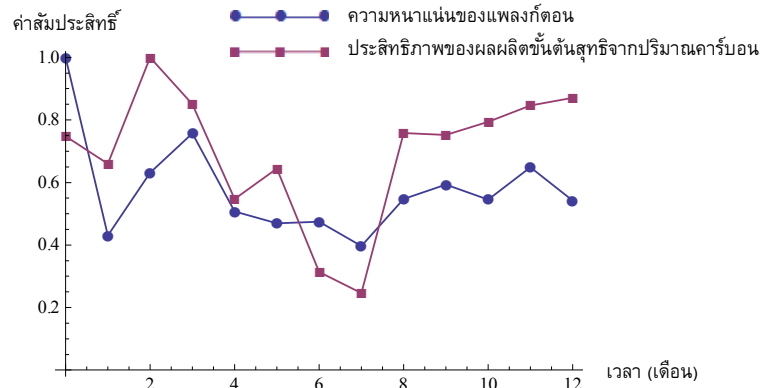
และ $\text{สัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน} = \frac{P}{P_{\max}} \quad (4.8)$

- เมื่อ P คือ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- P_{\max} คือ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอนที่มากที่สุด (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

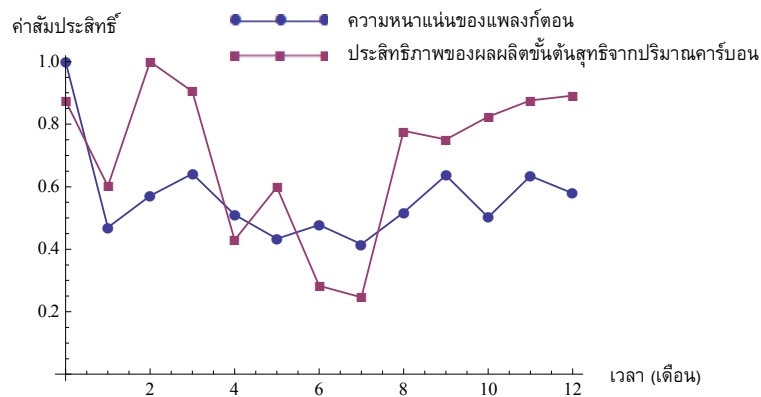
จากข้อมูลของ นฤชิต คำปิ่น [4] เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน จาก (4.7) และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอนจาก (4.8) สามารถแสดงด้วยกราฟดังต่อไปนี้



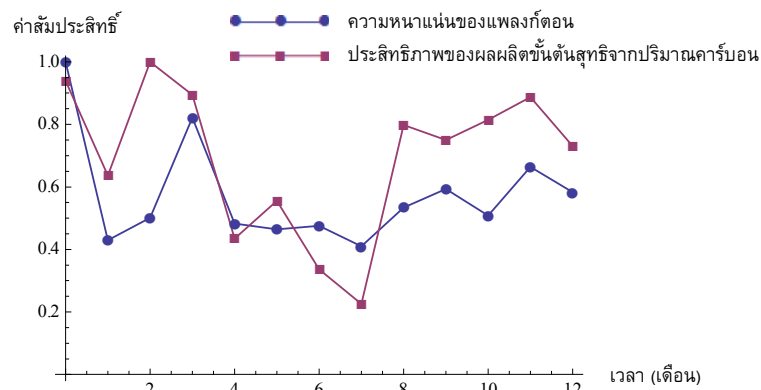
ภาพที่ 4.4 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร



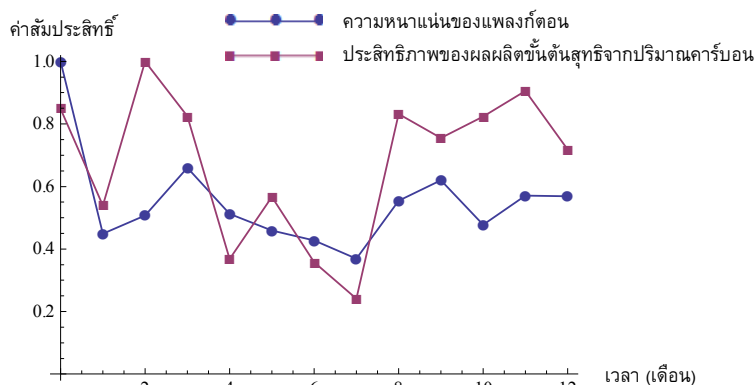
ภาพที่ 4.5 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 4.6 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 4.7 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 4.8 ภาพแสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร

จากกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่ทุกความหนาแน่นปลา สังเกตว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของความหนาแน่นของแพลงก์ตอน และปริมาณคาร์บอน โดยส่วนใหญ่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่เนื่องจากแพลงก์ตอนในน้ำมีหลากหลายชนิดและนับจำนวนที่แม่นยำได้ยาก การแปลงความหนาแน่นของแพลงก์ตอนเป็นน้ำหนักเพื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ จึงมีโอกาทำให้แบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจาก Yi [27] ที่พิจารณาจากปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเติบโตของสาหร่ายที่เป็นอาหารหลักในธรรมชาติของปลานิล แทนการพิจารณาจากความหนาแน่นของแพลงก์ตอนจาก Dampin et al. [12]

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบ

จากที่แบบจำลองของงานวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณาตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเติบโตของปลานิล ซึ่งทั้งหมดล้วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการกินอาหารของปลา ได้แก่ อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าออกซิเจนละลายน้ำ, ค่าความสกปรกของน้ำ, แอมโมเนียไม่แตกตัว และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิที่คำนวณจากปริมาณคาร์บอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) เพื่อยืนยันสมมติฐานที่ใช้คัดเลือกตัวแปรดังกล่าวที่พิจารณาในแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1) สร้างเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ใช้ข้อมูลที่ความหนาแน่นปลา 1 – 5 ตัว/ตารางเมตร ของ นฤชิต คำปิ่น [4] ได้แก่ อุณหภูมิ (Temp), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO), ค่าความสกปรกของน้ำ (BOD), แอมโมเนียไม่แตกตัว (NH₃), สารแขวนลอย (SS), แพลงก์ตอน (Plk) และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน (P) ที่คำนวณจากค่าความเป็นต่าง แอมโมเนียแตกตัว ไนเตรท และออร์โธฟอสเฟต โดย

สร้างเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ดังตารางที่ 4.1 เพื่อคำนวณค่า KMO (Kaiser – Mayer - Olkin) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยค่า KMO ที่ได้จากข้อมูลนี้เท่ากับ 0.557 มากกว่า 0.5 จึงจัดว่าข้อมูลดังกล่าวเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ [37]

ตารางที่ 4.1 : ตารางแสดงเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

	Temp	pH	DO	BOD	NH3	SS	Plk	P
Temp	1.000	0.454	0.142	0.073	-0.073	0.206	-0.554	-0.625
pH	0.454	1.000	0.532	0.317	-0.686	0.610	-0.299	-0.536
DO	0.142	0.532	1.000	0.670	-0.297	0.326	-0.267	0.032
BOD	0.073	0.317	0.670	1.000	-0.055	0.337	-0.551	0.080
NH3	-0.073	-0.686	-0.297	-0.055	1.000	-0.545	0.191	0.578
SS	0.206	0.610	0.326	0.337	-0.545	1.000	-0.360	-0.434
Plk	-0.554	-0.299	-0.267	-0.551	0.191	-0.360	1.000	0.507
P	-0.625	-0.536	0.032	0.080	0.578	-0.434	0.507	1.000

2.2) สกัดองค์ประกอบ

จำแนกตัวแปรออกเป็นกลุ่มที่เรียกว่า องค์ประกอบ (Component) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ แล้วจัดตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันทั้งแบบแปรผันตรงหรือแปรผกผัน ให้อยู่ในองค์ประกอบเดียวกัน โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกสกัดองค์ประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis : PCA) โดยพิจารณาจากค่าเจาะจง (Eigenvalue) ที่คำนวณจากเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบ

ตารางที่ 4.2 : ตารางแสดงตารางผลการสกัดองค์ประกอบ

Component	Eigenvalues		
	Total	% of Variance	Cumulative %
1	3.818	42.425	42.425
2	2.275	25.275	67.700
3	1.289	14.321	82.021
4	0.654	7.272	89.292
5	0.450	5.004	94.297
6	0.203	2.256	96.553
7	0.161	1.788	98.341
8	0.099	1.105	99.446
9	0.050	0.554	100.000

จากผลการสกัดองค์ประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก สามารถสกัดองค์ประกอบจากข้อมูลได้เป็น 9 องค์ประกอบ ที่แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 แต่เพื่อลดจำนวนองค์ประกอบให้เหลือเฉพาะองค์ประกอบที่สำคัญ จึงต้องเลือกจำนวนองค์ประกอบของข้อมูลชุดนี้ โดยพิจารณาจากจำนวนองค์ประกอบที่มีค่าเจาะจงมากกว่า 1 ซึ่งจากผลการสกัดองค์ประกอบดังกล่าว พบว่ามีองค์ประกอบที่มีค่าเจาะจงมากกว่า 1 อยู่ 3 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล (Variance) ได้ร้อยละ 42.425, 25.275 และ 14.321 ตามลำดับ และเมื่อรวมความแปรปรวนของทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ จะสามารถอธิบายความแปรปรวนร่วม (Cumulative) ของข้อมูลได้ร้อยละ 82.021 ดังนั้นจากผลการสกัดองค์ประกอบจึงสามารถแบ่งตัวแปรจากข้อมูลทั้งหมดได้เป็น 3 องค์ประกอบที่สำคัญ

2.3) หมุนแกนองค์ประกอบ

ขั้นตอนต่อไปคือการหมุนแกนองค์ประกอบโดยวิธีหมุนแกนเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Rotation) ซึ่งเป็นการหมุนแกนองค์ประกอบให้อยู่ใกล้ตัวแปรมากขึ้นเพื่อให้สามารถจำแนกตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่ในองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งได้อย่างชัดเจน ซึ่งการจำแนกตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่ในองค์ประกอบต่างๆ จะพิจารณาจากค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวกับองค์ประกอบ หรือค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (Factor Loading) ที่มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 โดยหากตัวแปรใดมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ เข้าใกล้ 1 หมายความว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับองค์ประกอบนั้น ในทางตรงกันข้าม หากตัวแปรใดมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเข้าใกล้ -1 หมายความว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงข้ามกับองค์ประกอบนั้น ทั้งนี้สามารถแสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบของแต่ละตัวแปรได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 : ตารางแสดงตารางค่าน้ำหนักองค์ประกอบ

