

การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหล
ใต้ผิวดังกล่าวในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสม
ภายใต้สภาวะอัตรารับน้ำทางชลศาสตร์สูง



นางสาวศศิวิมล สุดแสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**COMPARISON OF SURFACE AND SUBSURFACE
FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FOR WATER
RECLAMATION OF *HYBRID CATFISH* CULTURE
UNDER HIGH HYDRAULIC LOADING RATES**

Sasivimon Sudsaen



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหล
ใต้ผิวดักกลางในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณกผสม
ภายใต้สภาวะอัตรารับน้ำทางชลศาสตร์สูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุจิตต์ ครุจิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุรินทร์ บุญอนันตชนสาร)

กรรมการ

(ผศ. ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศศิวิมล สุดแสน : การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลางในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมภายใต้สภาวะอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง (COMPARISON OF SURFACE AND SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FOR WATER RECLAMATION OF *HYBRID CATFISH* CULTURE UNDER HIGH HYDRAULIC LOADING RATES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยี่มรัตน์บวร, 230 หน้า.

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความต้องการน้ำในปริมาณมาก และก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำเนื่องจากน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง การศึกษาครั้งนี้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม และหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ใหม่ภายใต้สภาวะอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง เพื่อลดพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างระบบบำบัดและการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำ โดยมีการสร้างชุดทดลองจำนวน 2 ชุด ได้แก่ (1) ชุดควบคุม (CAS) ประกอบไปด้วยบ่อเลี้ยงปลาดุกลูกผสม โดยใช้น้ำประปา และ (2) ชุดทดลอง (RAS) ประกอบไปด้วยบ่อเลี้ยงปลาดุกลูกผสม 4 บ่อ โดยใช้น้ำที่ผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (RAS-FWS) และแบบไหลใต้ผิว (RAS-SF) ทำการเดินระบบภายใต้สภาวะอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าระบบ RAS-FWS มีประสิทธิภาพในการกำจัด TKN และระบบ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการกำจัด TP มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 69.31-84.11 และ 67.78-74.60 ตามลำดับ ค่าคุณภาพน้ำที่หมุนเวียนออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และเมื่อเปรียบเทียบค่าผลผลิตของปลาดุกลูกผสม ได้แก่ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตายของปลาดุกลูกผสมระหว่างระบบ RAS และ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และผลการศึกษาสุขภาพของปลาดุกลูกผสมพบว่าค่าฮีโมโกลบินและฮีมาโตคริตอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และผลการศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (k_{20}) ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32-1.28 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน มีค่าเท่ากับ 0.168-0.964 ต่อวัน สำหรับระบบ RAS-FWS 0.538-2.283 ต่อวัน สำหรับระบบ RAS-SF

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

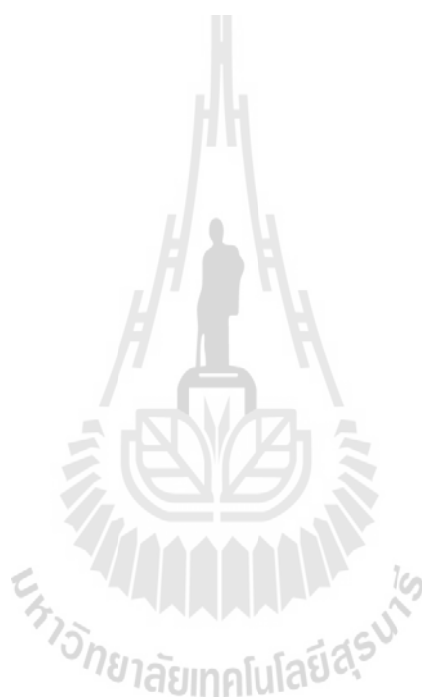
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SASIVIMON SUDSAEN : COMPARISON OF SURFACE AND
SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FOR WATER
RECLAMATION OF *HYBRID CATFISH* CULTURE UNDER HIGH
HYDRAULIC LOADING RATES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 230 PP.

CONSTRUCTED WETLAND/RECLAMATION/*HYBRID CATFISH*/
AQUACULTURE

Aquaculture need large amount of water and produce wastewater with high concentration of organic matter. The objective of this study was to investigate the water reclamation potential by using constructed wetlands for *Hybrid Catfish* culture under high hydraulic loading rate (HLR) to minimize the area of requirement. Two control aquaculture systems (CAS) were *Hybrid catfish* culture with tap water, and 4 reclamation aquaculture systems were *Hybrid catfish* culture with reclaimed water from free water surface constructed wetlands (RAS-FWS) and subsurface constructed wetlands (RAS-SF). The RAS systems were operated under HLR of 0.32, 0.64, and 1.28 m³/m²-d, respectively. The result showed that RAS-FWS effectively removed TKN, and RAS-SF effectively removed TP in range of 69.31-84.11 and 67.78-74.60, respectively. The quality of water reclamation from RAS was in range of standard for aquaculture. There were no significant difference of *hybrid catfish* production; percentage weight gain (WG), specific growth rate (SGR) and survival rate between RAS and CAS. The hematocrit (Hct) and hemoglobin (Hb) of CAS and RAS were in

an acceptable range reported in the literatures. And the organic matter removal rate constants (K_{20}) at HLR 0.32-1.28 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ were 0.168-0.964 d^{-1} for RAS-FWS and 0.538-2.283 d^{-1} for RAS-SF.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตน์บวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตต์ กระจิต ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ บุญอนันตชนสาร กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์
- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ขอขอบพระคุณสำนักกองทุนงานสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย
- ขอขอบพระคุณบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่อนุเคราะห์ที่ดินดินदान
- หน่วยงานประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณวรรณชัย จิตรา คุณมานพ จร โศภกรวด และคุณรุ่งเรือง นवलโพธิ์ ที่ให้การช่วยเหลือ

ด้านการดำเนินงานวิจัย

- เพื่อน ๆ ร่วมสถาบันที่ให้การช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด
- และกลุ่มบุคคลอื่น ๆ ที่ให้การช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สนับสนุนให้ทุนการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ศศิวิมล สุดแสน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ค
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 สมมติฐานการวิจัย.....	4
2 บริบทศนั้วรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปลาคุกกุผสม.....	5
2.1.1 วิธีการเพาะเลี้ยงปลาคุกกุ.....	5
2.1.1.1 การเตรียมบ่อ.....	5
2.1.1.2 ขั้นตอนการเลี้ยง.....	6
2.1.2 ค่าทางโลหิตวิทยา.....	7
2.1.3 ความสำคัญของปลาคุกกุผสมในตลาดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	7
2.1.4 ผลผลิตของปลาคุกกุผสม.....	8
2.2 ลักษณะของน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลา.....	9
2.2.1 อุณหภูมิ.....	9
2.2.2 ความเป็นกรดต่างของน้ำ.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3	ความเป็นกรดของน้ำ.....	10
2.2.4	สภาพค่างของน้ำ.....	12
2.2.5	ความโปร่งใสของน้ำ.....	12
2.2.6	ความขุ่น.....	12
2.2.7	สารอาหารต่าง ๆ.....	13
2.2.7.1	ฟอสฟอรัส.....	13
2.2.7.2	ไนโตรเจน.....	13
2.2.8	ก๊าซต่าง ๆ ในน้ำ.....	13
2.2.8.1	ออกซิเจนละลายน้ำ.....	13
2.2.8.2	ก๊าซไนโตรเจนละลายน้ำ.....	15
2.2.8.3	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.2.9	สารพิษต่าง ๆ ในน้ำ.....	17
2.2.9.1	พิษของแอมโมเนีย.....	17
2.2.9.2	พิษของไนไตรท์.....	18
2.2.10	พิษของโลหะหนัก.....	18
2.3	ระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	21
2.4	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	22
2.4.1	องค์ประกอบของบึงประดิษฐ์.....	23
2.4.2	ชนิดและหน้าที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	26
2.4.3	การเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และไหลใต้พื้นผิว.....	29
2.5	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	29
2.5.1	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ.....	29
2.5.2	ความลึกน้ำ.....	31
2.5.3	อัตราการระบรทุกชลศาสตร์.....	31
2.5.4	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์.....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.5	ความลึกของตัวกลาง.....	31
2.5.6	ความพรุนของดิน.....	31
2.6	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	31
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.7.1	ปลาคุกกุผสม.....	33
2.7.2	การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ผ่านการบำบัด ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34
2.7.3	อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	36
2.7.4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน.....	37
2.7.5	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	39
2.8	สรุป.....	40
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1	สถานที่การศึกษาวิจัย.....	43
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	43
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	43
3.3.1	แผนผังการทดลอง.....	43
3.3.1.1	ระบบ CAS.....	43
3.3.1.2	ระบบ RAS.....	46
3.3.2	การเตรียมปลาทดลอง.....	47
3.3.3	การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	47
3.3.4	การเริ่มเดินระบบ.....	49
3.3.4.1	การเตรียมพืช.....	49
3.3.4.2	การศึกษาผลของอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์.....	49
3.3.4.3	การศึกษาผลของค่าการกระจายการไหล และค่าระยะเวลาที่เก็บเฉลี่ย.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.5 การเดินระบบ.....	55
3.3.5.1 การเดินระบบ RAS	55
3.3.5.2 การเดินระบบ CAS	55
3.3.6 การศึกษาระบบ CAS และ RAS	56
3.3.6.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยง ปลาดุกลูกผสม โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	56
3.3.6.2 ศึกษาความเหมาะสมของคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม.....	57
3.3.6.3 ศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ทั้งแบบ CAS และ แบบ RAS.....	58
3.3.6.4 ศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ในบ่อเลี้ยงปลา (K_T)	58
3.3.7 ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตของปลาดุกลูกผสม และผลกระทบต่อสุขภาพปลาดุกลูกผสมระหว่าง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดิน.....	59
3.3.7.1 ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม	59
3.3.7.2 ผลกระทบต่อสุขภาพปลาดุก.....	61
3.3.8 การประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	61
3.3.9 สมดุลมวลน้ำ.....	62
3.4 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง	63
3.5 สมมติฐานการทดสอบค่าทางสถิติ.....	64
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	64
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	66
4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	66
4.1.1 ซีโอดี (COD)	66
4.1.2 ของแข็งแขวนลอย (TSS).....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3	ทีเคเอ็น (TNK).....	71
4.1.4	ฟอสฟอรัส (TP).....	72
4.1.5	สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	74
4.2	คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	75
4.2.1	ค่า COD.....	75
4.2.2	ค่า TSS.....	75
4.2.3	ค่า TP.....	77
4.2.4	ค่าแอมโมเนีย (NH ₄).....	77
4.2.5	ค่าไนไตรท์ (NO ₂ ⁻).....	77
4.2.6	ค่าไนไตรท์ (NO ₃ ⁻).....	77
4.2.6	สรุปผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจาก ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	78
4.3	คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม.....	78
4.3.1	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO).....	78
4.3.2	ค่าอุณหภูมิ (Temperature).....	81
4.3.3	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	82
4.3.4	ค่าการส่องผ่านของแสง (Transparency Depth).....	83
4.3.5	ค่าความขุ่น (Turbidity).....	84
4.3.6	ค่าสภาพด่างของน้ำ (Alkalinity).....	85
4.3.7	ค่า COD.....	86
4.3.8	ค่าแอมโมเนีย (NH ₄).....	88
4.3.9	สรุปผลคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลา.....	89
4.4	ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม.....	90
4.4.1	ค่าน้ำหนักปลาดุกลูกผสม.....	90
4.4.2	ค่าความยาวปลาดุกลูกผสม.....	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3	ค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาดุกลูกผสม (ADG)	93
4.4.4	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาดุกลูกผสม (Weight gain)	94
4.4.5	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาดุกลูกผสม (SGR)	95
4.4.6	อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสม (FCR).....	96
4.4.7	อัตราการรอดตายของปลาดุกลูกผสม (Survival rate)	97
4.4.8	สรุปผลผลิตของปลาดุกลูกผสม	98
4.5	สุขภาพของปลาดุกลูกผสม	99
4.5.1	ค่าฮีโมโกลบิน (Hb)	100
4.5.2	ค่าฮีมาโตคริต (Hct).....	102
4.5.3	สรุปผลสุขภาพของปลาดุกลูกผสม	104
4.6	การหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์	104
4.7	การประเมินหาพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	106
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	107
5.1	สรุปผลการศึกษา	107
5.2	ข้อเสนอแนะ	109
	รายการอ้างอิง.....	110
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์	119
	ภาคผนวก ข. การคำนวณการศึกษาสารติดตาม	122
	ภาคผนวก ค. จำนวน BOD ที่ได้จากเครื่อง Oxitop® -OC110	135
	ภาคผนวก ง. อัตราการระเหยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	138
	ภาคผนวก จ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	140
	ภาคผนวก ฉ. การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม	157
	ภาคผนวก ช. การเปรียบเทียบผลผลิตของปลาดุกลูกผสม	185
	ภาคผนวก ซ. การเปรียบเทียบสุขภาพของปลาดุกลูกผสม.....	204

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ. การคำนวณค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และ การประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	211
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	218
ประวัติผู้เขียน.....	230