	Component		
	1	2	3
Temp	0.112	-0.891	0.012
pH	0.800	-0.283	0.304
DO	0.317	0.026	0.828
BOD	0.016	-0.147	0.939
NH3	-0.926	0.036	-0.011
SS	0.708	-0.191	0.299
Plk	-0.065	0.787	-0.435
P	-0.578	0.713	0.249

2.4) เลือกค่าน้ำหนักองค์ประกอบและตั้งชื่อองค์ประกอบ

จากค่าน้ำหนักองค์ประกอบของแต่ละตัวแปรในตารางที่ 4.3 สามารถจำแนกตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่ องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งได้ โดยพิจารณาจากค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่เข้าใกล้ 1 หรือ -1 มากที่สุด และสามารถตั้งชื่อหรือให้ความหมายแต่ละองค์ประกอบได้ โดยพิจารณาจากตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ใน องค์ประกอบนั้น ดังต่อไปนี้

1) องค์ประกอบที่ 1 ประกอบไปด้วยตัวแปร ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง แอมโมเนียไม่แตกตัว และสารแขวนลอย และเมื่อพิจารณาจากตัวแปรแอมโมเนียไม่แตกตัวที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเข้าใกล้ -1 มากที่สุด จึงตั้งชื่อองค์ประกอบนี้ว่า “แอมโมเนียไม่แตกตัว”

2) องค์ประกอบที่ 2 ประกอบไปด้วยตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ แพลงก์ตอน และประสิทธิภาพของ ผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน และเมื่อพิจารณาจากตัวแปรแพลงก์ตอน และประสิทธิภาพของ ผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน ที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเข้าใกล้ 1 เหมือนกันทั้งคู่ จึงตั้งชื่อ องค์ประกอบนี้ว่า “อาหาร”

3) องค์ประกอบที่ 3 ประกอบไปด้วยตัวแปร ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความสกปรก ของน้ำ และเมื่อพิจารณาจากตัวแปรค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความสกปรกของน้ำ ที่มีค่าน้ำหนัก องค์ประกอบเข้าใกล้ 1 เหมือนกันทั้งคู่ จึงตั้งชื่อองค์ประกอบนี้ว่า “ออกซิเจน”

2.5) คัดเลือกตัวแปรจากแต่ละองค์ประกอบ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดังกล่าว สามารถอธิบายเหตุผลเพื่อยืนยันการคัดเลือกตัวแปรที่ พิจารณาในแบบจำลอง จากค่าน้ำหนักองค์ประกอบของแต่ละตัวแปร ได้ดังนี้

1) จากองค์ประกอบแอมโมเนียไม่แตกตัว พบว่าแอมโมเนียไม่แตกตัว และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงสุด 2 อันดับแรก จึงถือเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงในองค์ประกอบนี้ และจากความรู้พื้นฐานที่ว่าแอมโมเนียไม่แตกตัว และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การเติบโตของปลา ดังนั้นการเลือกสองตัวแปรนี้เพื่อพิจารณาในแบบจำลองจึงสมเหตุสมผล ในขณะที่สารแขวนลอย เป็นตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบน้อยที่สุด ประกอบกับความรู้พื้นฐานที่ว่าสารแขวนลอย เป็นดัชนีที่ใช้วัดคุณภาพน้ำ ที่ไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเติบโตของปลา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงตัดตัวแปร สารแขวนลอยจากการพิจารณาในแบบจำลอง

2) จากองค์ประกอบอาหาร สามารถเรียงลำดับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบนี้จากมากไปน้อย ตามค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ได้เป็น อุณหภูมิ แพลงก์ตอน และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจาก

ปริมาณคาร์บอน ดังนั้นแบบจำลองที่พิจารณาตัวแปรอุณหภูมิซึ่งมีผลโดยตรงต่อการกินอาหารของปลา จึงถือว่าสมเหตุสมผล นอกจากนี้ จากค่าน้ำหนักองค์ประกอบของแพลงก์ตอนและประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอนที่เป็นบวกทั้งคู่ ทำให้สรุปได้ว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้แม้ว่าตัวแปรแพลงก์ตอนจะมีอิทธิพลในองค์ประกอบอาหาร สูงกว่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน แต่งานวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณาตัวแปรประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากปริมาณคาร์บอน แทนการพิจารณาแพลงก์ตอน เนื่องจากการคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิจากแพลงก์ตอน มีโอกาสทำให้แบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนสูงดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อการปรับปรุงแบบจำลอง

3) เนื่องจากองค์ประกอบออกซิเจน ที่ประกอบด้วยตัวแปรเพียงสองตัว คือ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความสกปรกของน้ำ ล้วนเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อการเติบโตของปลา ดังนั้นการพิจารณาตัวแปรค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความสกปรกของน้ำในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ จึงสมเหตุสมผล

3) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง (4.4) ที่ปรับปรุงใหม่ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

Ursin [25] กำหนดให้ m เท่ากับ 0.67 และ Nath et al. [20] กำหนดให้ a และ n เท่ากับ 0.53 และ 0.81 ตามลำดับ ขณะที่ Bolte et al. [7] ใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นหาค่าของ h เท่ากับ 0.8 กรัม^{1-m}/วัน

Gannam และ Phillip [15] ทดลองเลี้ยงปลานิลและได้ข้อสรุปว่า T_{min} เท่ากับ 15 °C ขณะที่ Denzer [13] ทดลองพบว่า T_{max} เท่ากับ 41 °C และ Caulton [9] เสนอว่า T_{opt} เท่ากับ 33 °C

Nath et al. [20] กำหนดให้ j และ k_{min} เท่ากับ 0.0132 1/°C และ 0.00133 กรัม¹⁻ⁿ/วัน ตามลำดับ

Ahmed และ Magid [6] ได้เสนอว่า DO_{min} เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร และ Teichert-Coddington และ Green [24] ได้เสนอว่า DO_{crit} เท่ากับ 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร

Popma และ Masser [21] เสนอว่า UIA_{opt} เท่ากับ 0.08 มิลลิกรัม/ลิตร และ UIA_{max} เท่ากับ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร

Dampin et al. [12] ทดลองเลี้ยงปลานิลในบ่อบำบัดน้ำเสียพบว่า BOD_{opt} และ BOD_{max} เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และกำหนดให้ c , d , W_c และ ϵ เท่ากับ 0.7, 0.9, 130 และ 0.05 ตามลำดับ

El-Sherif และ El-Feky [14] ทดลองเลี้ยงปลานิลพบว่า pH_{opt} เท่ากับ 8 ขณะที่ Popma และ Masser [21] เสนอว่า pH_{min} และ pH_{max} เท่ากับ 5 และ 10 ตามลำดับ

จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	ที่มา
a	0.53	Nath et al. [20]
m	0.67	Ursin [25]
n	0.81	Nath et al. [20]
c	0.7	Dampin et al. [12]
d	0.9	Dampin et al. [12]
W_c	130	Dampin et al. [12]
ε	0.05	Dampin et al. [12]
h	0.8	Bolte et al. [7]
s	21.38	Dampin et al. [12]
j	0.0132	Nath et al. [20]
k_{\min}	0.00133	Nath et al. [20]
T_{\min}	15	Gannam และ Phillip [15]
T_{\max}	41	Denzer [13]
T_{opt}	33	Caulton [9]
DO_{crit}	1.0	Teichert-Coddington และ Green [24]
DO_{\min}	0.3	Ahmed และ Magid [6]
UIA_{crit}	0.08	Popma และ Masser [21]
UIA_{\max}	2.0	Popma และ Masser [21]
BOD_{crit}	20	Dampin et al. [12]
BOD_{\max}	40	Dampin et al. [12]
pH_{\min}	5	Popma และ Masser [21]
pH_{\max}	10	Popma และ Masser [21]
pH_{opt}	8	El-Sherif และ El-Feky [14]

บทที่ 5

การทดสอบแบบจำลอง

ในบทนี้จะแสดงผลของการทดสอบแบบจำลองการเติบโตของปลาในเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลาจากแบบจำลองที่ปรับปรุงขึ้นในงานวิจัยนี้ และเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองที่ปรับปรุงขึ้น กับแบบจำลองของ Yi [27] และ Dampin et al. [12]

ข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลองในงานวิจัยนี้ มาจากข้อมูลการทดลองของ นฤชิต ดำปิ่น [4] ซึ่งทดลองเลี้ยงปลานิลแบบกระชังโดยไม่ให้อาหาร ในบ่อบำบัดน้ำเสียที่ "โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี" โดยแบ่งความหนาแน่นของปลาเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 ตัว/ตารางเมตร และเก็บข้อมูลน้ำหนัก ความยาวปลา และดัชนีคุณภาพน้ำ ด้วยวิธีการที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งข้อมูลดัชนีคุณภาพน้ำดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาน้ำหนักปลาที่เวลาต่างๆ ด้วยแบบจำลอง (3.17) ของ Yi [27], แบบจำลอง (3.19) ของ Dampin et al. [12] และแบบจำลอง (4.4) ที่ปรับปรุงขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรุงเงอ-คุททาอันดับ 4 เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขซึ่งเป็นน้ำหนักปลา

กำหนดให้ W_i คือ น้ำหนักปลา (กรัม) เมื่อ i คือ จำนวนเดือนที่เลี้ยงปลา

W_0 คือ น้ำหนักปลาเริ่มต้น (กรัม)

t คือ ระยะเวลาที่เลี้ยงปลา (วัน)

Δt คือ ความกว้างของช่วงเวลาในการคำนวณเชิงตัวเลข (เท่ากับ 30 วัน)

$F(W_i) = dW_i / dt$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักปลาต่อวัน (กรัม/วัน) โดย F เป็นพจน์ด้านขวามือของ (3.17), (3.19) และ (4.4)

$$\text{จะได้ว่า} \quad W_{i+1} = W_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 \quad (5.1)$$

$$\text{โดยที่} \quad k_1 = \Delta t F(W_i) \quad (5.2)$$

$$k_2 = \Delta t F(W_i + k_1 / 2) \quad (5.3)$$

$$k_3 = \Delta t F(W_i + k_2 / 2) \quad (5.4)$$

$$k_4 = \Delta t F(W_i + k_3) \quad (5.5)$$

ข้อมูลที่ใช้หาค่าของ W_i ได้แก่

- 1) น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง (กรัม/ตัว)
- 2) ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง (ตัว/ลูกบาศก์เมตร)
- 3) จำนวนชั่วโมงที่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตกดินในแต่ละวัน (ชั่วโมง)
- 4) ตัวแปรในสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการกินอาหารของปลา ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร) ค่าความสกปรกของน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร) ค่าความเป็นด่าง ไนเตรท (มิลลิกรัม/ลิตร) แอมโมเนียไม่แตกตัว (มิลลิกรัม/ลิตร) แอมโมเนียแตกตัว (มิลลิกรัม/ลิตร) ซึ่งคำนวณจากแอมโมเนียไม่แตกตัว อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งคำนวณจาก (1.4) และ (1.5) และออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)