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั่วประเทศ จำแนกตามชนิด ปี 2546-2548	8
2.2 ผลกระทบของค่า pH ต่อสุขภาพของปลา.....	11
2.3 อิทธิพลของออกซิเจนละลายน้ำที่มีต่อปลา.....	14
2.4 เปรียบเทียบอัตราการตายของปลาคูอมริกันและปลาคูกูกผสม ที่ระดับค่าออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	15
2.5 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) ที่ยอมให้มีได้ในน้ำ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ โดยไม่เป็นอันตรายหรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา (NH_3 ไม่เกิน 0.025 mg/l).....	18
2.6 คุณภาพน้ำที่ใช้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	19
2.7 เกณฑ์การออกแบบและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของบ่อฝัง และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	21
2.8 กลไกการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	23
2.9 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช.....	26
2.10 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน	30
2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3.1 สรุปรายละเอียดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF.....	49
3.2 ผลการศึกษาสารติดตาม	53
3.3 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้า-ออกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	63
3.4 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาคูกูกผสม.....	63
4.1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	67
4.2 คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	76
4.3 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคูกูกผสม ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ค่าเฉลี่ยผลผลิตของปลาอุกถูกผสมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	91
4.5 ค่าซีโมโกลบินและค่าฮีมาโตคริตของปลาอุกถูกผสมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	99
4.6 ค่า K_T และ K_{20} ในระบบ RAS-FWS RAS-SF และค่าจากห้องปฏิบัติการ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	105
4.7 การประเมินการใช้พื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF เปรียบเทียบกับ U.S.EPA	106
ข.1 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	124
ข.2 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	126
ข.3 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	128
ข.4 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	130
ข.5 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	132
ข.6 ผลการศึกษาดูตามติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	134
ค.1 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ในบ่อปลา ที่ได้จากเครื่อง Oxitop [®] -OC110	136
จ.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.2	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 144
จ.3	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF 145
จ.4	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 148
จ.5	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF 149
จ.6	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 152
จ.7	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF 153
จ.8	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 156
ฉ.1	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า DO ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุกกุผสมแบบ CAS และ RAS 158
ฉ.2	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอุณหภูมิ ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุกกุผสมแบบ CAS และ RAS 161
ฉ.3	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า pH ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุกกุผสมแบบ CAS และ RAS 164
ฉ.4	ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าแสงส่องผ่าน ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุกกุผสมแบบ CAS และ RAS 167

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ฉ.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความขุ่น ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ CAS และ RAS	170
ฉ.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าสภาพต่างของน้ำ ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ CAS และ RAS	173
ฉ.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า COD ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ CAS และ RAS	176
ฉ.8 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า NH_4 ในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ CAS และ RAS	179
ฉ.9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ RAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน	182
ช.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนัก ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	186
ช.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความยาว ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	189
ช.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	192
ช.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	195
ช.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	198
ช.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	201
ช.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซีโมโกลบิน ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	205

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ซ.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซีมาโคคริต ของปลาอุกกลมผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF	208
ณ.1 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	212
ณ.2 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	213
ณ.3 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	214
ณ.4 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	215
ณ.5 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	216
ณ.6 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	217

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงปลาในรอบวัน 16
2.2	การผันแปรในช่วงวันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในบ่อเลี้ยงปลา 17
2.3	ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 24
2.4	พื้นที่น้ำชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว 27
2.5	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS 28
2.6	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว 29
2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา 32
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 44
3.2	แผนผังการทดลอง 45
3.3	ขั้นตอนชุดทดลองติดตั้งอยู่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 46
3.4	ภาพตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS 48
3.5	ภาพตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF 48
3.6	ผลการศึกษาสารติดตามของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 54
3.7	แผนผังการหมุนเวียนน้ำในระบบ RAS 56
3.8	จุดเก็บตัวอย่างตัวอย่างคุณภาพน้ำของระบบ CAS และ RAS 57
4.1	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 68
4.2	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 69
4.3	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	
เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TSS	
ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF	
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	71
4.5	
เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TKN	
ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF	
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	72
4.6	
เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TP	
ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF	
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	74
4.7	
เปรียบเทียบค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF	
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	79
4.8	
เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	81
4.9	
เปรียบเทียบค่า pH ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	83
4.10	
เปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	84
4.11	
เปรียบเทียบค่าความขุ่นของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	85
4.12	
เปรียบเทียบสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	86
4.13	
เปรียบเทียบ COD ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	87
4.14	
เปรียบเทียบแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS	
และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	ร้อยละค่าน้ำหนักเฉลี่ยของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 92
4.16	ร้อยละค่าความยาวของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 93
4.17	ร้อยละค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 94
4.18	ร้อยละเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 95
4.19	ร้อยละค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคุณลักษณะ ระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 96
4.20	ร้อยละค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาคุณลักษณะ ระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 97
4.21	ร้อยละค่าอัตราการรอดตายของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน 98
4.22	ค่าสีโมโกลบินของปลาคุณลักษณะในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 101
4.23	ร้อยละสีโมโกลบินของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 101
4.24	ค่าฮีมาโตคริตของปลาคุณลักษณะในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 103
4.25	ร้อยละฮีมาโตคริตของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ 103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
C_c	=	ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำเข้าระบบ
C_i	=	ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำออกจากระบบ
cm	=	เซนติเมตร
CAS	=	ชุดควบคุม
$CaCO_3$	=	แคลเซียมคาร์บอเนต
CO_3^{2-}	=	คาร์บอเนต
COD	=	Chemical Oxygen Demand
d_n	=	ความลึกชั้นตัวกลาง
d_w	=	ความลึกน้ำ
DO	=	ออกซิเจนละลายน้ำ
EPA	=	Environmental Protection Agency
FWS	=	Free water surface flow Constructed Wetland
H^+	=	ไฮโดรเจนไอออน
HCO_3^-	=	ไบคาร์บอเนต
HLR	=	อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์
HRT	=	ระยะเวลาเก็บกัก
K_{20}	=	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
K_T	=	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิใด ๆ
L	=	ความยาว
n	=	อัตราส่วนช่องว่าง
$m^3 m^{-2} d^{-1}$	=	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
NH_3	=	แอมโมเนีย
NH_4^+	=	แอมโมเนียม
NO_2^-	=	ไนไตรท์
NO_3^-	=	ไนเตรท

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit
OH ⁻	=	ไฮดรอกไซด์
OLR	=	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
Q	=	อัตราการไหล
RAS	=	ชุดควบคุม
RAS-FWS	=	ชุดควบคุมระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว
RAS-SF	=	ชุดควบคุมระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว
SF	=	Subsurface flow Constructed Wetland
t	=	ระยะเวลาเก็บกัก
T	=	อุณหภูมิของน้ำเสียในระบบ
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TP	=	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
TSS	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
W	=	ความกว้าง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคมีมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้น้ำสำหรับบ้านเรือน การเกษตร การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การผลิตสินค้าและการอุตสาหกรรม เป็นต้น แหล่งน้ำที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นแหล่งน้ำที่ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินซึ่งมีน้ำอยู่ในปริมาณที่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูแล้งจะก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำ อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจัดได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีขนาดใหญ่อีกประเภทหนึ่ง มีความต้องการน้ำในปริมาณสูงและทำให้มีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นมาก หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องแล้วจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำ เนื่องจากลักษณะน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความเข้มข้นของค่าของแข็งและสารอาหารสูง ทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันซึ่งมีผลทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตต่อไปได้ น้ำเกิดการเน่าเสียส่งผลกระทบต่อการใช้งานของมนุษย์ในการอุปโภคและบริโภค ดังนั้นอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรมีการจัดการน้ำเสียอย่างเหมาะสม เพื่อเป็นการส่งเสริมการพัฒนาแบบยั่งยืนเพื่อให้มีทรัพยากรน้ำใช้ต่อไปได้ในอนาคต การหมุนเวียนน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงอีกครั้งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการจัดการน้ำเสียสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อป้องกันการเกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติและเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

การเพาะเลี้ยงปลาเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่สำหรับประเทศไทย ปลาดุกเป็นปลาที่นิยมเพาะเลี้ยงเป็นอันดับสองรองจากปลานิล เนื่องจากมีผลกำไรต่อหน่วยการผลิตสูง จากข้อมูลกรมประมงในปี พ.ศ. 2548 พบว่ามีปริมาณปลาดุก 149,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 5,000 ล้านบาท ในขณะที่อันดับหนึ่งได้แก่ ปลานิลมีปริมาณ 244,300 ตัน คิดเป็นมูลค่า 7,254 ล้านบาท (กรมประมง, 2548) ปลาดุกจัดเป็นปลาที่มีความต้องการของตลาดค่อนข้างสูง เป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจสามารถสร้างงานและรายได้ให้กับผู้เลี้ยงค่อนข้างมาก เนื้อปลาดุกไม่เพียงบริโภคภายในประเทศเท่านั้น ยังมีการส่งออกไปขายสู่ตลาดต่างประเทศด้วย พันธุ์ปลาดุกที่นิยมเลี้ยงกันมากในปัจจุบันได้แก่ ปลาดุกลูกผสม (*Hybrid catfish*) นิยมเลี้ยงมากกว่าร้อยละ 80 ของพันธุ์ปลาดุกทั้งหมด (Senanan et al., 2004) โดยเป็นลูกผสมระหว่างปลาดุกอุยกับปลาดุกรัสเซีย (ดูยักษ์หรือดูเทศ) ปลาดุกลูกผสมชนิดนี้จะเลี้ยงง่ายโตเร็ว มีความต้านทานโรคได้ดี ปลาดุกเป็นปลาน้ำจืดที่มีผลผลิต

ต่อพื้นที่สูงสุดและให้ผลผลิตต่อปีสูงสุดในอันดับ 1-3 โดยมีผลผลิตเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 40,000 ตัน/ปี (ยงยุทธ เคนคำภา, 2549) นอกจากนี้ปลาอุกเป็นปลาที่มีอวัยวะช่วยหายใจพิเศษที่สามารถดึงเอาออกซิเจนจากอากาศไปใช้ในการหายใจได้ ทำให้ปลาอุกสามารถอยู่ได้ในน้ำที่มีค่าการละลายออกซิเจนต่ำ (Dunham et al., 1983) ดังนั้นปลาอุกจึงมีความทนทานและอาศัยอยู่ในน้ำที่มีคุณภาพต่ำได้มากกว่าปลาชนิดอื่น ๆ น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากบ่อเลี้ยงปลาอุกจึงมีคุณภาพต่ำ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติสูง

การจัดการน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงปลา ในปัจจุบันมักจะใช้วิธีกักเก็บน้ำทิ้งไว้ในบ่อหรือเรียกว่าระบบบ่อผึ่ง (Oxidation pond) กลไกการบำบัดของเสียในระบบบ่อผึ่งอาศัยหลักการตามธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายของเสียโดยจุลินทรีย์ การสังเคราะห์แสงหรือการหมัก เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ร้อยละ 50-80 มีความต้องการระยะเวลาในการกักเก็บนานและใช้พื้นที่มาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำเอาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาอุก เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ใกล้เคียงกับระบบบำบัดแบบอื่น ๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส อีกทั้งยังสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย เชื้อโรคและโลหะหนักต่าง ๆ ได้ดี และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบ่อผึ่งมีความต้องการพื้นที่น้อยกว่า (Kooattatep et al., 2002) ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้าง มีค่าบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ และไม่ยุ่งยากในการควบคุมดูแลในขณะดำเนินงานเหมือนกับระบบบ่อผึ่ง (Kadlec and Kngiht, 1995; Cooper et al., 1996) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่ไม่ซับซ้อนมากในการกำจัดของเสีย ได้แก่ กระบวนการกรอง การตกตะกอน การดูดซับสารอาหารของพืชและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังเป็นแหล่งอนุรักษณ์และเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่าง ๆ มีความหลากหลายทางชีวภาพ ทำให้เกิดการรักษาสสมดุลให้กับสิ่งแวดล้อม (U.S.EPA, 2000)

จากผลการศึกษามาก พบว่าอัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น การบำบัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยและค่าแอมโมเนีย เป็นต้น (Ayaz, 2008; Rousseau et al., 2008; Sindilariu et al., 2008) จากการศึกษาของ Lin et al. (2005) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และลดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงนำเอาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มาใช้บำบัดน้ำเสียจากบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกทุกผสม เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ในการเลี้ยงปลาอุกทุกผสม

อีกครั้งและศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS เปรียบเทียบกับแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้น และหาค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ของสภาวะต่าง ๆ เพื่อนำมาประเมินค่าคงที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำจากการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดินภายใต้สภาวะอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง

1.2.2 เพื่อประเมินค่าคงที่ของการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบเพื่อนำไปประเมินพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลผลิตของปลาจุกผสมและผลกระทบต่อสุขภาพปลาจุกผสมระหว่างระบบการหมุนเวียนน้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงและระบบถ่ายน้ำจากภายนอกในการเพาะเลี้ยง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำจากการเลี้ยงปลาจุกผสมระหว่างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดินภายใต้สภาวะรับน้ำทางชลศาสตร์สูง ซึ่งมีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้พื้นผิวดินภายใต้สภาวะรับน้ำทางชลศาสตร์สูง ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

1.3.2 ศึกษาความเหมาะสมของคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมอีกครั้ง เช่น ค่า Alkalinity ค่าแอมโมเนีย และค่าฟอสฟอรัส

1.3.3 เปรียบเทียบผลผลิตของปลาจุกผสมระหว่างการเลี้ยงปลาจุกผสมในชุดควบคุม (CAS) และชุดทดลอง (RAS) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบทางด้านการเจริญเติบโต เช่น ความยาวลำตัว น้ำหนัก อัตราการรอดตาย อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

1.3.4 ศึกษาผลกระทบของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมต่อสุขภาพปลา โดยจะศึกษาค่าทางโลหิตวิทยาของปลา เช่น จำนวนเม็ดเลือดแดง และปริมาณฮีโมโกลบิน

1.3.5 ประเมินค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาคุณ
ลูกผสมโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการจัดการน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการหมุนเวียนน้ำ
กลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้ผลผลิตต่อ
หน่วยพื้นที่ที่มีการบำบัดน้ำเสียมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

1.4.3 เพื่อนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการ
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ ได้

1.5 สมมติฐานการวิจัย

1.5.1 ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน มี
ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาคุณลูกผสมเมื่ออัตราการรับน้ำทาง
ชลศาสตร์เพิ่มขึ้น

1.5.2 น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาคุณลูกผสมที่ผ่านการบำบัดจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ
ประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณลูกผสมได้อีกครั้ง และไม่
มีผลกระทบต่ออัตราผลผลิตของปลาคุณลูกผสม

1.5.3 เมื่อระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น จะมีผลทำ
ให้พื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบบำบัดจะมีค่าลดลง

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกผสม ที่สภาวะอัตรา การรับน้ำทางชลศาสตร์สูง มีรายละเอียด หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 ปลาดุกผสม

ปลาดุกผสมหรือปลาดุกอุย เป็นปลาน้ำจืดของไทยชนิดหนึ่งมีชื่อสามัญว่า *Hybrid catfish* และชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Carias macrocephalus* พบว่ามีการแพร่กระจายทั่วไปเกือบทุกภาค ของประเทศไทย ปลาดุกผสมเป็นปลาที่อาศัยอยู่ตามแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ท้องทุ่งนา มีอุปนิสัยการกินอาหารแบบไม่เลือก ส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักจะกินพวกซากสัตว์ที่เน่าเปื่อย หนอง แมลง และลูกปลาเล็ก ๆ เป็นอาหาร ปลาดุกผสมเป็นปลาไม่มีเกล็ด รูปร่างเรียวยาว ด้านข้างแบน หัวแบนลง กะโหลกท้ายทอยปานและโค้งมน เียงที่ครีบหุ้มมีฟันเลื่อยด้านนอก และด้านใน ครีบหลัง ครีบกัน ครีบหางแยกจากกัน ปลายครีบหางกลมมน มีหนวด 4 คู่ (สุรามาศ ย้อยสุวรรณ, 2543) มีอวัยวะพิเศษช่วยในการหายใจอยู่บริเวณช่องเหงือกมีทรวงตรงคล้ายต้นไม้เล็ก ๆ ลำตัวมีสีน้ำตาล จนดำถึงเข้มซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เป็นปลาในตระกูล Clarias เช่นเดียวกับกับปลาดุกค้ำ แต่ปลาดุกผสมแตกต่างจากปลาดุกค้ำที่ตรงบริเวณปลายกระดูกท้ายทอยมีลักษณะมน โคน นอกจากนั้นปลาดุกผสมเป็นปลาที่แข็งแรงอดทนต่อการขาดออกซิเจนได้ดี เป็นปลาที่มีการเจริญ พันธุ์ค่อนข้างเร็วภายในระยะเวลา 6 สัปดาห์ ก็จะเจริญเติบโตเต็มวัยสามารถนำมาเพาะพันธุ์ได้ เมื่อเลี้ยง ปลาไประยะหนึ่ง น้ำในบ่อจะมีคุณภาพเสื่อมลงเนื่องจากสิ่งขับถ่ายออกจากตัวปลาและเศษอาหาร เหลือตกค้างในบ่อปลาดุกผสมที่เลี้ยงจะเริ่มจับได้ตั้งแต่ปลาอายุ 8-10 สัปดาห์ ซึ่งจะมีขนาด 6-10 ตัวต่อกิโลกรัม ปลาดุกที่มีขนาด 5-10 cm จะมีอัตราการปล่อยจะอยู่ในช่วง 60-90 ตัวต่อตารางเมตร (Brown, 1977)

2.1.1 วิธีการเพาะเลี้ยงปลาดุก

2.1.1.1 การเตรียมบ่อ

การเลี้ยงปลาดุกผสมสามารถเลี้ยงได้ทั้งในบ่อดินและบ่อซีเมนต์ คือ

- 1) การเลี้ยงในบ่อซีเมนต์ ควรปรับสภาพของน้ำในบ่อที่เลี้ยงให้มีสภาพ เป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย ต้องแน่ใจว่าบ่อซีเมนต์จะต้องหมดฤทธิ์ของปูน ระดับน้ำในบ่อเมื่อ เริ่มปล่อยลูกปลาขนาด 2-3 cm ควรมีความลึกประมาณ 20-30 cm เมื่อลูกปลาเติบโตขึ้นค่อย ๆ เพิ่ม

ระดับน้ำให้สูงขึ้นตามลำดับโดยเพิ่มระดับน้ำประมาณ 5 ซม./อาทิตย์ ให้อาหารเม็ดประมาณ 3-7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ปลาจะเติบโตได้ขนาดประมาณ 100-200 กรัม/ตัว ในระยะเวลาเลี้ยงประมาณ 90 วัน อัตราการรอดประมาณร้อยละ 80 (กรมประมง, 2547)

2) การเลี้ยงในบ่อดิน การเลี้ยงในบ่อดินควรจะมีการเตรียมบ่อ ดังนี้

- จะต้องตากก้นบ่อให้แห้ง ปรับสภาพก้นบ่อให้สะอาด
- ใส่ปูนขาวเพื่อปรับสภาพของดิน
- นำน้ำเข้าบ่อโดยกรองไม่ให้ศัตรูของลูกปลาติดเข้ามากับน้ำจมนมี

ระดับน้ำลึก 30-40 cm วันรุ่งขึ้นจึงปล่อยปลาและเพื่อให้ลูกปลามีอาหารกินควรเติมไรแดงในอัตราประมาณ 5 กิโลกรัม เพื่อเป็นอาหารแก่ลูกปลาหลังจากนั้นจึงให้อาหารผสมแก่ลูกปลา ลูกปลาที่นำมาเลี้ยงควรตรวจดูว่ามีสภาพปกติการปล่อยลูกปลาลงบ่อเลี้ยงจะต้องปรับสภาพอุณหภูมิของน้ำในบ่อและน้ำในบ่อให้เท่า ๆ กันก่อน โดยการแช่ถุงบรรจุลูกปลาในน้ำประมาณ 30 นาที จึงปล่อยลูกปลา เวลาที่เหมาะสมในการปล่อยลูกปลาควรเป็นตอนเย็นหรือตอนเช้า (กรมประมง, 2547)

2.1.1.2 ขั้นตอนการเลี้ยง

1) อัตราปล่อยปลาคูกผสมขนาด 2-3 cm ควรปล่อยในอัตราประมาณ 40-100 ตัวต่อตารางเมตรซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการเลี้ยง คือ ชนิดของอาหารขนาดของบ่อและระบบการเปลี่ยนถ่ายน้ำ (กรมประมง, 2547)

2) การให้อาหารสำหรับรูปลานีละมีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาคูกผสม เพราะง่ายต่อการจัดการและทราบปริมาณอาหารที่ปลากินต่อมือหรือต่อวัน การให้อาหารควรปฏิบัติ ดังต่อไปนี้

- ให้อาหารปลาตรงตามเวลาทุกวัน
 - ให้อาหารปลาตามตำแหน่งเดิมทุกครั้ง
 - ปรับปริมาณอาหารเพิ่มขึ้นตามลำดับน้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น
- ประมาณสัปดาห์ละครั้ง

3) การถ่ายเทน้ำ ปริมาณน้ำในบ่อเลี้ยงปลาควรมีระดับลึก 20-30 เซนติเมตร เมื่อลูกปลาเติบโตขึ้นค่อย ๆ เพิ่มระดับน้ำให้สูงขึ้นตามลำดับ โดยเพิ่มระดับน้ำประมาณ 5 ซม./อาทิตย์ การถ่ายเทน้ำออกจากบ่อปลาประมาณร้อยละ 20 ของน้ำในบ่อ 3 วันต่อครั้ง หรือถ้า น้ำในบ่อเริ่มเสียจะต้องถ่ายน้ำมากกว่าปกติ

4) การป้องกันโรค การเกิดโรคของปลาคูกที่เลี้ยงมักจะเกิดจากปัญหาคุณภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงไม่ดีซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุของการให้อาหารมากเกินไปจนอาหารเหลือเน่าเสีย ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้เกิดโรคได้โดยต้องหมั่นสังเกตเมื่อปลาหยุดกินอาหารจะต้องหยุด

ให้อาหารทันที เพราะปลาฉลามผสมมีนิสัยชอบกินอาหารที่ใหม่ โดยถึงแม้จะกินอิ่มแล้วถ้าให้อาหารใหม่อีกก็จะคายหรือสำรอกอาหารเก่าทิ้งแล้วกินอาหารใหม่อีก (กรมประมง, 2547)

2.1.2 ค่าทางโลหิตวิทยาของปลาดุก

ค่าทางโลหิตวิทยามีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการศึกษาทางด้านโรคของปลา เนื่องจากระบบหมุนเวียนเลือดของปลามีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมภายนอกและระบบต่าง ๆ ในร่างกาย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางโลหิตวิทยาสามารถนำไปใช้เป็นหลักเกณฑ์ที่จะบอกถึงการตอบสนองของร่างกายต่อสิ่งที่มีมากระตุ้น ค่าทางโลหิตที่นิยมศึกษา ได้แก่

1) ค่าเม็ดเลือดแดงอัดแน่น (*Pack cell volume*) หรือฮีมาโตคริต (*hemotocrit*) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณเม็ดเลือดแดงต่อปริมาณเลือดทั้งหมด ผลที่ได้คิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าฮีมาโตคริตของปลาอยู่ในช่วงกว้างและมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดปลา อายุ ภูมิอากาศ สภาพแวดล้อม ฤดูกาล และความแตกต่างระหว่างเพศ ในปลาเพศผู้ฮีมาโตคริตสูงกว่าปลาเพศเมีย ค่าฮีมาโตคริตของปลาดุก มีค่าอยู่ในช่วง 20.43-41.12 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย 31.62 ± 1.03 เปอร์เซ็นต์ (กัมพัชพล ฐิริพงษ์, 2550) การเปลี่ยนแปลงค่าฮีมาโตคริตของปลามักเกิดจากปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียด เช่น การเลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง การอดอาหาร การจับและการขนส่ง คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสม การติดเชื้อแบคทีเรีย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน และการชักนำจากสารเคมี เป็นต้น (Klinger et al., 1983; Clem et al., 1984; Ellsaesser and Clem, 1986)

2) ฮีโมโกลบิน (*Hemoglobin*) เป็นองค์ประกอบสำคัญของเม็ดเลือดแดงซึ่งทำหน้าที่พาออกซิเจนไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย (พรวิชัย ลำเจียกเทศ, 2548)

ค่าทางโลหิตวิทยาจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการขยายพันธุ์ ความสามารถในการต้านทานโรค อีกทั้งยังเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการตอบสนองต่อความเครียดและสรีรวิทยาของปลา (รักพงษ์ เพชรคำ และ ไชยณรงค์ นาวานุเคราะห์, 2540; Ellis, 1982; Wendelaar, 1997; Barton, 1997)

2.1.3 ความสำคัญของปลาดุกผสมในตลาดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปลาดุก เป็นปลาที่มีการเพาะเลี้ยงมานานและจัดเป็นปลาเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่ได้มีการเลี้ยงกันอยู่ทั่วไป โดยมีการเพาะเลี้ยงเพื่อการอุปโภคบริโภคในครัวเรือนหรือการเพาะเลี้ยงเชิงอุตสาหกรรม ปลาดุกสามารถปล่อยเลี้ยงในอัตราการผลิตที่หนาแน่นมากสูง 74 ตัวต่อตารางเมตร (Stickney, 1993) และมีความต้านทานต่อคุณภาพน้ำต่ำ อีกทั้งยังเป็นปลาที่เลี้ยงง่าย เจริญเติบโตเร็ว จึงส่งผลให้ปลาดุกเป็นผลผลิตทางการเกษตรอีกชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มในการผลิตที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากตลาดมีความต้องการอย่างสม่ำเสมอรองจากปลานิล จะเห็นได้จากข้อมูลปริมาณผลผลิต

ในตลาดและผลมูลค่าสัตว์น้ำจืดในประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ปริมาณปลาจืดในปี พ.ศ. 2548 มีจำนวนผลผลิตประมาณ 149,000 ตัน (กรมประมง, 2548)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั่วประเทศ จำแนกตามชนิด ปี 2546-2548