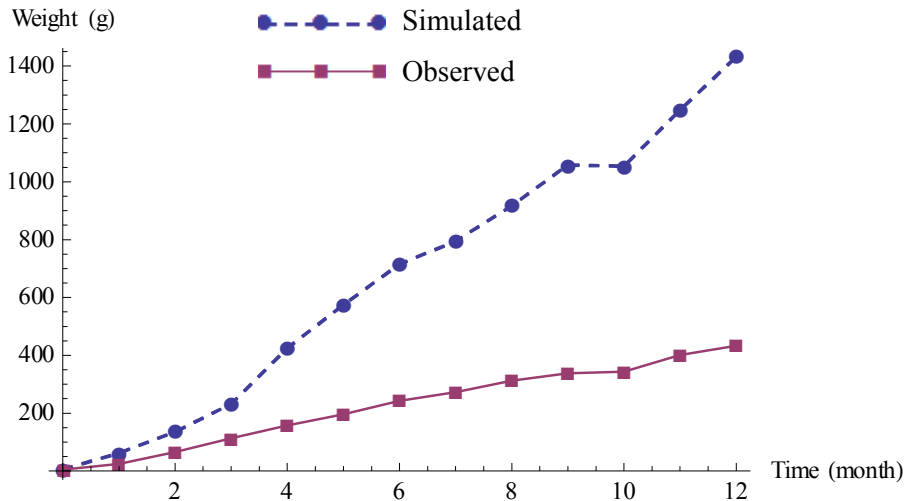
จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อแทนค่าใน (5.1) – (5.5) จะได้ค่าของ W_i ซึ่งเป็นน้ำหนักปลานิล ณ เดือนที่ i ที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลอง

จากนั้นเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (Simulated) กับน้ำหนักปลาจากข้อมูลจริง (Observed) ที่ความหนาแน่นปลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ตัว/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และแสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage error : %ERROR) ที่คำนวณจากสมการ

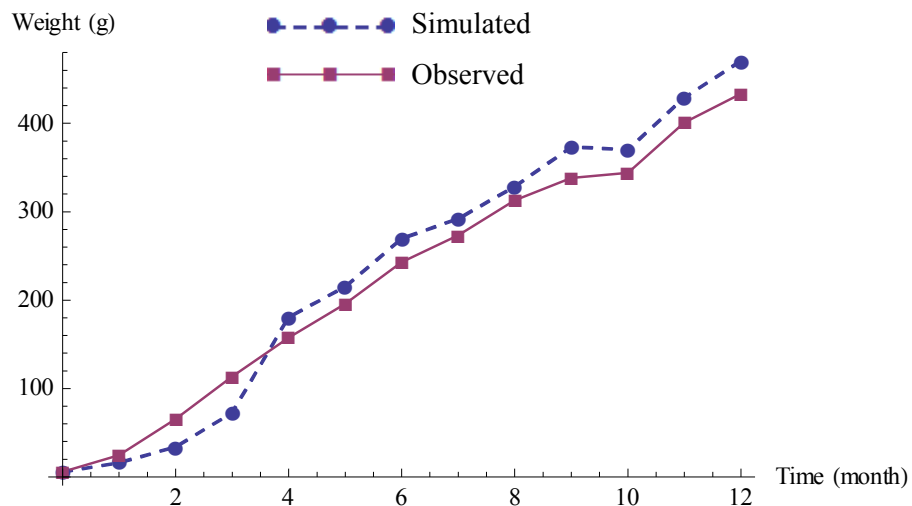
$$\%ERROR = \frac{|\text{Observed} - \text{Simulated}|}{\text{Observed}} \times 100 \quad (5.6)$$

ผลการทดสอบแบบจำลองการเติบโตของปลานิลของงานวิจัยนี้ ที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 – 5 ตัว/ตารางเมตร แสดงด้วยกราฟดังภาพที่ 5.2 – 5.6 ตามลำดับ และผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการเติบโตของปลานิลของงานวิจัยนี้ กับแบบจำลองของ Yi [27] และ Dampin et al. [12] ที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 – 5 ตัว/ตารางเมตร แสดงในตารางที่ 5.1 – 5.5 ตามลำดับ

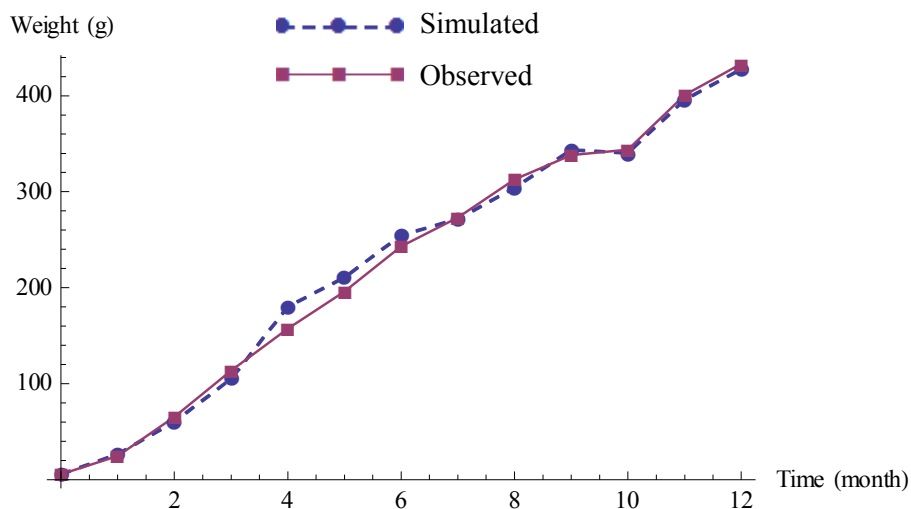
➤ ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง 5.57 กรัม/ตัว



ภาพที่ 5.1 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.2 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร

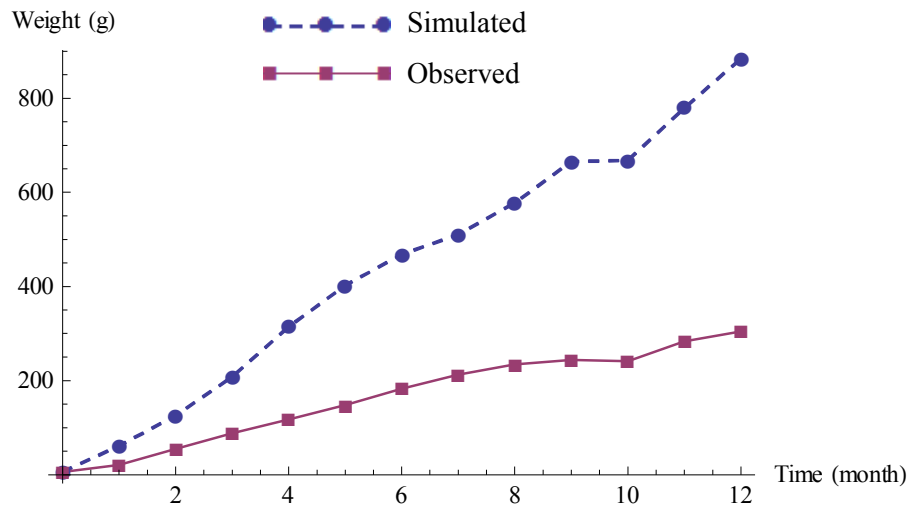


ภาพที่ 5.3 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร

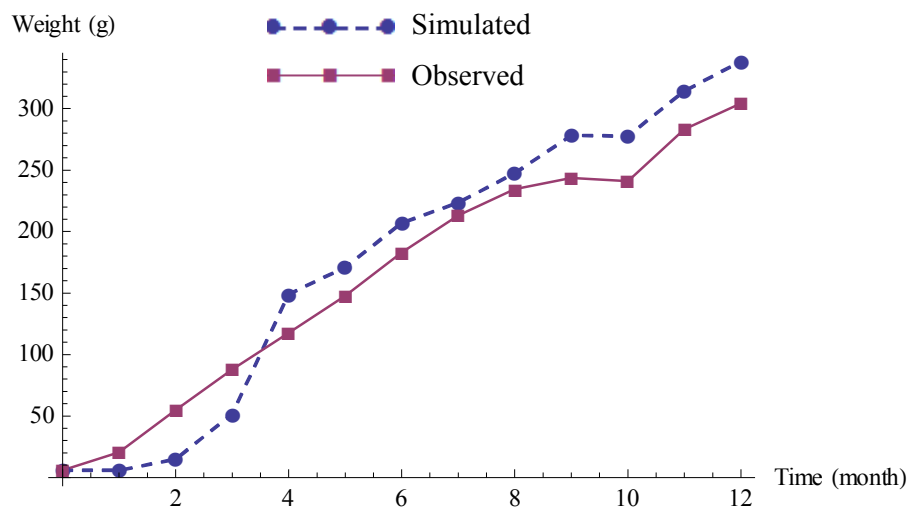
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร

Time	Observed	Yi [27]		Dampin et al. [12]		Present	
		Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR
1	24.46	61.90	153.06	15.93	34.86	26.73	9.28
2	65.42	135.76	107.54	34.01	48.00	60.42	7.63
3	113.61	232.29	104.47	72.74	35.97	105.11	7.48
4	157.44	425.39	170.19	180.73	14.79	180.14	14.41
5	195.92	574.72	193.34	215.17	9.82	210.82	7.60
6	243.00	715.43	194.41	269.68	10.98	254.73	4.83
7	273.22	795.21	191.05	292.13	6.92	271.64	0.58
8	312.76	917.23	193.27	328.67	5.09	304.08	2.78
9	338.12	1058.32	213.00	373.24	10.39	343.58	1.61
10	343.88	1054.38	206.61	370.24	7.66	340.55	0.97
11	400.81	1248.74	211.56	429.21	7.09	395.87	1.23
12	433.33	1432.39	230.56	470.54	8.59	427.83	1.27
Average			180.75		16.68		4.97
Minimum			104.47		5.09		0.58
Maximum			230.56		48.00		14.41