ชนิดสัตว์น้ำ	2546		2547		2548	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
	(1,000 ตัน)	(ล้านบาท)	(1,000 ตัน)	(ล้านบาท)	(1,000 ตัน)	(ล้านบาท)
ปลาช่อน	28.2	1,735.70	29.8	1,757	24.9	1,543.30
ปลาดุก	115.4	3,702.20	166.1	5,102.70	149	4,998.90
ปลาหมอ	12.5	458.8	10.2	369.3	16.2	602.3
ปลาตะเพียน	88	2,735.60	106.8	3,294.70	108.9	3,218.90
ปลานิล	123.6	3,629.40	203.1	6,298.50	244.3	7,254.10
ปลาไน	9.4	323.5	13.8	441.9	10.3	352.6
ปลาสิด	36.1	1,417.60	37.8	1,511.60	37	1,468.90
ปลาชวา-เทโพ	26	578	33.7	858.5	37.2	803.3
ปลาไหล	0.4	25.4	0.3	26.6	0.2	8
ปลาอื่น ๆ	85.6	2,059.80	86.7	2,688.80	71.6	2,900.70
กุ้งก้ามกราม	28.5	3,039.70	33	3,898.70	31.8	4,359.10
กุ้งอื่น ๆ	0.5	43.1	0.2	16.5	1.4	57.9
สัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ	5.3	506.5	5.9	484.3	5.4	447.3

หมายเหตุ : กรมประมง (2548)

2.1.4 ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม

ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม เป็นปัจจัยในการบ่งบอกถึงอัตราการเจริญเติบโตและสมรรถภาพของผลผลิตในการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) น้ำหนัก (Weight) มีหน่วยเป็นกรัม มีความสัมพันธ์กับค่าความยาวของปลาดุกลูกผสม เมื่อระยะเวลาในการเลี้ยงเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักและความยาวของปลาดุกลูกผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น

2) ความยาว (Length) มีหน่วยเป็นเซนติเมตร มีความสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักของปลาดุกลูกผสม ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง

3) น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (Average daily weight gain : ADG) มีหน่วยเป็นกรัมต่อวัน เป็นค่าน้ำหนักตัวของปลาดุกลูกผสมที่เพิ่มขึ้นต่อตัวต่อวัน โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยง ตั้งแต่การชั่งน้ำหนักครั้งแรกจนถึงการชั่งน้ำหนักสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง

4) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม (Weight gain) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของปลาดุกลูกผสมตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

5) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate : SGR) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อวัน มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในเพาะเลี้ยงและน้ำหนักของปลาดุกลูกผสมตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง

6) อัตราการเปลี่ยนเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio : FCR) ไม่มีหน่วย เป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณอาหาร (หน่วย) ที่ปลาดุกลูกผสมกินเข้าไปต่อน้ำหนักตัวของปลาดุกลูกผสมที่เพิ่มขึ้น 1 หน่วย

7) อัตราการรอดตาย (Survival rate) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนการรอดชีวิตของปลาดุกลูกผสมหลังสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง

2.2 ลักษณะของน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลา

2.2.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อปลา (Lawson, 1995) เพราะปลาเป็นสัตว์เลือดเย็น ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิร่างกายให้คงที่ได้ ดังนั้นสัตว์เลือดเย็นเหล่านี้จะทนต่อสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันได้ในช่วงที่แคบกว่าสัตว์เลือดอุ่น ผลที่เกิดขึ้นจากการที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันทำให้สัตว์น้ำอาจช็อคถึงตายได้ (Thermal death) (สุภาพร สุกรีเหลือง, 2538) อุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นอาจทำให้การกินอาหารของปลาหยุดชะงัก มีการเจริญเติบโตช้าลงและอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจะทำให้ปลากระวนกระวายมีอาการลอยตัวขึ้นมาบริเวณผิวน้ำ อ่อนเพลียจนตายได้ และมีผลต่อการฟักไข่ของปลาอีกด้วย สำหรับปลาดุกลูกผสมอุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงจะอยู่ในช่วง 27-29°C (Tucker and Robinson, 1990)

2.2.2 ความเป็นกรดค้างของน้ำ (Positive potential of Hydrogen ions)

ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ หรือเรียกว่า pH เป็นค่าที่แสดงให้ทราบว่าน้ำหรือสารละลายนั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือด่าง บอกถึงความเข้มข้นของ H^+ ระดับความเป็นกรดเป็น

ค่าของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-14 น้ำธรรมชาติโดยทั่วไปมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-9 สำหรับบ่อเลี้ยงปลา ค่า pH ของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยในช่วงบ่ายแพลงค์ตอนพีชและพีชน้ำใช้คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการสังเคราะห์แสง ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลง ค่า pH ของน้ำจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนในช่วงเช้ามีค่าน้อยเนื่องจากมีการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำแต่ไม่มีกิจกรรมในการสังเคราะห์แสง ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณสูงขึ้น มีผลทำให้ค่า pH ของน้ำลดลง ค่าของ pH ที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ระหว่าง 6-9 (Tucker and Hagraves, 2004) และค่า pH ของน้ำควรจะเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2 หน่วยในรอบวัน ระดับ pH ในบ่อปลา มีความสำคัญมาก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของปลา ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ความเป็นกรดค่างของน้ำนอกจากจะมีผลต่อสัตว์น้ำโดยตรงแล้วยังมีผลทางอ้อม เช่น ทำให้สารพิษชนิดอื่น ๆ มีการแตกตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลง ค่า pH ที่สูงขึ้นจะทำให้ความเป็นพิษของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น (มันลิน ตันทุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544; Lawson, 1995)

2.2.3 ความเป็นกรดของน้ำ (Acidity)

ความเป็นกรดของน้ำ หมายถึง ความสามารถของน้ำที่จะให้โปรตอน หรือ H^+ เพื่อให้ค่าความเป็นกลาง (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2540) น้ำที่มีความเป็นกรดสูงแต่อาจจะมีค่า pH ไม่อยู่ในระดับที่เป็นกรดมาก หากน้ำดังกล่าวสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้ดี ในแหล่งน้ำตัวที่ควบคุมไม่ให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงมาก ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนเนต เป็นตัวควบคุมความเป็นกรดของน้ำเกิดจากหลายสาเหตุ ดังนี้

1) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide acidity) น้ำที่มี pH ต่ำกว่า 8.5 จะมีความเป็นกรดปะปนอยู่เสมอ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญตามแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการดูดซึมและถ่ายเทระหว่างน้ำกับอากาศตลอดเวลา เพื่อรักษาปริมาณของมันให้คงที่ คือให้อยู่ในสภาวะที่สมดุล ปกติน้ำใต้ดินจะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากกว่าเนื่องจากการไหลผ่านชั้นดินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตซึ่งไม่เพียงพอจะทำให้สะเทินคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เกิดไบคาร์บอเนต ความเป็นกรดของน้ำที่เกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว จะไม่ทำให้ pH ของน้ำลดลงต่ำกว่า 4.5 (มันลิน ตันทุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544)

2) แร่ธาตุ (Mineral acidity) ค่าความเป็นกรดที่มี pH ต่ำกว่า 4.5 จะเกิดกรดของแร่ธาตุบางชนิด เช่น กรดกำมะถัน หรือเกลือแร่บางชนิดที่ละลายน้ำแล้วมีสภาพเป็นกรด เช่น เกลือของเหล็ก พบได้จากการถ่ายเทของเสียของโรงงานอุตสาหกรรม แต่น้ำธรรมชาติก็อาจมีกรดจากแร่ธาตุได้เช่นกัน ความเป็นกรดโดยตัวมันเองไม่ถือว่าเป็นสารมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำเพียงแต่ใช้เป็นเครื่องมือที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ผลที่เกิดขึ้นต่อ

สัตว์น้ำส่วนมากจะปรากฏในรูปความเป็นกรดเป็นด่าง ความเป็นกรดของน้ำอาจจะมีผลทำให้ความเป็นพิษของสารพิษบางชนิดเปลี่ยนแปลงไปได้ (มันลิน ตัณฑุเลศวร์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของค่า pH ต่อสุขภาพของปลา

ระดับ pH	ผลที่ปรากฏ
3.0-3.5	มีปลาไม่มากที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้หลายชั่วโมง ถึงแม้ว่าจะมีพืชและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจะปรากฏอยู่ก็ตาม
3.5-4.0	ระดับจำกัดการมีชีวิตของปลา salmonids แต่ปลาบางชนิด เช่น roach tench perch pike สามารถอยู่ได้ แต่ต้องภายหลังจากการปรับตัวของปลาแล้ว
4.0-4.5	เป็นระดับอันตรายสำหรับปลา salmonids roach tench ปลาทอง และปลาไน ซึ่งไม่มีการปรับตัวมาก่อนหน้านี้ ระดับอันตรายนี้ยังสัมพันธ์กับขนาดและอายุของปลาค้วย
4.5-5.0	เป็นอันตรายต่อไข่และตัวอ่อนของ salmonids และในปลาโตที่เคยอยู่ในน้ำอ่อนที่มีแคลเซียม โซเดียม และคลอไรด์น้อย
5.0-6.0	ไม่เป็นอันตรายต่อปลาถ้าหากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ ไม่มีเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ในระดับพีเอชต่ำของระดับนี้จะเป็นอันตรายต่อ salmonids ถ้าหากมีแคลเซียม โซเดียม คลอไรด์ และอุณหภูมิของน้ำต่ำ
6.0-6.5	ไม่เป็นอันตรายต่อปลาชนิดใด ถึงแม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
6.5-9.0	ไม่เป็นอันตรายต่อปลา ถึงแม้จะมีความเป็นพิษของสารอื่นที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในระดับนี้ก็ตาม
9.0-9.5	เป็นอันตรายต่อปลา salmonids และ perch หากอยู่ในระดับนี้นาน ๆ
9.5-10.0	เป็นอันตรายต่อการพัฒนาของปลาบางชนิด และจำกัดการมีชีวิตของปลา salmonids หากอยู่เป็นเวลานาน
10.0-10.5	ปลา salmonids และ roach มีชีวิตอยู่ได้ในระยะสั้น
10.5-11.0	ปลา salmonids จะตายทันที และปลาทอง ปลาไน tench และ pike จะทนอยู่ได้นาน
11.0-11.5	ปลาทุกชนิดจะตายอย่างรวดเร็ว

หมายเหตุ : มงคล ปริมผล (2533)

2.2.4 สภาพด่างของน้ำ (Alkalinity)

ความเป็นด่างของน้ำเป็นความสามารถของน้ำที่จะสะเทินกรดหรือที่จะรับโปรตอนความเป็นด่างของน้ำประกอบไปด้วย คาร์บอเนต (CO_3) ไบคาร์บอเนต (HCO_3) และไฮดรอกไซด์ (OH) เป็นส่วนใหญ่ (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2540) ความเป็นด่างของน้ำมักเกิดขึ้นจาก

- 1) เกลือของกรดอ่อน เช่น พวกคาร์บอเนต บอเรต ฟอสเฟต และซิลิเกต
- 2) กรดอ่อนและเบสอ่อน เช่น ไฮดรอกไซด์ ในบางสภาวะธรรมชาติจะมีคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์สูง เช่น น้ำที่มีแพลงค์ตอนพืชมาก

ค่าความเป็นด่างตามธรรมชาติไม่ถือว่าเป็นสารพิษ โดยปกติในบ่อเลี้ยงปลาจะมีค่าความเป็นด่างอยู่ระหว่าง 40-400 mg/l as CaCO_3 (Lawson, 1995) ค่าความเป็นด่างจะมีผลเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น ค่า pH ของน้ำ ค่าความเป็นกรด และค่าความกระด้าง (Hardness) เป็นต้น คุณสมบัติของค่าความเป็นด่างของน้ำคือ เป็นตัวช่วยควบคุมไม่ให้แหล่งน้ำมีการเปลี่ยนแปลง pH เร็วเกินไป ถ้าค่าความเป็นด่างสูงจะป้องกันมิให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงมาก ถ้าความเป็นด่างต่ำ การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในรอบวันจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

ค่าความเป็นด่างของน้ำกับความกระด้างของน้ำมักมีความสัมพันธ์กัน น้ำที่เหมาะสมสำหรับการใช้เลี้ยงสัตว์ควรมีค่าความเป็นด่างและความกระด้างใกล้เคียงกัน เราสามารถปรับความเป็นด่างได้โดยการเติมปูนขาว ในบางพื้นที่มีปัญหาเกี่ยวกับค่าความเป็นด่างของน้ำสูงและค่าความกระด้างต่ำมักทำให้ค่า pH ของน้ำสูงจนทำให้ปลาตายได้ โดยเฉพาะในช่วงตอนบ่ายซึ่งมีแพลงค์ตอนพืชมีการสังเคราะห์แสงสูง การแก้ไขทำได้โดยใช้สารเคมี เช่น ปูนแอมโมเนียมอะลูมิเนียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลเฟต (ประเทือง เขาวัววัยกลาง, 2534)

2.2.5 ความโปร่งใสของน้ำ (Transparency depth)

ค่าความโปร่งใสของน้ำเป็นความสามารถในการวัดการส่องผ่านของแสงในการทะลุผ่านลงไปใต้น้ำ ความโปร่งใสของน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 30-60 cm ถ้าค่าความโปร่งใสต่ำกว่า 30 cm แสดงว่าน้ำมีความขุ่นหรือมีปริมาณแพลงค์ตอนมากเกินไป แต่ถ้าน้ำมีความโปร่งใสมากกว่า 60 cm ขึ้นไปแสดงว่าน้ำนั้นไม่มีความอุดมสมบูรณ์ ไม่เหมาะต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (มงคล ปริมผล, 2533)

2.2.6 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นในน้ำเกิดขึ้นจากการที่น้ำมีสารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เช่น ดิน ทราย สารอินทรีย์ขนาดเล็ก แพลงค์ตอน จุลชีพขนาดเล็ก เป็นต้น โดยมีผลต่อการยอมให้แสงส่องผ่านลดลง ซึ่งมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์แสงของแพลงค์ตอนพืช สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำจะปกคลุม

ร่างกายของสัตว์ มีผลทำให้การแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดประสิทธิภาพลง ค่าความขุ่นที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงปลาอยู่ระหว่าง 5-10 NTU (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544)

2.2.7 สารอาหารต่างๆ

2.2.7.1 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติมีปริมาณไม่สูงมากแต่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นสารอาหารที่กำหนดปริมาณผลผลิตของสัตว์น้ำที่ทำการเพาะเลี้ยงในบ่อ การขาดแคลนฟอสฟอรัสมีผลทำให้ผลผลิตต่ำ ฟอสฟอรัสในน้ำมีความสัมพันธ์กับฟอสฟอรัสในดินก้นบ่อ (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) ฟอสฟอรัสอาจพบในรูปสารละลายน้ำหรืออนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลา ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้มักเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ส่วนสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำมักเป็นออร์โธฟอสเฟต อนุภาคแขวนลอยที่มีฟอสฟอรัส ได้แก่ แพลงก์ตอนต่างๆ แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายหรือตะกอนแขวนลอยให้กลายเป็นออร์โธฟอสเฟตได้ ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำของบ่อเลี้ยงปลา ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.10-0.50 mg/l (วัดในรูปของฟอสฟอรัส) ถ้าน้ำในบ่อเป็นน้ำกระด้างที่มีแคลเซียมมาก และมีค่า pH สูง ฟอสเฟตจะตกผลึกในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต ทำให้มีออร์โธฟอสเฟตละลายในน้ำน้อยลง ถ้าค่า pH ยิ่งสูงขึ้นก็ยิ่งจะมีออร์โธฟอสเฟตละลายในน้ำได้น้อยลง (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ มันรัช ตันฑุลเวศม์, 2547)

2.2.7.2 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนละลายน้ำมีบทบาทต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ถ้าก๊าซไนโตรเจนละลายอยู่ในน้ำเกินจุดอิ่มตัวอาจมีผลทำให้เกิดโรคฟองก๊าซในเลือด (Gas Bubble Disease) (Lawson, 1995) เมื่อปลาอาศัยอยู่ในน้ำที่มีไนโตรเจนละลายน้ำสูงเกินจุดอิ่มตัวปกติ กระแสเลือดในตัวปลาจะดูดซับไนโตรเจนจากน้ำ เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างไนโตรเจนในน้ำและในเลือด ปลาจึงมีไนโตรเจนละลายอยู่ในเลือดมากเกินกว่าปกติ หากมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจนมีผลทำให้ไนโตรเจนบางส่วนในเลือดกลายเป็นก๊าซ ฟองก๊าซจะทำให้เกิดภาวะอุดตันในหลอดเลือด ทำให้การหมุนเวียนของเลือดเกิดติดขัดปลาจะตายได้ (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544)

2.2.8 ก๊าซต่างๆในน้ำ

2.2.8.1 ออกซิเจนละลายน้ำ

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งที่อาศัยอยู่บนพื้นดินและในน้ำ สิ่งมีชีวิตในน้ำได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของพืชที่ปล่อย

ออกซิเจนอิสระออกมาละลายอยู่ในน้ำและจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่พื้นน้ำ (เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2525)

บ่อปลาที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่น้อยเป็นเวลานาน ๆ อาจเป็นอันตรายต่อปลาได้ ภายใต้อากาศดังกล่าวปลาอาจติดเชื้อโรคจากแบคทีเรียได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามปลาที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่สูงเกินระดับอึดตัวก็เป็นโรคได้ง่าย โรคที่เกิดจากน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่มากเกินไป เรียกว่า โรคฟองอากาศในเลือด ซึ่งเกิดจากการเกิดฟองก๊าซในเลือด ในขณะที่ปลาเคลื่อนตัวจากน้ำที่มีออกซิเจนสูงมายังน้ำที่มีออกซิเจนต่ำ โรคดังกล่าวทำให้ปลาตาย ในขณะที่เคลื่อนที่ไปมาอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่น้อย (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัช ตัณฑุลเวศม์, 2547) การศึกษาอิทธิพลของออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของออกซิเจนละลายน้ำที่มีต่อปลา

ออกซิเจนละลายน้ำ	อิทธิพลที่มีต่อปลา
< 5 mg/l	อาจถึงตายถ้าเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ๆ หลายชั่วโมง
1-5 mg/l	ปลามีชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้าเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปลาจะ เจริญเติบโตช้า และไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ดี
> 5 mg/l	เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ แต่ไม่เกินระดับอึดตัว

หมายเหตุ : มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา (2544)

ปลาแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการทนออกซิเจนต่ำไม่เท่ากัน บางชนิดอาจมีชีวิตอยู่ในน้ำที่มี DO อยู่ 0.5 mg/l ได้หลายชั่วโมง แต่ปลาหลายชนิดทน DO ต่ำได้เพียง 3 mg/l โดยทั่วไประดับ DO ต่ำสุดที่ปลาจะทนได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส ปลาอาจมีชีวิตอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่ 0.5 mg/l ได้หลายชั่วโมง ปลามักทนออกซิเจนละลายน้ำต่ำได้ดีในฤดูหนาวมากกว่าฤดูร้อน สำหรับลำน้ำทั่วไปปลาเริ่มตายเมื่อมี DO ต่ำกว่า 3 mg/l ดังนั้นควรมีค่า DO อย่างน้อย 5 mg/l ปลาจึงจะมีชีวิตอยู่ได้เป็นปกติ (Stickney, 1993) ปลาคุกกุผสมมีอัตราการรอดตายสูงกว่าปลาคุกอเมริกัน (*Channel catfish*) เมื่ออาศัยอยู่ในน้ำที่ค่าออกซิเจนละลายอยู่น้อย (Dunham et al., 1983) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบอัตราการตายของปลาคูกอเมริกันและปลาคูกลูกผสม
ที่ระดับค่าออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลักษณะที่เพาะเลี้ยง	ร้อยละอัตราการตาย ของปลาคูกอเมริกัน	ร้อยละอัตราการตาย ของปลาคูกลูกผสม
บ่อ	50.5	7.5
แปลงทดลอง	87.5	51
ถัง	100	33

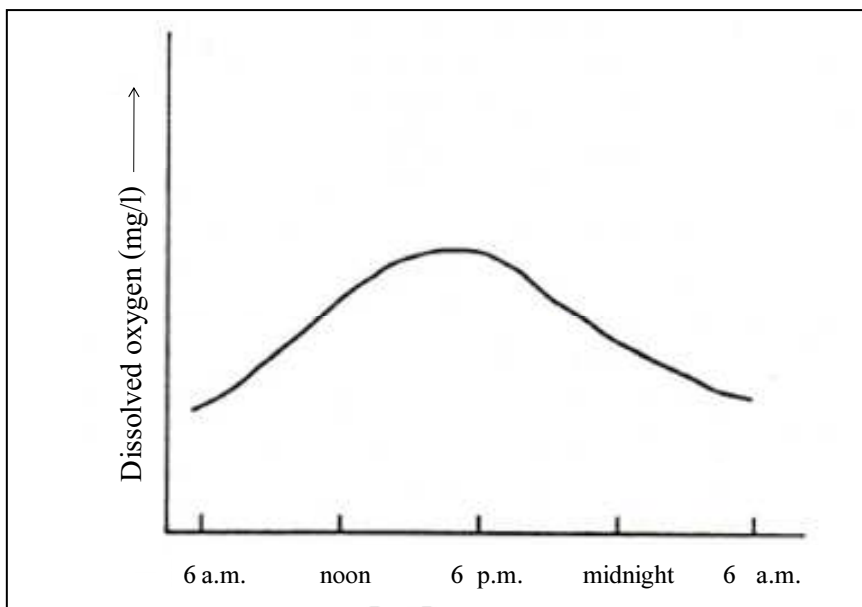
หมายเหตุ : Dumham et al., (1983)

ปัญหาการขาดแคลนออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา มักมีสาเหตุมาจากการมีปริมาณแพลงก์ตอนมากเกินไป (เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2525) และสาเหตุที่ทำให้มีแพลงก์ตอนมากเกินไปก็เนื่องมาจากการเติมปุ๋ยหรือให้อาหารมากเกินไป ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะมีปริมาณน้อยในช่วงก่อนที่พระอาทิตย์ขึ้นและจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันจนถึงช่วงเย็นและจะลดลงในช่วงกลางคืนเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงสิ้นสุดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปน้ำที่ความโปร่งใสของน้ำระหว่าง 30-60 cm เป็นน้ำที่มีแพลงก์ตอนมากบ่อน้ำที่มีความลึก 10-20 cm ออกซิเจนมักเหลือน้อยมากในตอนกลางคืน จนถึงขั้นปลาลอยหัวที่ผิวน้ำได้ การขาดแคลนออกซิเจนในบ่อปลา มักเกิดขึ้นในตอนกลางคืน (Lawson, 1995)

2.2.8.2 ก๊าซไนโตรเจนละลายน้ำ

สัตว์น้ำเกือบทุกชนิดขับถ่ายของเสียที่เป็นสารไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 50 อยู่ในรูปของแอมโมเนีย แอมโมเนียเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางปุ๋ย และอาหารปลา ซึ่งสิ่งขับถ่ายของปลาและการเน่าเปื่อยของสารประกอบไนโตรเจน (มันซิน ตันทุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) แอมโมเนียในน้ำอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระ (NH_3) หรือแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) แอมโมเนียอิสระเป็นพิษอย่างมากต่อปลา แต่แอมโมเนียไอออนไม่เป็นพิษ สัดส่วนของ NH_3 และ NH_4^+ ในน้ำขึ้นอยู่กับ pH อุณหภูมิและปริมาณเกลือแร่ ปริมาณ NH_3 จะเพิ่มตามระดับ pH และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (Lawson, 1995) pH มีอิทธิพลต่อเคมีของแอมโมเนียในน้ำมากกว่าอุณหภูมิ ปริมาณเกลือแร่ในน้ำมีอิทธิพลน้อยเช่นเดียวกับอุณหภูมิแต่มีอิทธิพลในทางตรงกันข้าม คือแอมโมเนียจะมีน้อยลงถ้ามีปริมาณเกลือแร่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (2.1)



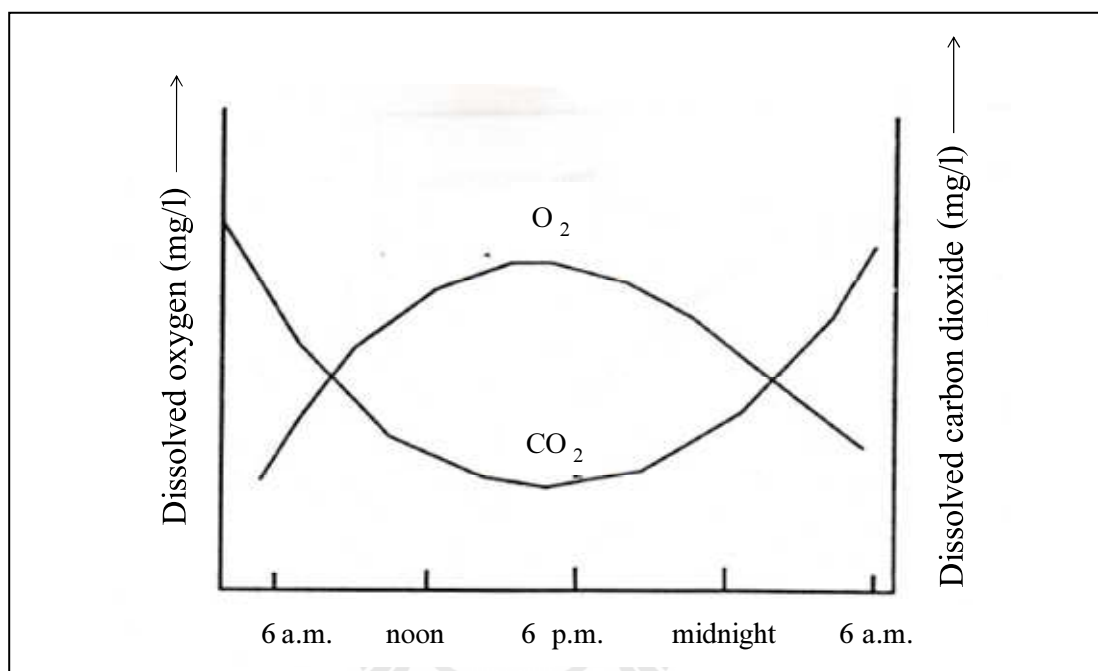


รูปที่ 2.1 แสดงค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงปลาในรอบวัน (Lawson, 1995)