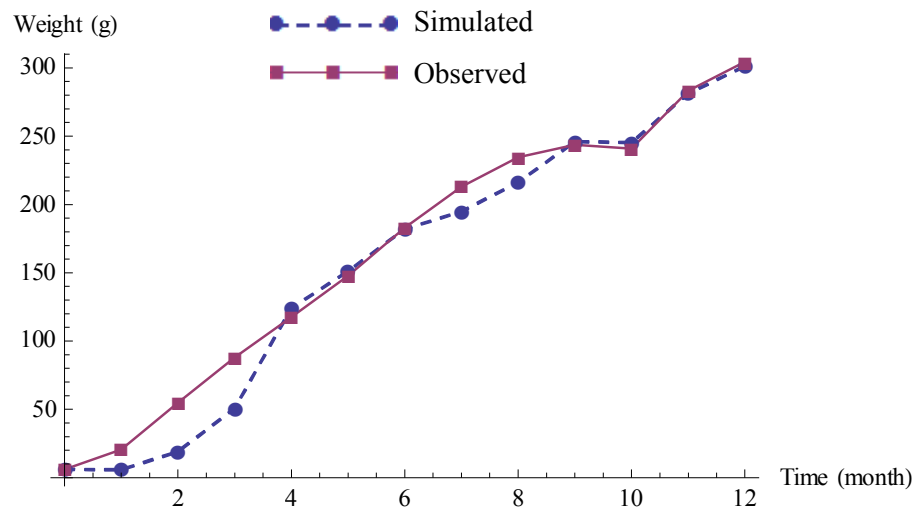
➤ ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง 5.98 กรัม/ตัว



ภาพที่ 5.4 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.5 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร

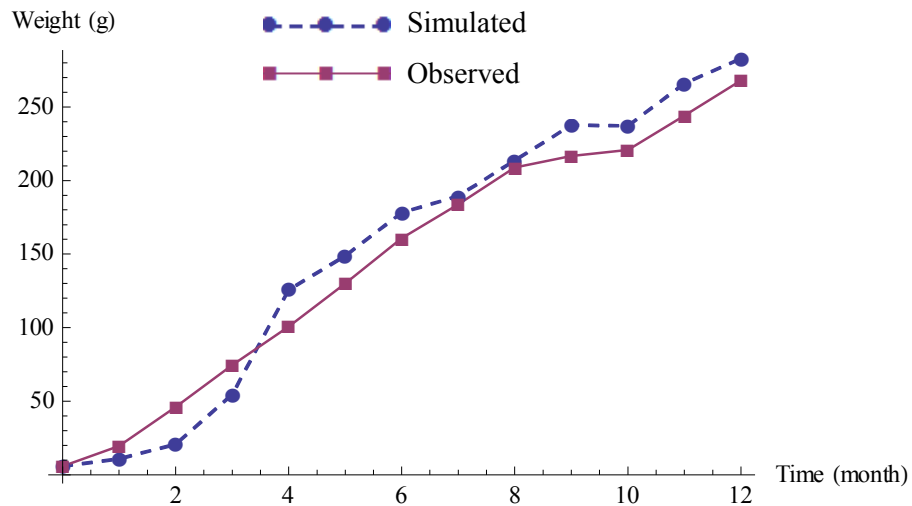


ภาพที่ 5.6 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร

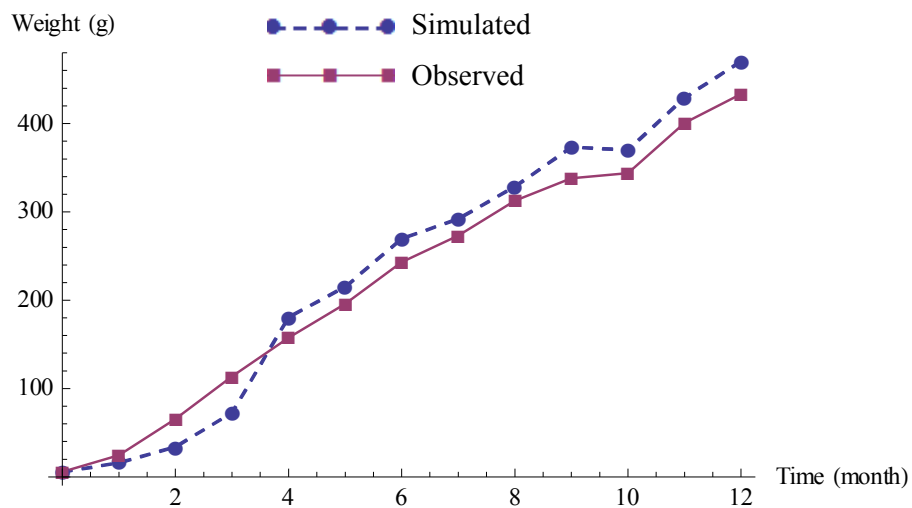
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร

Time	Observed	Yi [27]		Dampin et al. [12]		Present	
		Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR
1	20.57	61.28	197.93	5.80	71.82	5.80	71.82
2	54.80	125.89	129.73	14.91	72.79	19.11	65.13
3	87.99	207.93	136.31	51.61	41.34	50.78	42.29
4	117.49	314.37	167.58	149.04	26.85	124.18	5.70
5	147.70	402.33	172.40	170.95	15.75	151.19	2.36
6	183.02	468.07	155.75	207.04	13.12	182.02	0.55
7	213.06	510.68	139.69	223.57	4.93	194.83	8.55
8	234.49	577.64	146.33	247.53	5.56	216.25	7.78
9	243.68	665.53	173.12	278.32	14.21	246.02	0.96
10	240.99	667.95	177.17	277.77	15.26	245.38	1.82
11	283.37	779.28	175.00	314.38	10.94	281.32	0.72
12	304.46	884.19	190.41	338.49	11.17	301.22	1.06
Average			163.45		25.31		17.40
Minimum			129.73		4.93		0.55
Maximum			197.93		72.79		71.82

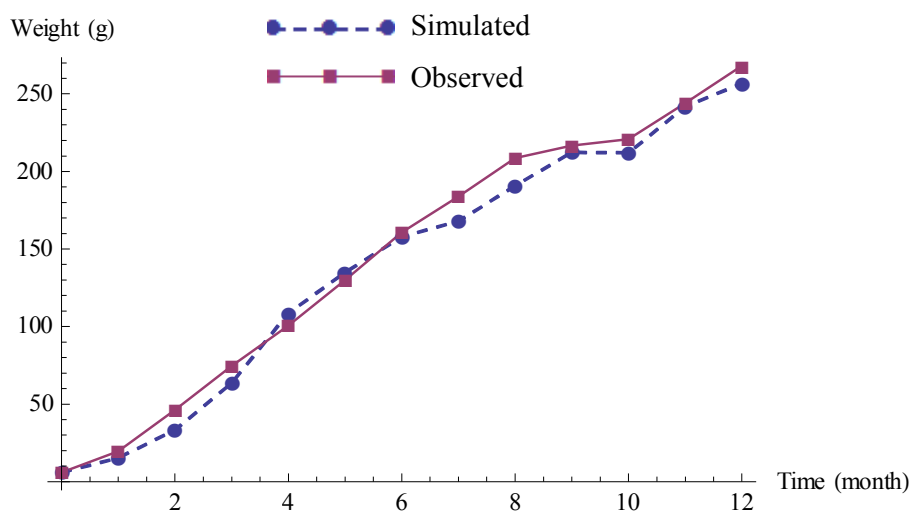
➤ ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง 5.89 กรัม/ตัว



ภาพที่ 5.7 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.8 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร

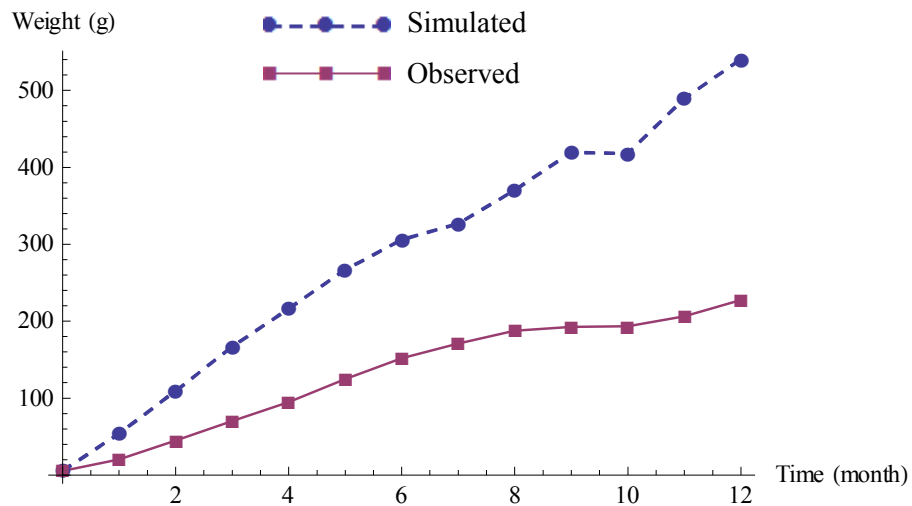


ภาพที่ 5.9 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร

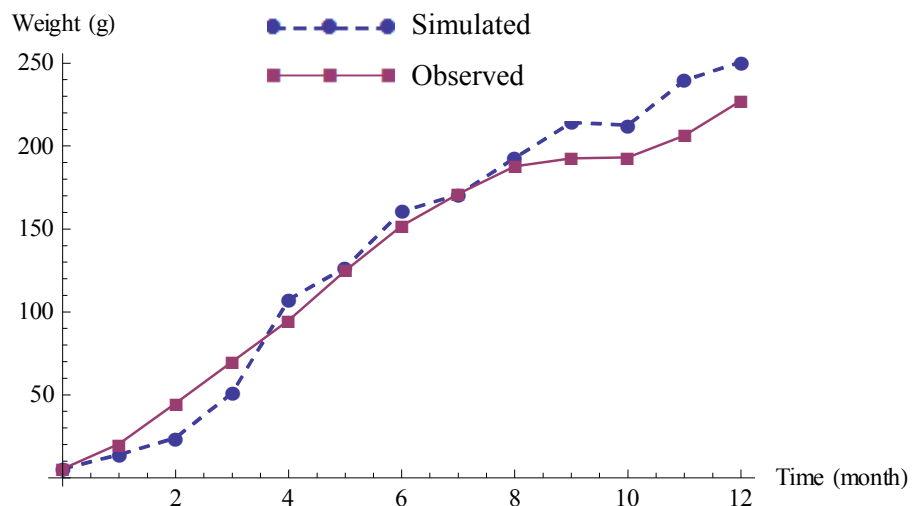
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร

Time	Observed	Yi [27]		Dampin et al. [12]		Present	
		Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR
1	19.57	58.73	200.07	10.78	44.94	15.27	21.97
2	46.09	120.70	161.88	20.69	55.10	33.30	27.74
3	74.61	178.13	138.76	54.53	26.92	63.53	14.85
4	100.77	240.36	138.51	125.73	24.77	108.65	7.81
5	130.02	304.65	134.32	148.77	14.42	134.88	3.74
6	160.75	346.92	115.82	178.19	10.85	157.82	1.82
7	183.95	377.05	104.97	189.48	3.00	167.95	8.70
8	208.72	433.54	107.72	213.65	2.36	190.78	8.59
9	216.63	495.51	128.74	237.64	9.70	212.33	1.98
10	220.85	498.27	125.61	237.11	7.37	212.01	4.00
11	244.02	581.37	138.25	266.00	9.01	241.76	0.93
12	268.13	659.46	145.95	282.87	5.50	256.78	4.23
Average			136.72		17.83		8.86
Minimum			104.97		2.36		0.93
Maximum			200.07		55.10		27.74

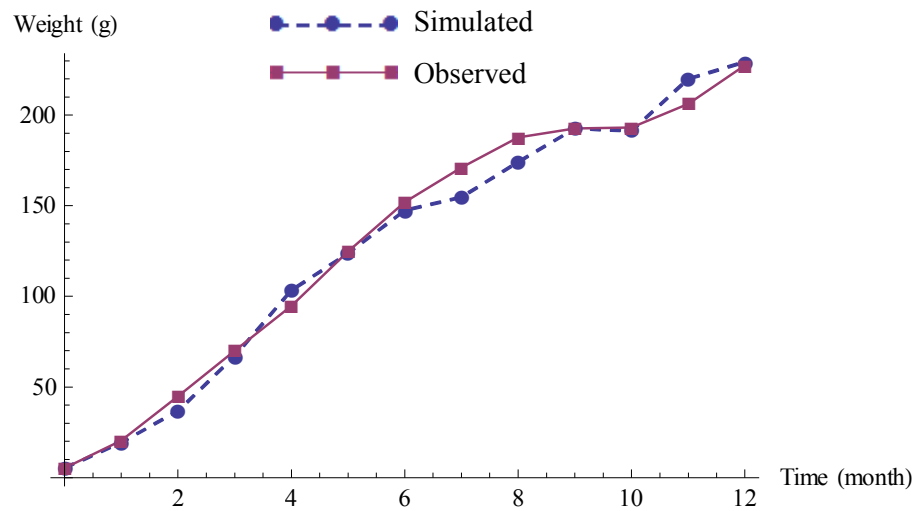
➤ ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง 5.35 กรัม/ตัว



ภาพที่ 5.10 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.11 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร

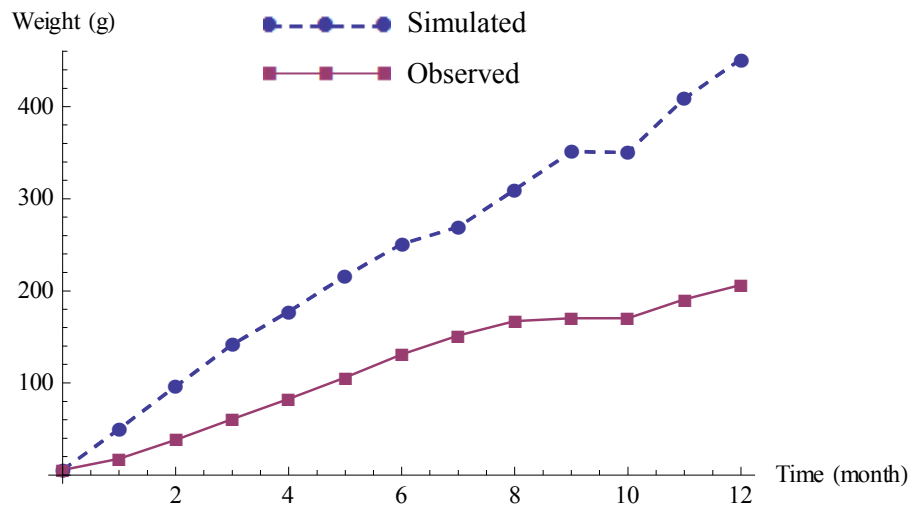


ภาพที่ 5.12 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร

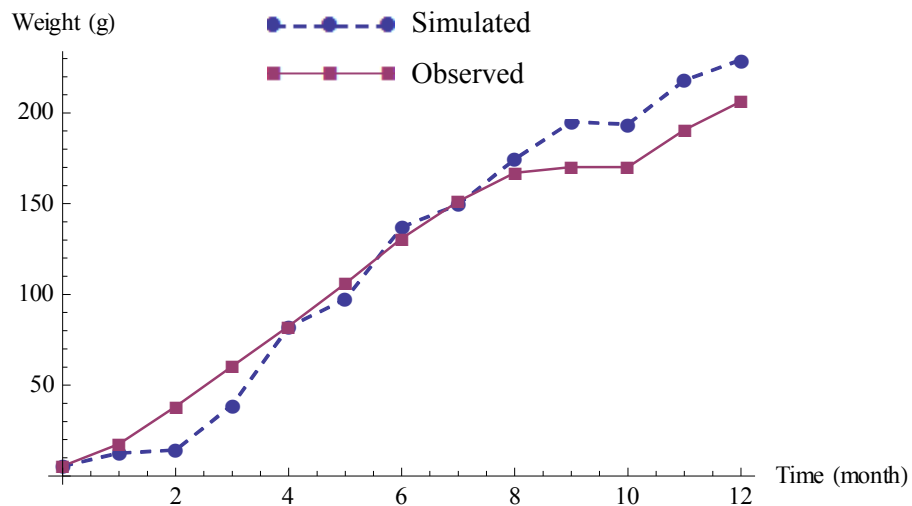
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร

Time	Observed	Yi [27]		Dampin et al. [12]		Present	
		Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR
1	20.35	53.70	163.94	13.86	31.86	19.22	5.52
2	44.85	109.09	143.25	23.96	46.58	36.73	18.11
3	70.03	166.56	137.83	50.96	27.23	66.88	4.50
4	94.80	216.03	127.88	107.40	13.29	103.23	8.89
5	124.82	266.64	113.63	126.58	1.41	123.64	0.94
6	151.97	305.67	101.14	160.52	5.63	147.36	3.03
7	171.20	326.66	90.81	170.65	0.32	154.73	9.62
8	187.72	370.23	97.23	192.75	2.68	174.11	7.25
9	192.67	419.32	117.63	214.20	11.17	192.60	0.04
10	193.27	417.92	116.24	212.56	9.98	191.25	1.05
11	206.32	489.55	137.28	239.53	16.10	220.00	6.63
12	227.38	540.51	137.71	250.71	10.26	229.42	0.90
Average			123.71		14.71		5.54
Minimum			90.81		0.32		0.04
Maximum			163.94		46.58		18.11

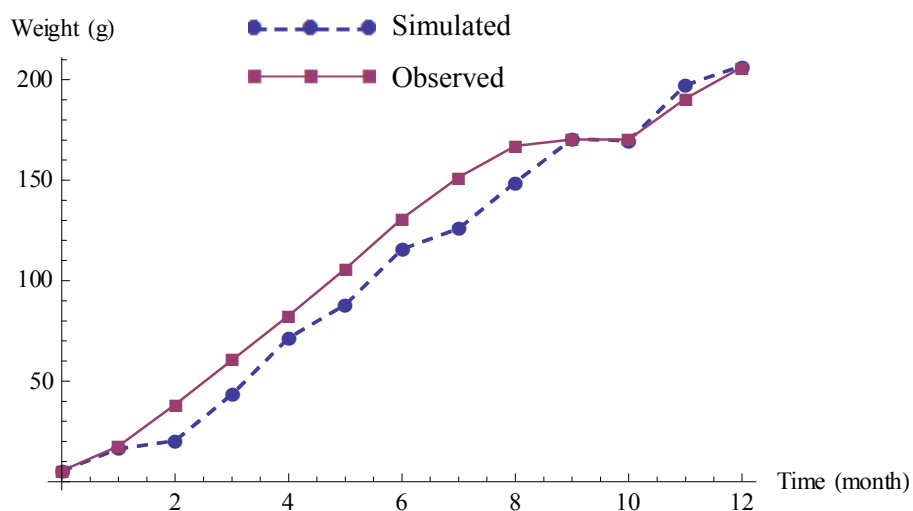
➤ ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักปลาที่เริ่มเลี้ยง 5.34 กรัม/ตัว



ภาพที่ 5.13 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Yi [27] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.14 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง Dampin et al. [12] กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร



ภาพที่ 5.15 ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) กับน้ำหนักปลาที่วัดจากข้อมูลจริง ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Yi [27], Dampin et al. [12] และแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร

Time	Observed	Yi [27]		Dampin et al. [12]		Present	
		Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR	Simulated	%ERROR
1	17.54	49.75	183.60	12.48	28.89	16.28	7.17
2	38.27	96.11	151.14	14.19	62.93	20.28	47.02
3	60.52	141.40	133.65	38.90	35.72	43.28	28.48
4	82.57	177.33	114.77	81.98	0.71	71.43	13.48
5	105.90	216.03	103.99	97.22	8.20	87.92	16.98
6	130.87	250.70	91.57	137.02	4.70	115.56	11.70
7	151.39	269.18	77.81	149.49	1.26	125.86	16.86
8	167.08	309.71	85.37	174.50	4.44	148.91	10.88
9	170.18	350.98	106.24	195.09	14.63	170.46	0.16
10	170.21	350.09	105.68	193.79	13.85	169.67	0.32
11	190.67	408.75	114.38	217.87	14.27	197.32	3.49
12	206.28	451.42	118.84	229.28	11.15	206.93	0.31
Average			115.59		16.73		13.07
Minimum			77.81		0.71		0.16
Maximum			183.60		62.93		47.02