2.2.8.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีความสามารถละลายน้ำได้ดี คาร์บอนไดออกไซด์มีปรากฏอยู่ในแหล่งน้ำทั่วไป ซึ่งในระดับปกติไม่เกิน 10 mg/l และสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจนประมาณ 200 เท่า แต่เนื่องจากมีคาร์บอนไดออกไซด์น้อย จึงมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับก๊าซอื่น ๆ คาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2525) ในบ่อเลี้ยงปลา คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่จะถูกใช้โดยพืชขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง ในขณะที่บ่อปลาจะได้คาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหายใจของพืชและสัตว์และการเน่าเสียของอินทรีย์สาร โดยแบคทีเรีย คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการย่อยสลายของอินทรีย์สาร โดยแบคทีเรียนี้ จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิ (ประเทือง เชาวรัชกลาง, 2534) ในตอนกลางวันคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชใช้เพื่อการสังเคราะห์แสงมักมีปริมาณสูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำ จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อเลี้ยงปลาลดลง ในบ่อเลี้ยงปลาที่มีแพลงก์ตอนมาก จะทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อาจถูกใช้ไปจนหมดตั้งแต่เช้า เมื่อถึงเวลากลางคืนซึ่งไม่มีการสังเคราะห์แสงแต่ยังคงมีกระบวนการหายใจและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ดีเนื่องจากอุณหภูมิลดลง จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงรุ่งเช้าของวันใหม่ จากนั้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อย ๆ ลดน้อยลง จนกระทั่งถึงตอนสายหรือตอนบ่าย

เนื่องจากพืชโดยเฉพาะแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2525) การผันแปรของคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การผันแปรดังกล่าวเกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงปลาที่มีแพลงก์ตอนพืชหนาแน่นจะรุนแรงกว่าในบ่อเลี้ยงปลาที่มีแพลงก์ตอนพืชเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.2 การผันแปรในช่วงวันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบ่อเลี้ยงปลา (Lawson, 1995)

2.2.9 สารพิษต่างๆ ในน้ำ

2.2.9.1 พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียจะทำให้ปลาไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือด ถ้า NH_3 ในน้ำมีปริมาณสูงเกินไปในขณะที่ระดับแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้น ปลาขับถ่ายแอมโมเนียได้น้อยลงและระดับแอมโมเนียในเลือดและในเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ทำให้ pH ของเลือดมีค่าสูงขึ้นและเป็นผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน ความเข้มข้นเพียงประมาณ 0.025 mg/l ก็สามารถส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของปลา ถ้าจำกัดปริมาณของแอมโมเนียอิสระไม่ให้เกิน 0.025 mg/l (เพื่อไม่ให้เป็นพิษต่อปลา) ปริมาณของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) ในน้ำที่มี pH และอุณหภูมิต่างๆ จะต้องมีค่าไม่เกินตัวเลขในตารางที่ 2.5 จะเห็นว่า ถ้าอุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้น

ของแอมโมเนียทั้งหมดจะสูงถึง 3.1 mg/l ได้โดยไม่เป็นพิษต่อปลาในน้ำที่มี pH 7 แต่ถ้า pH ของน้ำสูงถึง 9 แอมโมเนียทั้งหมดจะต้องไม่เกิน 0.056 mg/l มิฉะนั้นแล้วปลาจะเป็นอันตรายเนื่องจากแอมโมเนียเป็นพิษ (มันซิน คัตลเวสม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) ค่าของแอมโมเนียที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีน้อยกว่า 1 mg/l (Lawson, 1995)

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) ที่ยอมให้มีได้ในน้ำ

โดยไม่เป็นอันตรายหรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา (NH_3 ไม่เกิน 0.025 mg/l)

อุณหภูมิ (°C)	pH = 7	pH = 7.5	pH = 8	pH = 8.5	pH = 9	pH = 9.5
5	19.6	6.3	2	0.65	0.22	0.088
10	12.4	5.9	1.37	0.45	0.16	0.068
15	9.4	4.3	0.93	0.31	0.12	0.054
20	6.3	2	0.65	0.22	0.088	0.045
25	4.4	1.43	0.47	0.17	0.069	0.039
30	3.1	1	0.33	0.12	0.056	0.035

หมายเหตุ : มันซิน คัตลเวสม์ และ ไพพรรณ พรประภา (2544)

2.2.9.2 พิษของไนไตรท์

ไนไตรท์สามารถทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินได้ ทำให้เมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ ปลาที่ได้รับไนไตรท์จึงมีเมทฮีโมโกลบินในเลือดซึ่งเห็นได้เป็นสีน้ำตาล ปลาที่มีอาการเช่นนี้ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากไม่สามารถใช้ออกซิเจน การสะสมตัวของไนไตรท์เชื่อว่าเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (มันซิน คัตลเวสม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) ค่าของไนไตรท์ที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าน้อยกว่า 0.1 mg/l (Meade, 1989)

2.2.10 พิษของโลหะหนัก

ปัจจุบันแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะถูกปนเปื้อนด้วยสารชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยเกิดจากการทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม ที่อยู่อาศัย เป็นต้น เนื่องจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต้องอาศัยแหล่งน้ำจากธรรมชาติ (ประเทือง ลำเจียกเทศ, 2534) สารพิษเหล่านี้จึงมีผลกระทบต่อ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยตรงสารพิษที่กล่าวมามี 2 ประเภท คือ

1) โลหะหนัก เป็นสารที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เช่น ปรอท ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และโครเมียม สารเหล่านี้ทำอันตรายต่อสัตว์น้ำในระดับความเข้มข้นต่ำและจะสะสมอยู่ในร่างกายของสัตว์ ซึ่งสามารถถ่ายทอดมายังผู้บริโภคได้

2) สารเคมีจากการเกษตรกรรม โดยการใช้สารเคมีในการกำจัดแมลงศัตรูพืช สารปราบวัชพืช สารกำจัดเชื้อรา ซึ่งมีมากมายหลายชนิด บางชนิดสลายตัวเร็ว บางชนิดสลายตัวช้า

ตารางที่ 2.6 สรุปรายละเอียดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในแต่ละพารามิเตอร์

ตารางที่ 2.6 คุณภาพน้ำที่ใช้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	ปลา ¹	หอย ¹	ปลาอุก	
1	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย	ไม่เกิน	MPN/100 มล.	10	1	
		สูงสุด	MPN/100 มล.	100	5	
2	อินทรีย์สาร					
	COD ²	ไม่เกิน	mg/l	50		
	BOD	ต่ำสุด	mg/l	10	5	10.5 ²
		สูงสุด	mg/l	30	20	41.2 ²
	DO	ไม่เกิน	mg/l	5		> 5 ³
น้ำมัน	สูงสุด	mg/l	5	2		
3	pH	-	6.5-8.5	6.5-8.5	7.5 – 8.5 ³	
4	คุณสมบัติทางกายภาพ					
	ความขุ่น	ต่ำสุด	NTU	5	5	
		สูงสุด	NTU	10	50	
	สี	ต่ำสุด	หน่วยสี	5	10	
		สูงสุด	หน่วยสี	10	50	
	SS	ต่ำสุด	mg/l	10	10	40 ⁴
		สูงสุด	mg/l	20	100	225 ⁴
	สารลอยน้ำ(Floating Solids)	ต่ำสุด	mg/l	ไม่มี	ไม่มี	
สูงสุด		mg/l	มีได้บ้าง	มีได้บ้าง		
Alkalinity ⁶		mg/l	10-400			

ตารางที่ 2.6 คุณภาพน้ำที่ใช้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	ปลา ¹	หอย ¹	ปลาจุก	
5	คุณสมบัติทางเคมี					
	Total Solids	ต่ำสุด	mg/l	1,000		
		สูงสุด	mg/l	5,000		
	Chloride Cl ⁻	ต่ำสุด	mg/l	1,000		
		สูงสุด	mg/l	2,500		
	สารที่เป็นพิษ	ต่ำสุด	mg/l	0.5	1	
		สูงสุด	mg/l	10		
	Phenol	ต่ำสุด	mg/l	0.1	1	
		สูงสุด	mg/l	1	10	
	Ammonia ⁵ (NH ₄)		mg/l	0.02 - 1		
	Ammonia ⁵ (TAN)		mg/l	< 1		
	Nitrite ⁵ (NO ₂)		mg/l	< 0.1		
Nitrate ⁵ (NO ₃)		mg/l	0 - 3			
Total phosphorus ⁵		mg/l	< 0.5			
6	อุณหภูมิ	°C	16	21	27 - 29 ⁶	

หมายเหตุ : ¹ มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา (2544)

² Tucker and Hargreaves (2003)

³ Stickney (1993)

⁴ Tucker and Abramo (2008)

⁵ Meade (1989)

⁶ Tucker and Robinson (1990)

2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงปลามักจะใช้วิธีกักเก็บน้ำทิ้งไว้ในบ่อหรือระบบบ่อผึ่ง (Oxidation pond) ซึ่งมีความสามารถในการรองรับและบำบัดของเสียได้เช่นเดียวกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แต่กลไกหรือกระบวนการในการบำบัดของเสียในบ่อผึ่งจะไม่ใช่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพดีเท่ากับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพราะบ่อผึ่งไม่มีชั้นกรองและพืชภายในระบบ ดังนั้นกลไกในการบำบัดของเสียในบ่อผึ่งจึงอาศัยหลักการตามธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายของของเสีย การสังเคราะห์แสงเพื่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการเก็บกักค่อนข้างนานเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) แม้ว่ากระบวนการบำบัดของเสียในบ่อผึ่งและพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีลักษณะเหมือนกัน คือ ใช้หลักการทางธรรมชาติ แต่การออกแบบและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับระบบบ่อผึ่งแตกต่างกัน ในตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบเกณฑ์การออกแบบและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาในการเก็บกักน้อยกว่าระบบบ่อผึ่ง ทำให้ลดพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดอินทรีย์ใกล้เคียงกับระบบบ่อผึ่ง และมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและตะกอนแขวนลอยสูงกว่าระบบบ่อผึ่ง

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์การออกแบบและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของบ่อผึ่ง และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พารามิเตอร์	บ่อผึ่ง	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
เกณฑ์การออกแบบ		
- Loading Rate (ha/m ³ -d)	3-14	2.14-7.16
- ความลึก (m)	1.2-2.5	0.1-0.6
- เวลาเก็บกัก (d)	80-180	4-15
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (%)		
- สารอินทรีย์	50-80	70-96
- ไนโตรเจน	10-50	25-85
- ฟอสฟอรัส	10-50	10-75
- ตะกอนแขวนลอย	50-60	60-90

หมายเหตุ : Koottatep et al. (2002)

2.4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (constructed wetlands)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน เป็นระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอึดตัวด้วยน้ำไว้ได้ (Kadlec and Khigh, 1996) ความลึกของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีระดับแตกต่างกันไปและน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในบริเวณพืชซึ่งกันอยู่หนาแน่นอย่างช้า ๆ พืชส่วนใหญ่ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพน้ำท่วมและสภาพขาดออกซิเจนของดินได้ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชชนิดต่าง ๆ เช่น พืชจำพวกอ้อ (*Phragmites*) กก (*Scirpus*) และธูปฤาษี (*Typha*) บนตัวกลาง ได้แก่ ทราย กรวดหรือดิน ซึ่งใช้เป็นตัวกรอง ในบางครั้งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาจถูกออกแบบให้มีรูปร่างแตกต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นร่องหรือช่องแคบ ๆ และยาว โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการโดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ (Reed et al., 1988)

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดของเสียจะถูกกำจัดด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับโดยอนุภาคของชั้นกรอง การสะสมในพืชและการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ พืชในระบบสามารถกำจัดมลสารต่าง ๆ ได้ด้วยการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ กลไกสำคัญที่ใช้ในการบำบัดของเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดของเสียอีกระบบหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้าง การควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มทัศนียภาพและเป็นสถานที่พักผ่อนได้อีกด้วย (Kadlec and Kngiht, 1996; Cooper et al., 1996; Iamchaturapatr et al., 2007)

ตารางที่ 2.8 กลไกการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

องค์ประกอบในน้ำเสีย	กลไกการบำบัด
ของแข็งแขวนลอย	- การตกตะกอน
	- การกรอง
บีโอดี	- การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์
	- การตกตะกอน
ไนโตรเจน	- ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน โดยจุลินทรีย์
	- พืชนำไปใช้
	- การระเหยของแอมโมเนีย
ฟอสฟอรัส	- ดูดซับ โดยดิน (ปฏิกริยาการดูดซับ-ตกตะกอน โดยอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแร่ธาตุต่าง ๆ ในดิน)
	- พืชนำไปใช้
เชื้อโรค	- การตกตะกอน
	- การกรอง
	- การตายตามธรรมชาติ
	- รังสี UV

หมายเหตุ : กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ (2544)

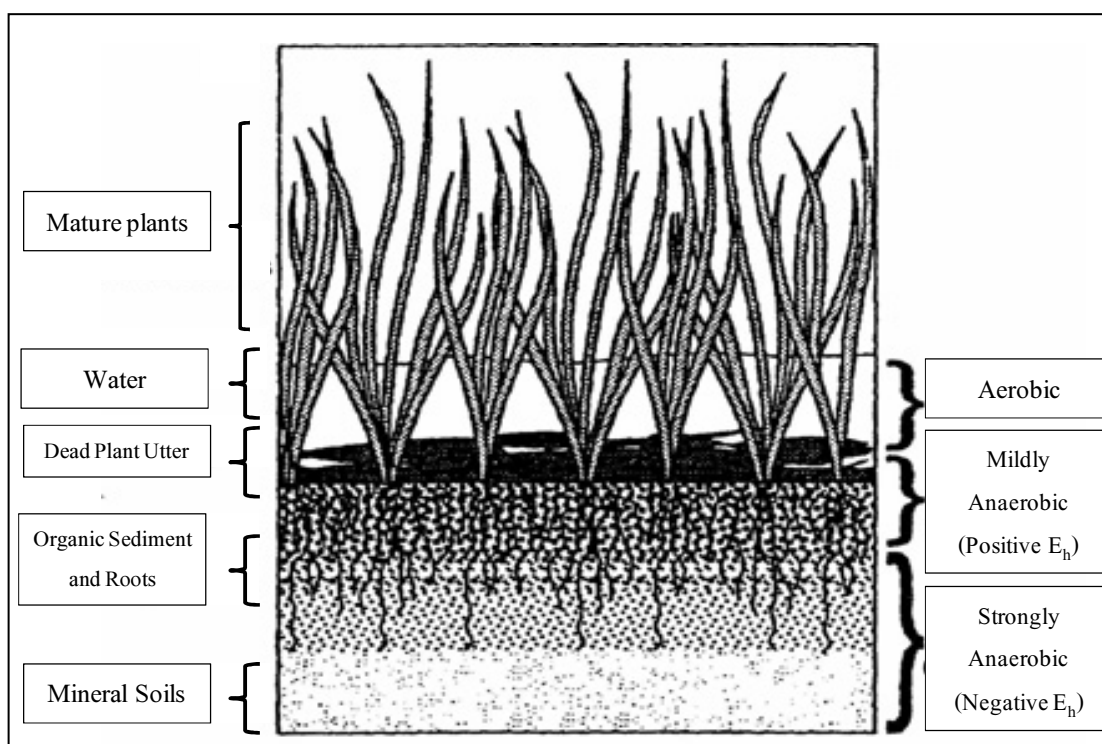
2.4.1 องค์ประกอบของบึงประดิษฐ์ (Wetland Component)

องค์ประกอบของระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สำหรับบำบัดน้ำเสียและสิ่งปฏิกูลมีดังต่อไปนี้

1) ตัวกลาง (substrata)

ตัวกลางที่เลือกนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ คือ กรวด หิน และทราย ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไปโดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใดหรือใช้รวมกันก็ได้ ช่องว่างในตัวกลางเหล่านี้จะใช้เป็นช่องทางการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นอกจากนี้จะเป็นที่ในการเกิดปฏิกริยาของสารประกอบต่าง ๆ ด้วย ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางก็มีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วยตัวอย่างเช่น ตัวกลางที่เป็นทรายหรือกรวดนิยมนำมาใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียเพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบและพืชสามารถยึดเกาะได้ง่ายเพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบและพืชสามารถยึดเกาะได้ง่าย

ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ แยกตามปริมาณของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งได้แก่



รูปที่ 2.3 ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Kedlec and Knight, 1996)

- บริเวณที่มีออกซิเจน (aerobic) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ บริเวณนี้ น้ำเสียสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้
- บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (mildly anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน (aerobic) ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตามระบบรากของพืชที่ยึดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ตัวกลางได้บางส่วน
- บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly Anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นสุดท้ายหรือล่างสุดของตัวกลางและในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้อากาศ

2) จุลินทรีย์ (microbial organisms)

จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืชและที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป (สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์, 2548) จุลินทรีย์ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีมากมายหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโปรโตซัว โดยทั่วไป จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหารและพลังงานสำหรับการดำรงชีพของจุลินทรีย์พืช ซึ่งแหล่งพลังงานหลักของจุลินทรีย์คือสารอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีการจัดสภาวะแวดล้อมให้มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการกำจัดของเสียที่ดี

3) พืช (Plants)

หน้าที่หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คือการลำเลียงออกซิเจน โดยผ่านทางระบบรากพืช ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเจริญเติบโตอยู่ในชั้นดินหรือแทรกตัวเข้าไปในตุ่มกลางที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวประมาณ 50-150 cm โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบและลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ปกติแล้วพันธุ์ของพืชที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศ และพื้นที่ในบริเวณนั้นจึงสามารถเจริญเติบโตได้ดี (U.S.EPA, 2000) อย่างไรก็ตามลักษณะของน้ำเสียที่จะใช้บำบัดก็เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงด้วย เช่น พืชที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอาหารสูง ๆ เช่น สิ่งปฏิกูลหรือน้ำเสียจากการเกษตร คือ ธูปฤาษี กก อ้อ และหญ้าคมบาง เป็นต้น นอกจากนี้การใช้สารอาหารของพืชมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนฟอสฟอรัส และมลสารอื่น ๆ ในน้ำเสียด้วย อัตราการใช้สารอาหารของพืชถูกจำกัดโดยอัตราการเจริญเติบโตสุทธิและความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อในพืชที่มีอายุน้อยความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อมีค่าสูง (มากกว่า 25 กรัมต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อ) และลดลงเมื่อโตเต็มที่ (กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ, 2544) ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อและอัตราการนำไปใช้ของพืชแต่ละชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช

พืช	อัตราการนำไปใช้ (กิโลกรัม/ตารางเมตร/ปี)		ส่วนประกอบในเนื้อเยื่อพืช (กรัม/กิโลกรัม)		อัตราการเติบโต (ต้นต่อตารางเมตร ต่อปี)
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
ธูปฤาษี	0.06-0.263	0.0075- 0.0403	5-24	0.5-4	0.0008-0.0061
หญ้า ทรงกระเทียม	0.0125	0.0018	8-27	1-3	-
อ้อ	0.0225	0.0035	18-21	2-3	0.01-0.06

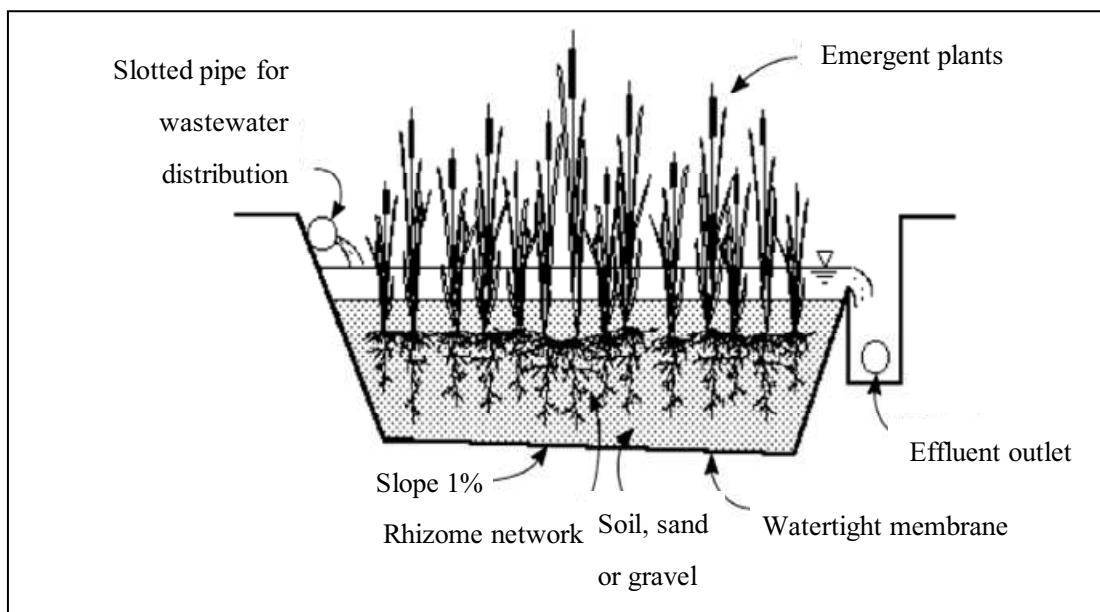
หมายเหตุ : Reddy and Dedusk (1987)

2.4.2 ชนิดและหน้าที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (*Free Water Surface Systems : FWS*)

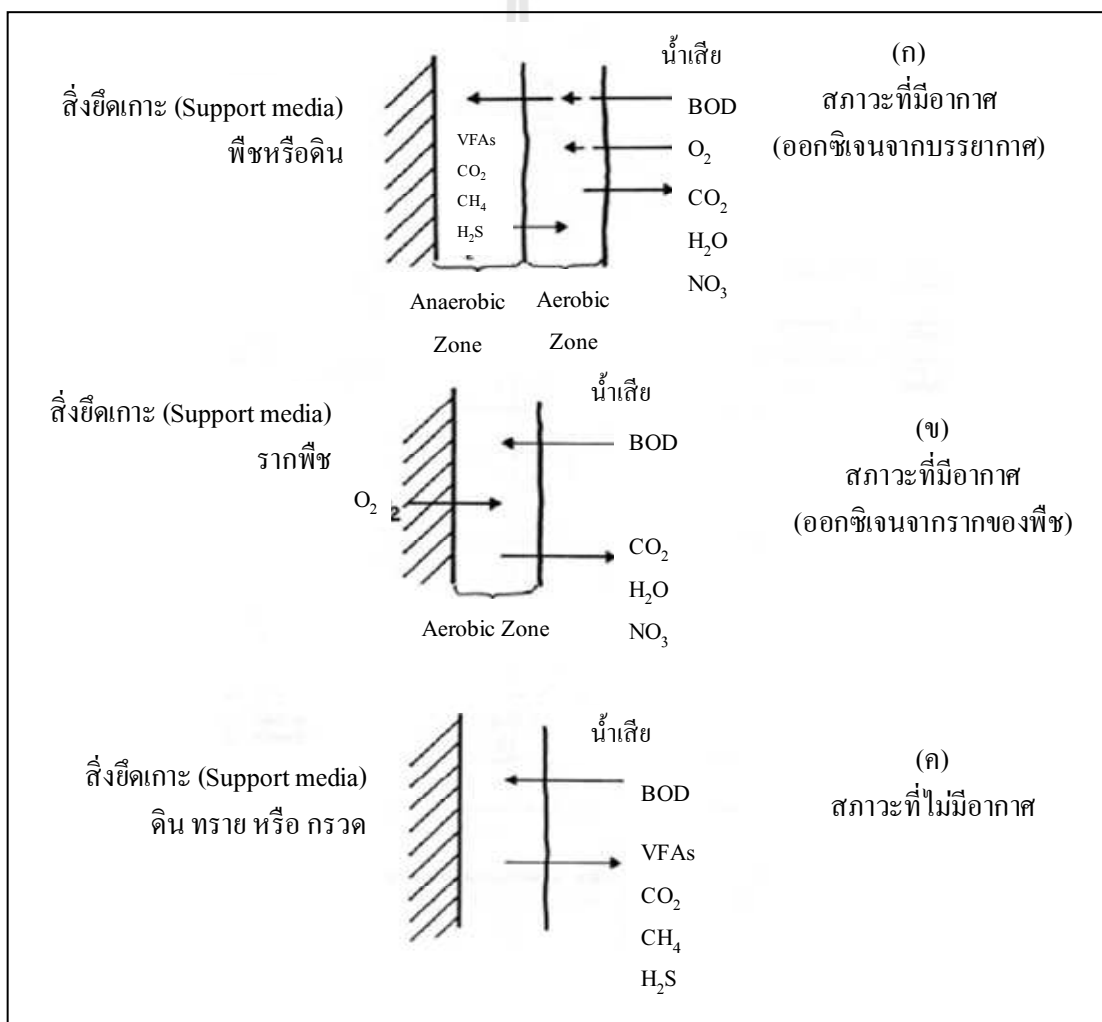
ระบบนี้จะประกอบด้วยแอ่งหรือร่อง ทำจากดินเหนียวหรือจากวัสดุทางด้านธรณีวิทยาอื่น ๆ ทั้งที่สร้างขึ้นหรือมีอยู่ตามธรรมชาติบนพื้นบ่อเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ และประกอบไปด้วยดินและวัสดุตัวกรองต่าง ๆ ที่จะช่วยให้รากพืชสามารถยึดเกาะอยู่ได้ โดยน้ำที่ความลึกระดับหนึ่งจะไหลอยู่เหนือผิวดินหรือตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าการกระจายน้ำเข้าสู่ระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีพื้นที่แคบ ยาว และมีระดับความลึกของน้ำในบ่อไม่มากนัก ประกอบกับน้ำมีการไหลอย่างช้า ๆ ผ่านกึ่งก้านของพืชที่แผ่กระจายอยู่ทั่วไปในระบบ จะทำให้เกิดการไหลของน้ำแบบไหลตามกัน (Plug-Flow) ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาการไหลล้นของระบบลดลงได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าภาระบีโอดีอยู่ในช่วง 45-60 kg/ha-d (U.S.EPA, 2000)