ผลการทดสอบแบบจำลองของงานวิจัยนี้ สรุปได้ดังนี้

- ความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.97 โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.58 ในเดือนที่ 7 และมากที่สุดเท่ากับ 14.41 ในเดือนที่ 4
- ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 17.40 โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.55 ในเดือนที่ 6 และมากที่สุดเท่ากับ 71.82 ในเดือนที่ 1
- ความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.86 โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.93 ในเดือนที่ 11 และมากที่สุดเท่ากับ 27.74 ในเดือนที่ 2
- ความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.54 โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.04 ในเดือนที่ 9 และมากที่สุดเท่ากับ 18.11 ในเดือนที่ 2
- ความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 13.07 โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.16 ในเดือนที่ 9 และมากที่สุดเท่ากับ 47.02 ในเดือนที่ 2

เนื่องจากในช่วงประมาณเดือนที่ 1 ถึง 4 ปลายังมีน้ำหนักน้อยอยู่ จึงทำให้แบบจำลอง (4.4) มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงในช่วงเวลาดังกล่าว และจากผลของแบบจำลอง (4.4) ที่ความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร ในเดือนที่ 1 ที่พบว่ามีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 71.82 อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความสกปรกของน้ำที่วัดได้สูงถึง 42.50 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งแตกต่างจากความหนาแน่นของปลา 1, 3, 4 และ 5 ตัว/ตารางเมตร ที่มีค่าความสกปรกของน้ำเพียง 32.4 – 39.0 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่เดือนที่ 5 ขึ้นไป โดยเฉพาะช่วงประมาณเดือนที่ 9 ถึง 12 แบบจำลองมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยมาก นอกจากนั้น น้ำหนักปลานิลที่ได้จากแบบจำลอง (4.4) และข้อมูลจริงที่เวลาใดๆ มีลักษณะเหมือนกันคือลดลงตามความหนาแน่นของปลาที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง (3.17) ของ Yi [27] ให้ผลลัพธ์เป็นน้ำหนักปลาที่สูงกว่าน้ำหนักปลาที่วัดจริงมาก จึงทำให้ได้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงมากในทุกเวลาและทุกความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง ในกรณีแบบจำลอง (3.19) ของ Dampin et al. [12] ให้ผลลัพธ์เป็นน้ำหนักปลาที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักปลาที่วัดจริงและมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองของ Yi [27] มาก อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง (4.4) ในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์เป็นน้ำหนักปลาที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักปลาที่วัดจริงมากที่สุดและมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลอง (3.17) ของ Yi [27] และแบบจำลอง (3.19) ของ Dampin et al. [12]

บทที่ 6

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

ในบทนี้จะแสดงการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของพารามิเตอร์และตัวแปรสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการกินอาหารของปลาในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากแบบจำลองการเติบโตของปลานิลที่พยากรณ์น้ำหนักปลาดัง (4.4) เมื่อนำแบบจำลองไปใช้งานจริง ผู้ใช้งานต้องมีข้อมูลตัวแปรในธรรมชาติที่บันทึกได้จากแหล่งน้ำที่เลี้ยงปลานิลนั้นๆ และบางครั้งอาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางตัว เพื่อให้แบบจำลองทำนายน้ำหนักปลาได้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นผู้ใช้งานแบบจำลองจึงควรทราบถึงความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ และตัวแปรสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการกินอาหารของปลาที่ใช้ในแบบจำลองนี้ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่เกิดขึ้นจากข้อมูลหรือการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัว และสามารถปรับปรุงแก้ไขได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง (4.4) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแบบทางเดียว (One-way Sensitivity Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์จากแบบจำลอง ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์หรือข้อมูลตัวแปรทีละตัว [28] โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) พยากรณ์น้ำหนักปลานิลที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/ตารางเมตร เป็นเวลา 12 เดือน ด้วยแบบจำลอง (4.4) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.4 และค่าเฉลี่ยจากข้อมูลตัวแปรของ นฤชิต คำปิ่น [4] ดังตารางที่ 6.1 และเรียกน้ำหนักปลาที่เดือนสุดท้ายที่พยากรณ์ได้ว่า “น้ำหนักเปรียบเทียบ”

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงผลของค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิ (°C)	29.67
pH	8.36
DO (mg/l)	9.73
BOD (mg/l)	24.50
NH ₃ (mg/l)	0.73
ประสิทธิภาพของผลผลิต ชั้นต้นสุทธิ (g/m ³)	121.39

2) พยากรณ์น้ำหนักปลาที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/ตารางเมตร เป็นเวลา 12 เดือน ด้วยแบบจำลอง (4.4) โดยเพิ่มค่าพารามิเตอร์หรือข้อมูลตัวแปรในตารางที่ 6.1 ขึ้น 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิมทีละค่า และลดค่าลง 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิมทีละค่า และเรียกน้ำหนักปลาที่เดือนสุดท้ายที่พยากรณ์ได้ว่า “น้ำหนักทดสอบ”

3) พิจารณาร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Percentage change) ระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบ และน้ำหนักทดสอบ โดย

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} = \frac{\text{น้ำหนักทดสอบ} - \text{น้ำหนักเปรียบเทียบ}}{\text{น้ำหนักเปรียบเทียบ}} \times 100$$

ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมาก จะมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมาก ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้อย จะมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อย

1) ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์

ผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่คำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ไป 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่คำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม

พารามิเตอร์	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%)					
	-5%	-10%	-20%	+5%	+10%	+20%
<i>m</i>	-13.02	-23.19	-38.01	16.88	38.87	105.09
<i>n</i>	2.05	3.74	6.24	-2.48	-5.46	-13.04
<i>a</i>	4.97	10.00	20.21	-4.91	-9.76	-19.25
<i>h</i>	-4.36	-8.67	-17.13	4.41	8.86	17.88
<i>s</i>	-1.12	-2.33	-5.05	1.03	1.99	3.69
<i>k_{min}</i>	0.51	1.03	2.07	-0.51	-1.01	-2.02
<i>j</i>	0.10	0.20	0.39	-0.10	-0.20	-0.40
<i>c</i>	9.95	20.46	42.72	-9.25	-17.63	-31.28
<i>d</i>	-13.15	-24.36	-40.49	14.73	30.67	64.99
<i>W_c</i>	-1.80	-3.62	-7.40	1.76	3.50	6.88
<i>ε</i>	0.65	1.36	3.02	-0.59	-1.13	-2.10

จากตารางที่ 6.2 สามารถสรุปผลได้ว่า พารามิเตอร์ที่เพิ่มค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ เลขชี้กำลังของน้ำหนักตัวสำหรับกระบวนการสร้างสุทธิ m และลดค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ ค่าคงตัว d ในฟังก์ชันค่าประสิทธิภาพของการดูดซึมอาหาร ขณะเดียวกัน พารามิเตอร์ที่เพิ่มหรือลดค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อยที่สุด คือ j ดังนั้นผู้ใช้งานแบบจำลองควรระมัดระวังการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m และ d ที่อาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนได้มากกว่าค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ j มีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อยที่สุด การปรับเปลี่ยน j จึงส่งผลกระทบต่อแบบจำลองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2) ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

ผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่คำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 5%, 10%, 20% จากค่าเดิม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักทดสอบที่คำนวณจากค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไป 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม

ตัวแปร	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%)					
	-5%	-10%	-20%	+5%	+10%	+20%
อุณหภูมิ	-1.38	-4.99	-22.55	0.23	0.07	-4.73
pH	17.67	2.42	-26.44	-21.71	-42.97	-98.97
DO ⁽¹⁾	9.79	1.76	-13.80	26.21	34.56	36.49
BOD	4.61	8.76	14.65	-5.04	-10.47	-22.36
NH ₃	2.52	5.05	10.17	-2.50	-4.99	-9.91
ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ	-1.12	-2.33	-5.05	1.03	1.99	3.69

⁽¹⁾ เนื่องจากค่าเฉลี่ยของค่าออกซิเจนละลายน้ำจากข้อมูลนี้มีค่าเท่ากับ 9.73 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางที่ 6.1 ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของออกซิเจนละลายน้ำ 5%, 10% และ 20% จากค่าเดิม ยังคงได้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำวิกฤต (1 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำให้คำนวณค่าตัวแปรออกซิเจนละลายน้ำ (δ) ด้วย (3.7) ได้เท่ากับ 1 เสมอ และเมื่อแทนค่าในแบบจำลอง (4.4) จึงได้น้ำหนักทดสอบเท่ากันทุกกรณี ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองต่อค่าออกซิเจนละลายน้ำได้ จึงกำหนดค่าออกซิเจนละลายน้ำให้เท่ากับ 0.8 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าออกซิเจนละลายน้ำวิกฤต และได้น้ำหนักทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตามค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป

จากตารางที่ 6.3 สามารถสรุปผลได้ว่าตัวแปรที่เพิ่มหรือลดค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขณะเดียวกัน ตัวแปรที่เพิ่มค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิ และลดค่าแล้วมีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อยที่สุด คือ ประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ ดังนั้นผู้ใช้งานแบบจำลองควรบันทึกข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จะช่วยให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น แต่สำหรับอุณหภูมิ และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีความอ่อนไหวต่อแบบจำลองน้อย ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบันทึกข้อมูลตัวแปรทั้งสามค่านี้จึงอาจมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเพียงเล็กน้อย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแบบจำลองการเติบโตของปลาไนเพื่อพยากรณ์น้ำหนักปลาจากตัวแปรในธรรมชาติที่สำคัญ ปริมาณอาหารและความหนาแน่นของปลา โดยศึกษาความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อปรับปรุงแบบจำลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงและมีความสมเหตุสมผลยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

1) การปรับปรุงแบบจำลอง

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงจากแบบจำลองของงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการ เพิ่มค่าควบคุมตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำเพื่อควบคุมอิทธิพลของตัวแปรค่าความสกปรกของน้ำ เพิ่มตัวแปรค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญมีผลกระทบโดยตรงต่อการกินอาหารของปลา และคำนวณค่าประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ โดยใช้วิธีของ Yi [27] ที่คำนวณจากปริมาณแร่ธาตุ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส แทนวิธีการของ Dampin et al. [12] ที่คำนวณจากความหนาแน่นของแพลงก์ตอน ซึ่งอาจทำให้แบบจำลองมีคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้ผลจากการปรับปรุงดังกล่าวทำให้แบบจำลองการเติบโตของปลาไนในงานวิจัยนี้มีความเป็นเหตุเป็นผลและทำนายน้ำหนักปลาไนได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น สังเกตได้จากผลทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลการเลี้ยงปลาไนของ นฤชิต คำปิ่น [4] ในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยไม่ให้อาหาร พบว่าน้ำหนักปลาที่ได้จากแบบจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับน้ำหนักปลาจากข้อมูลจริง โดยแบบจำลองมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 4.97 – 13.07 ซึ่งต่ำกว่าแบบจำลองของ Yi [27] และ Dampin et al. [12] แบบจำลองในงานวิจัยนี้จึงเป็นแบบจำลองใหม่ที่สามารถใช้พยากรณ์น้ำหนักปลาไน ที่สัมพันธ์กับตัวแปรในสิ่งแวดล้อม ความหนาแน่นของปลาและอาหารในธรรมชาติได้เป็นอย่างดี

2) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวพบว่า เลขชี้กำลังของน้ำหนักตัวสำหรับกระบวนการสร้างสุทธิ m และ ค่าคงที่ d ในฟังก์ชันค่าประสิทธิภาพของการดูดซึมอาหาร คือพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองมากที่สุด และ ค่าคงตัวที่อธิบายผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการเผาผลาญ j คือพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองน้อยที่สุด ขณะเดียวกัน ค่าความเป็นกรด-ด่าง คือตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิ น้ำ และประสิทธิภาพของผลผลิตขั้นต้นสุทธิ คือตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข้อเสนอแนะ

1) แบบจำลองการเติบโตของปลาในโรงงานวิจัยนี้อาจพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้ โดยวิธีการต่างๆ เช่น

- ปรับปรุงพารามิเตอร์บางตัวของแบบจำลองให้ทันสมัยและเหมาะสมยิ่งขึ้น
- พิจารณาตัวแปรอื่นๆ ในแบบจำลอง เช่น สารแขวนลอย
- เพิ่มจำนวนข้อมูลให้มากขึ้นในการวิเคราะห์หองศ์ประกอบ เพื่อลดจำนวนตัวแปรในแบบจำลอง
- ใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง และขอบเขตความคลาดเคลื่อนของข้อมูลตัวแปรที่พิจารณาในแบบจำลอง

2) หากข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย จะยิ่งช่วยให้แบบจำลองนี้สามารถพยากรณ์น้ำหนักปลาได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3) แม้ว่าแบบจำลองในโรงงานวิจัยนี้จะปรับปรุงจากแบบจำลองที่พยากรณ์น้ำหนักปลาที่เลี้ยงในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบไม่ให้อาหาร แต่เกษตรกรอาจนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับการเลี้ยงปลาหรือปลาสายพันธุ์อื่นๆ ในสภาพน้ำปกติและมีการให้อาหาร ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรสามารถพยากรณ์น้ำหนักปลาและควบคุมค่าตัวแปรในธรรมชาติอย่างเหมาะสม

4) นอกจากนี้ยังอาจพัฒนาแบบจำลองในโรงงานวิจัยนี้เพื่อให้สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของปลาที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงในสภาพแวดล้อม ระยะเวลา หรือปริมาณอาหารที่แตกต่างกันได้

รายการอ้างอิง

- [1] ควบคุมมลพิษ, กรม. 2553. คู่มือการเลี้ยงปลาในกระชังที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- [2] คีรี กอนันตกุล และ จุฬ สิ้นชัยพานิช. 2549. การเลี้ยงปลานิลในกระชัง. กรมประมง สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง ส่วนเผยแพร่การประมง ฝ่ายเผยแพร่.
- [3] ธนิษฐา ทรรพนนท์. 2543. ชีววิทยาประมง. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] นฤชิต คำปิ่น. 2555. แบบจำลองอัตราความหนาแน่นการปล่อยปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อฝิ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] อมรรัตน์ วุฒิสักดิ์. 2547. การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและการรอดตายของปลานิลที่เลี้ยงในกระชังแขวนลอยในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อฝิ่งของเทศบาลเมืองจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [6] Ahmed, E.D.N., Magid, A. 1968. Oxygen consumption in *Tilapia nilotica* (L.). Hydrobiologia 33 : 513–522.
- [7] Bolte, J.P., Nath S.S., Ernst D.E. 1995. POND: A decision support system for pond aquaculture. Twelfth Annual Technical Report, Pond Dynamics: Aquaculture CRSP. Oregon State University, Corvallis, OR : 48–67.
- [8] Brett, J.R. 1979. Environmental factors and growth. In: Hoar, W.S., Randall, D.J., Brett, J.R. (Eds.), Fish Physiology, vol. VIII, Bioenergetics and Growth. Academic Press, New York : 599–675.
- [9] Caulton, M.S. 1982. Feeding, metabolism and growth of tilapias: some quantitative considerations. The Biology and Culture of Tilapias. ICLARM Conference Proceedings 7 : 157–180.
- [10] Colt, J., Armstrong, D.A. 1981. Nitrogen toxicity to crustaceans, fish, and molluscs. Proceedings of Bio-engineering Symposium for Fish Culture, 16–18 October 1979, Traverse City, Michigan. Fish Culture Section, American Fisheries Society, Auburn, AL : 34–47.
- [11] Cuenco ML, Stickney RR, Grant WE. 1985. Fish bioenergetics and growth in aquaculture ponds: I. Individual fish model development. Ecological Modelling 27 : 169-190.

- [12] Dampin, N., Tarnchalanukit, W., Chunkao, K., Maleewong, M. 2011. Fish Growth Model for Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Wastewater Oxidation Pond, Thailand. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling, Procedia Environmental Sciences 13 : 513 – 524.
- [13] Denzer, H.W. 1967. Studies on the physiology of young tilapia. FAO Fisheries Report 44 : 358–366.
- [14] El-Sherif, M.S., El-Feky, A.M.I. 2009. Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. I. Effect of pH. Int. J. Agric. Biol. 11 : 297–300.
- [15] Gannam A, Phillip H. 1993. Effects of temperature on growth of *Oreochromis niloticus*. Tenth Annual Administrative Report, Pond Dynamics/Aquaculture CRSP. Oregon State University, Corvallis, Oregon : 136-42.
- [16] Isyagi, N. A., Veverica, K. L., Asiimwe, R., Daniels, W. H. 2009. Water quality and general pond management. Manual for the commercial pond production of the African catfish in Uganda : 70-96.
- [17] Ivlev, V.S., 1961. Experimental Ecology of the Feeding of Fishes. Yale University Press, New Haven, CT.
- [18] Knud-Hansen, C.F. 2006. Pond Fertilization: Ecological approach and practical application. Aquaculture Collaborative Research Support Program Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- [19] Lannan, J.E. 1993. User's Guide to PONDCLASS©: guidelines for fertilizing aquaculture ponds. Pond Dynamics: Aquaculture CRSP, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- [20] Nath, S.S., Bolte, J.P., Ernst, D.H., Lannan, J.E. 1994. Decision support systems for pond Aquaculture. Eleventh Annual Administrative Report, Pond Dynamics: Aquaculture CRSP. Oregon State University, Corvallis, OR : 108–124.
- [21] Popma, T., Masser, M. 1998. Tilapia Life History and Biology. SRAC Publication No. 283.
- [22] Sperber, O., From, J., Sparre, P. 1977. A model to estimate the growth rate of fishes, as a function of temperature and feeding level, applied to rainbow trout. Meddelelser fra Danmarks Fiskeri-og Havundersogelsen 7 : 275–317.
- [23] Svirezhev, Yu.M., Krysanova, V.P., Voinov, A.A. 1984. Mathematical modelling of a fish pond ecosystem. Ecological Modelling 21 : 315–337.
- [24] Teichert-Coddington, D., Green, B.W. 1993. Tilapia yield improvement through maintenance of minimal oxygen concentrations in experimental grow-out ponds in Honduras. Aquaculture 118 : 63–71.
- [25] Ursin, E., 1967. A mathematical model of some aspects of fish growth, respiration and mortality. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 24 : 2355–2453.
- [26] Winberg, G.G. 1956. Rate of metabolism and food requirements of fishes. Minsk, Belorussian State University, Russian. : 253.

- [27] Yi, Y. 1998. A bioenergetics growth model for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds. Journal of Aquacultural Engineering 18 : 157–173.
- [28] การวิเคราะห์ความอ่อนไหว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
suriyon.rtarf.mi.th/it/29/Analysis/Sensitivity/2.doc [20 เมษายน 2556]
- [29] การวิเคราะห์ธาตุอาหาร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.aquatoyou.com/index.php/2010-03-29-08-43-46/548-2010-04-05-23-15-09> [10 กุมภาพันธ์ 2555]
- [30] การวิเคราะห์องค์ประกอบ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
rci2010.files.wordpress.com/2010/06/factor-analysis.doc [29 เมษายน 2556]
- [31] การหาค่าความเป็นต่าง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.aquatoyou.com/index.php/2010-03-29-08-43-46/543-2010-04-03-03-12-39> [10 กุมภาพันธ์ 2555]
- [32] คุณภาพน้ำในบ่อปลา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://sonfree.com/samaban/lesson/74> [30 กรกฎาคม 2555]
- [33] นางเยาว์ มุนจันทา. ปลาไนล์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://nongyao1201.wordpress.com/2012/09/17/ปลาไนล์> [12 มีนาคม 2555]
- [34] นิติพงษ์ ส่งศรีโรจน์. การวิเคราะห์องค์ประกอบ. แหล่งที่มา:
www.nitiphong.com/paper_pdf/phd/FactorAnalysis_concept.pdf [29 เมษายน 2556]
- [35] มุลนิธิชัยพัฒนา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://weraphat.siam2web.com/?cid=1077581> [12 มีนาคม 2555]
- [36] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. การเลี้ยงปลาไนล์ในกระชัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.ku.ac.th/e-magazine/feb50/agri/fish.htm> [10 กรกฎาคม 2555]
- [37] รสริน ศรีรังกานนท์. การวิเคราะห์องค์ประกอบ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.saruthipong.com/port/document/299-705/299-705-8.pdf> [29 เมษายน 2556]
- [38] ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งจันทบุรี. การวิเคราะห์แอมโมเนีย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.fisheries.go.th/cf-chan/visit-water-room/ammonia/ammonia-page.htm> [17 ธันวาคม 2555]
- [39] สูตรกำจัดกลิ่นเหม็นในบ่อเลี้ยงปลาไนล์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://xn--q3cd4ab7dn.blogspot.com/2012/10/blog-post_5010.html [12 มีนาคม 2555]
- [40] สำนักงานประมง จังหวัดพังงา. การเลี้ยงปลาไนล์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.fisheries.go.th/fpo-phangnga/content.php?ID=CT0910-00002> [17 พฤษภาคม 2555]

- [41] สมาคมดาราศาสตร์ไทย. เวลาดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ขึ้น-ตก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://thaiastro.nectec.or.th/skyevnt/sunmoon/2011/phetchaburi.html> [12 มกราคม 2552]
- [42] Engle, D. 2010. Formulas Used to Derive Un-ionized Ammonia Fractions and USEPA Ammonia Criteria. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/docs/cmnt081712/srcsd/engleatt2.pdf [22 ธันวาคม 2555]
- [43] Ertebjerg, G., Andersen, J.H. and Schou Hansen, O. Nutrient concentrations, nutrient ratios and nutrient limitations. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www2.dmu.dk/1_viden/2_miljoe-tilstand/3_vand/4_eutrophication/nutrient.asp [12 พฤศจิกายน 2555]

ภาคผนวก

ภาคผนวก
ข้อมูลที่วัดได้จากการเลี้ยงปลาไหล

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 1 ตัว/ตารางเมตร

Time (month)	Weight (g)	Temperature (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Alkalinity (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Suspended solid (mg/l)	Plankton (cells/m ³)	Photoperiod (hr) [41]
0	5.57	30.97	8.87	0.81	14.87	46.25	154.17	1.42	0.83	90.33	2,283,315	13.0
1	24.46	29.13	8.32	0.28	14.43	34.83	142.33	0.85	0.89	72.67	1,334,838	13.0
2	65.42	28.00	8.16	1.06	11.53	30.42	130.00	2.73	0.92	73.67	1,448,632	13.0
3	113.61	31.33	8.52	1.13	13.30	26.33	124.00	0.65	0.59	75.00	1,802,460	12.5
4	157.44	30.43	8.47	0.41	9.07	17.25	112.33	0.67	0.47	45.33	1,539,891	12.0
5	195.92	31.63	8.61	0.72	9.17	27.08	108.67	0.41	0.78	81.33	1,384,267	11.5
6	243.00	30.53	8.38	0.10	9.07	16.58	104.00	0.76	0.46	84.67	1,548,097	11.5
7	273.22	33.93	8.72	0.28	7.43	25.25	121.33	0.28	0.31	104.00	1,202,693	11.5
8	312.76	30.70	8.24	1.01	7.87	16.17	114.33	1.82	0.38	50.33	1,541,603	12.0
9	338.12	29.13	8.18	0.79	7.33	16.58	108.67	0.44	0.41	37.67	1,898,033	12.5
10	343.88	29.27	7.52	1.93	6.00	21.33	104.00	1.88	0.40	41.00	1,702,033	12.5
11	400.81	25.33	8.11	0.35	7.53	16.17	120.33	0.53	0.53	71.00	1,979,017	12.5
12	433.33	25.53	8.55	0.60	8.87	24.08	134.67	0.40	0.61	76.00	2,035,137	13.0

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 2 ตัว/ตารางเมตร

Time (month)	Weight (g)	Temperature (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Alkalinity (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Suspended solid (mg/l)	Plankton (cells/m ³)	Photoperiod (hr) [41]
0	5.98	29.83	9.10	0.80	15.40	32.38	153.33	1.51	0.91	82.33	2,337,729	13.0
1	20.57	29.30	8.48	0.31	15.00	42.50	139.33	0.76	0.91	70.33	1,154,458	13.0
2	54.80	27.97	8.25	1.11	10.37	30.75	134.67	2.78	0.90	73.33	1,560,223	13.0
3	87.99	31.20	8.55	1.04	12.57	24.00	122.00	0.67	0.54	73.67	1,900,854	12.5
4	117.49	30.47	8.57	0.36	10.60	17.58	109.67	0.61	0.48	45.67	1,480,133	12.0
5	147.70	31.33	8.66	0.69	10.63	31.17	109.67	0.43	0.85	79.67	1,410,167	11.5
6	183.02	30.90	8.56	0.06	10.80	17.67	104.67	0.79	0.43	83.67	1,544,820	11.5
7	213.06	32.43	8.80	0.29	7.67	23.08	122.67	0.28	0.31	102.00	1,200,567	11.5
8	234.49	30.63	8.36	1.07	7.73	15.92	112.33	1.78	0.38	51.67	1,676,164	12.0
9	243.68	29.40	8.25	0.76	7.33	17.67	109.67	0.43	0.41	35.67	1,923,048	12.5
10	240.99	29.13	7.53	1.86	5.60	18.58	104.67	1.84	0.41	45.33	1,675,233	12.5
11	283.37	25.30	8.09	0.40	7.73	14.83	117.67	0.47	0.53	72.67	1,934,783	12.5
12	304.46	25.47	8.56	0.55	9.93	24.83	136.33	0.35	0.60	76.33	1,904,357	13.0

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 3 ตัว/ตารางเมตร

Time (month)	Weight (g)	Temperature (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Alkalinity (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Suspended solid (mg/l)	Plankton (cells/m ³)	Photoperiod (hr) [41]
0	5.89	29.13	8.97	0.82	15.13	34.75	154.00	1.55	0.92	88.33	2,303,784	13.0
1	19.57	29.73	8.58	0.30	14.97	37.08	142.33	0.86	0.94	63.67	1,193,950	13.0
2	46.09	27.77	8.32	1.04	11.43	33.00	131.67	2.82	0.89	65.67	1,430,498	13.0
3	74.61	31.37	8.67	1.17	13.77	24.33	127.33	0.61	0.57	75.00	1,650,805	12.5
4	100.77	30.90	8.75	0.39	10.97	20.50	109.33	0.57	0.47	56.67	1,426,559	12.0
5	130.01	31.67	8.70	0.61	10.90	30.75	108.33	0.45	0.82	82.67	1,160,086	11.5
6	160.75	31.40	8.71	0.03	11.10	18.00	105.67	0.78	0.44	94.33	1,545,543	11.5
7	183.95	32.77	8.78	0.30	7.77	25.83	121.33	0.25	0.32	101.00	1,211,365	11.5
8	208.71	31.03	8.40	0.96	8.73	16.33	112.33	1.81	0.38	56.67	1,603,683	12.0
9	216.63	29.73	8.37	0.79	7.73	18.00	108.33	0.47	0.44	35.67	1,953,233	12.5
10	220.85	29.00	7.54	1.84	6.03	21.42	105.67	1.87	0.43	44.00	1,552,383	12.5
11	244.02	25.57	8.06	0.44	8.07	17.42	119.33	0.47	0.54	65.33	1,842,150	12.5
12	5.89	29.13	8.97	0.82	15.13	34.75	154.00	1.55	0.92	78.00	1,911,027	13.0

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 4 ตัว/ตารางเมตร

Time (month)	Weight (g)	Temperature (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Alkalinity (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Suspended solid (mg/l)	Plankton (cells/m ³)	Photoperiod (hr) [41]
0	5.35	28.77	9.03	0.93	14.17	39.00	154.00	1.54	1.54	80.67	2,249,687	13.0
1	20.34	29.63	8.60	0.31	14.87	35.33	139.67	0.90	0.90	67.67	1,083,388	13.0
2	44.85	28.27	8.42	1.03	11.93	33.83	130.67	2.74	2.74	73.67	1,231,263	13.0
3	70.03	31.57	8.69	1.00	15.40	29.42	124.00	0.64	0.64	73.00	1,885,008	12.5
4	94.80	31.20	8.82	0.38	11.17	22.75	115.33	0.60	0.60	52.00	1,341,903	12.0
5	124.82	31.47	8.71	0.52	11.17	32.42	107.33	0.49	0.49	78.00	1,183,403	11.5
6	151.97	31.13	8.69	0.05	11.23	15.33	105.00	0.89	0.89	92.00	1,507,747	11.5
7	171.20	32.13	8.88	0.28	7.87	25.17	121.33	0.29	0.29	98.33	1,187,713	11.5
8	187.72	31.10	8.51	1.00	9.57	18.50	114.33	1.78	1.78	54.33	1,537,379	12.0
9	192.67	29.63	8.45	0.78	7.27	15.33	107.33	0.45	0.45	35.33	1,843,429	12.5
10	193.27	28.90	7.58	1.90	5.90	19.67	105.00	1.84	1.84	39.33	1,502,466	12.5
11	206.31	25.47	8.10	0.32	8.53	14.50	119.00	0.48	0.48	71.33	1,868,567	12.5
12	227.38	25.63	8.66	0.54	10.50	26.00	135.00	0.36	0.36	74.33	1,951,717	13.0

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงข้อมูลที่มีความหนาแน่นปลา 5 ตัว/ตารางเมตร

Time (month)	Weight (g)	Temperature (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Alkalinity (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Suspended solid (mg/l)	Plankton (cells/m ³)	Photoperiod (hr) [41]
0	5.34	28.73	9.06	0.86	15.23	37.50	154.17	1.54	0.91	85.67	2,412,717	13.0
1	17.54	29.87	8.71	0.30	14.93	35.92	137.67	0.82	0.89	71.33	1,212,067	13.0
2	38.27	27.90	8.48	1.07	12.00	38.42	128.67	2.71	0.89	79.00	1,308,871	13.0
3	60.52	31.70	8.78	1.02	16.13	27.58	123.00	0.61	0.58	85.67	1,685,546	12.5
4	82.57	31.60	8.86	0.36	12.10	24.25	116.00	0.57	0.42	56.67	1,524,000	12.0
5	105.90	31.80	8.77	0.67	11.67	33.67	105.33	0.48	0.80	79.33	1,264,550	11.5
6	130.87	31.40	8.84	0.09	11.80	18.08	104.00	0.88	0.43	95.67	1,468,247	11.5
7	151.39	32.17	8.94	0.31	7.53	24.42	119.33	0.28	0.30	103.00	1,164,627	11.5
8	167.08	31.43	8.65	0.94	9.87	17.75	116.67	1.79	0.37	72.67	1,688,150	12.0
9	170.18	29.83	8.40	0.78	7.90	18.08	105.33	0.44	0.43	34.33	2,022,050	12.5
10	170.21	28.93	7.56	1.89	6.87	15.75	104.00	1.85	0.42	33.00	1,468,449	12.5
11	190.67	25.47	8.09	0.38	9.10	18.17	118.67	0.50	0.53	72.00	1,747,817	12.5
12	206.28	25.60	8.67	0.51	11.27	24.25	133.67	0.38	0.61	82.67	2,009,420	13.0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	นายชัยวัฒน์ เนติทวีทรัพย์
วัน เดือน ปีที่เกิด	9 พฤศจิกายน 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาคณิตศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2551

เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554

ผลงานตีพิมพ์

- Chaiwat Natitaweetrab, Ratinan Boonklurb, Suchada Siripant. 2013. Growth model for Nile Tilapia Related to Amount of Food in Non-Fed Pond. APAM Conference 2013: 101 - 107.