รูปที่ 2.4 พื้นที่น้ำชุ่มประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Polprasert, 2004)

การกำจัดสารอินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบและแหล่งออกซิเจนที่จะใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดของเสียโดยจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนหนึ่งได้มาจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำและปริมาณออกซิเจนที่จะถูกถ่ายเทผ่านไปยังส่วนรากของพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยรูปที่ 2.5 ก. เป็นบริเวณใกล้ผิวน้ำซึ่งระบบมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับบรรยากาศ จะเกิดขึ้นที่ส่วนของลำต้นพืชหรือชั้นตัวกลางซึ่งเป็นบริเวณที่มีการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบริเวณรอบ ๆ ต้นพืชก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ต้นพืชและเกิดกระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนรูปที่ 2.5 ข. แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณรากพืช ซึ่งเป็นบริเวณที่จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนทำการบำบัดน้ำเสียซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่มาจากการแพร่กระจายจากบรรยากาศผ่านในต้นพืชและแพร่ออกทางรากของพืช และรูปที่ 2.5 ค. แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณตัวกลางที่อยู่ลึกลงไปจากรากพืช เป็นบริเวณที่จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนทำการบำบัดน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

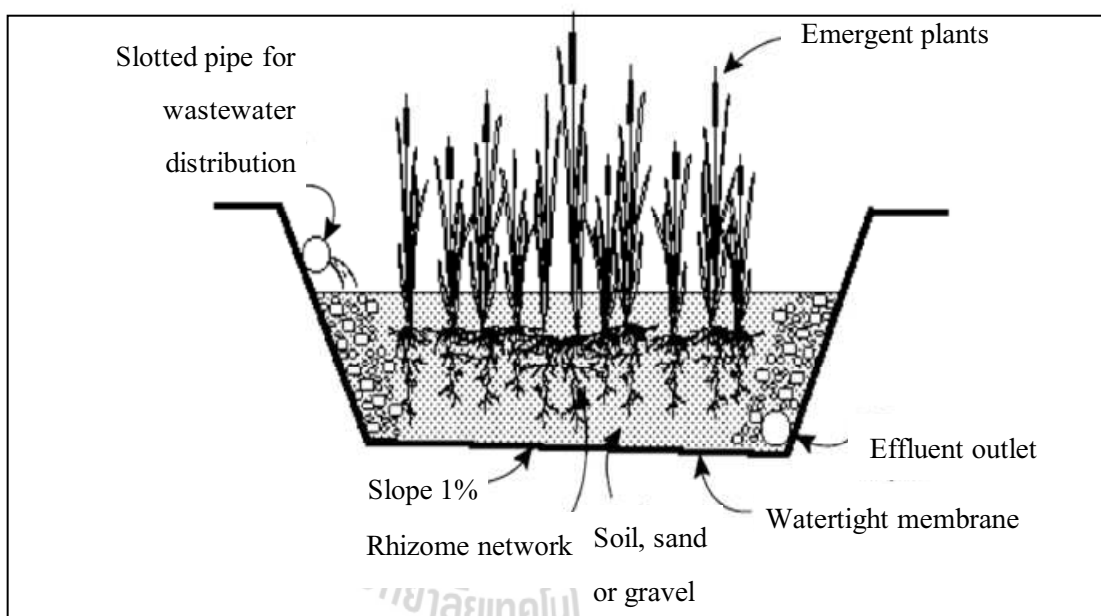
2) **พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow Systems : SF)**
 ระบบนี้ประกอบด้วยร่องยาวหรือพื้นดิน มีตัวกลางเพื่อช่วยให้พืชสามารถยึดเกาะและพืชเจริญเติบโตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ตัวกลางที่ใช้อาจเป็นหินหรือหินบด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 cm) กรวดและดินชนิดต่าง ๆ อย่างไม่อย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน (Reed et al., 1988) น้ำเสียที่ไหลผ่านด้านข้างหรือไหลในแนวตั้งของตัวกลางจะทำให้น้ำเสียถูกบำบัดในระหว่างสัมผัสกับผิวหน้าของตัวกลางและส่วนรากของพืช บริเวณใต้ชั้นกลางจะอึดด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น แต่พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนรากซึ่งทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ สามารถเจริญเติบโตในส่วนรากและไรโซมของพืชได้



รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.4.3 การเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดินมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ จะมีข้อดีในการบำบัดสารมลพิษในน้ำได้แตกต่างกัน เนื่องจากกระบวนการภายในบ่อมีทั้งบริเวณที่มีการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน แต่ทั้ง 2 ระบบจะมีข้อดีคือ ใช้พลังงานน้อย ค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำเหมาะกับน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบมาทำการศึกษาว่าระบบใดเหมาะกับน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาอุกผสม



รูปที่ 2.6 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว (Polprasert, 2004)

2.5 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้พื้นผิวจะมีปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้ (U.S.EPA, 2000)

2.5.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time : HRT)

มีหน่วยเป็น วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ใช้จะกำหนดโดยตั้งสมมุติฐานว่ามีการกวนผสมหรือเป็นปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) การหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงทำได้ยากเพราะการไหลในระบบจะซับซ้อน เนื่องจากมีพืชเจริญเติบโตอยู่ และพืชจะไปแทนที่ปริมาตรน้ำจำนวนหนึ่งด้วย

(ศุวสา กานตวนิชกูร, 2538) ระยะเวลาเก็บกักน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาหรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ (กฤตธิ์ วงศ์สถิตย์, 2544)

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	ข้อดี	ข้อเสีย
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว(FWS)	1. มีค่าก่อสร้างระบบน้อยกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไหลใต้ผิวดิน	1. เป็นระบบที่ต้องใช้พื้นที่มากและมีเวลาเก็บกักที่นาน เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสสูง
	2. เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย	2. มีข้อจำกัดในการกำจัดฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (fecal coliform) ซึ่งส่งผลทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมักมีปริมาณฟีคัล โคลิฟอร์มเกินกว่าค่ามาตรฐาน
	3. ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย	3. เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงและยุง
	4. ระบบไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป	
	5. เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่าง ๆ ได้	
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (SF)	1. เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย	1. มีค่าก่อสร้างที่สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวเพราะต้องคำนึงถึงชั้นกรองและระบบท่อที่จะใช้ภายในระบบ
	2. สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากและมีการใช้พื้นที่น้อยกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	2. กระบวนการไนตริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนจะเกิดขึ้นได้ยาก ถ้าบางพื้นที่ในระบบมีสภาพไร้ออกซิเจน ถ้าน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มเวลาในการเก็บกักซึ่งจะส่งผลให้ความต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างระบบเพิ่มขึ้น
	3. ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย	
	4. ไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป	
	5. ไม่เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและแมลง	

หมายเหตุ : U.S.EPA (2000)

2.5.2 ความลึกน้ำ (Water Depth)

ความลึกของน้ำมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวเท่านั้น ระดับน้ำจะเป็นปัจจัยหลักในการเลือกและบำรุงรักษาพืชในระบบ เพราะพืชบางชนิดต้องการที่จะอยู่ในน้ำตื้น ไปจนถึงระดับที่ลึกขึ้นตามแต่ละชนิดของพืช (สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์, 2548)

2.5.3 อัตราภาระบรรทุกทุกชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)

มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/ (ตารางเมตร-วัน) เป็นปริมาตรของน้ำที่เติมต่อวันต่อพื้นที่ผิวของระบบ ปกติแล้วระบบพืชน้ำส่วนใหญ่จะดำเนินแบบไหลต่อเนื่อง (สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์, 2538)

2.5.4 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ (เฮกเตอร์-วัน) เช่น ค่าบีโอดี เป็น กิโลกรัม บีโอดี/ (เฮกเตอร์-วัน) เป็นมวลของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่อหน่วยพื้นที่ผิวของระบบต่อหน่วยวัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์, 2548)

2.5.5 ความลึกของตัวกลาง (Depth of media)

มีหน่วยเป็น เมตร มีความสัมพันธ์กับความยาวของรากพืช หากความความลึกของชั้นตัวกลางมีความเหมาะสมกับความยาวของรากพืชจะส่งผลให้พืชสามารถพัฒนาระบบรากได้ดี

2.5.6 ความพรุนของดิน (porosity)

มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบ หากตัวกลางที่เลือกใช้มีค่าความพรุนสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงด้วย และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยลง

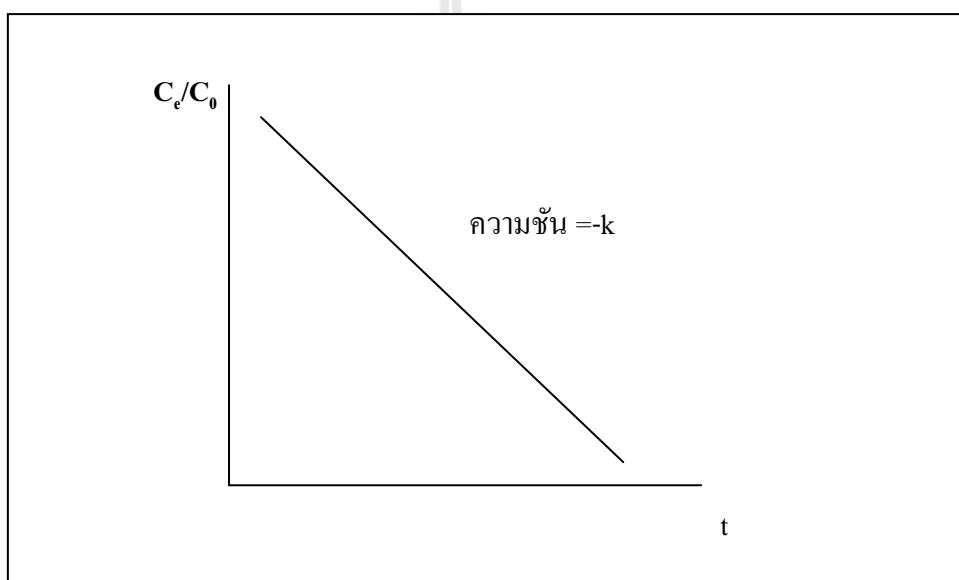
2.6 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์

ค่าคงที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order reaction) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 (U.S.EPA, 1993)

$$\frac{C_e}{C_i} = (K_T) t \quad (2.2)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำเข้าระบบ (mg/l)
 C_e = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำออกจากระบบ (mg/l)
 K_T = ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (d^{-1})
 t = ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (d)

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟของความเข้มข้นกับเวลาจะได้กราฟที่แสดงความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ความเข้มข้นของสารจะลดลงเรื่อย ๆ โดยกราฟจะเป็นเส้นตรง ที่มีความชัน $-k$ (k = ค่าคงที่ในการย่อยสลาย) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่

1) อุณหภูมิ

โดยที่อุณหภูมิจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์และพืชในระบบ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 (U.S.EPA, 2000)

$$K_T = K_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2.3)$$

โดย K_T = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิใด ๆ (d^{-1})
 K_{20} = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 20 (d^{-1})
 θ = ค่าคงที่ 1.06 (U.S.EPA, 2000)
 T = อุณหภูมิของน้ำเสียในระบบ ($^{\circ}C$)

2) ชนิดของสารอินทรีย์

หากสารอินทรีย์มีโครงสร้างทางเคมีที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย จะมีผลทำให้ค่าอัตราการย่อยสลายสูงขึ้น ซึ่งลักษณะสมบัติน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุก จะประกอบไปด้วย สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่าย

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำเอาค่าอุณหภูมิจากน้ำเสียที่ได้จากระบบมาใช้ในการคำนวณ เพื่อที่จะหาค่าของอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สำหรับน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุก ลูกผสมที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ปลาดุกลูกผสม

เดชา นาวานุเคราะห์ และ ชลิต อินทรรัตน์ (2543) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกอุยเพศที่เลี้ยงในบ่อคอนกรีตกลม โดยทำการเลี้ยงที่อัตราการปล่อย 3 ระดับ คือ 30 50 และ 70 ตัวต่อตารางเมตร เป็นเวลา 10 สัปดาห์ พบว่าที่อัตราการปล่อย 70 ตัวต่อตารางเมตร มีการเจริญเติบโตได้ดี ที่อัตราการปล่อย 50 และ 70 ตัวต่อตารางเมตร มีอัตราการเปลี่ยนเป็นเนื้อต่ำกว่า อัตราการปล่อย 30 ตัวต่อตารางเมตร โดยมีอัตราการรอดตายของปลาดุกอุยเพศในสัปดาห์สุดท้ายมีค่าเท่ากับร้อยละ 50.05 40.23 และ 41.84 ที่อัตราการปล่อย 30 50 และ 70 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ

วิกรม เจตนาวิชัย และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาค่าทางโลหิตวิทยา เคมีคลินิก และพยาธิวิทยาของปลาดุกบักอุยที่แสดงอาการดีซ่าน พบว่าสาเหตุที่ปลาดุกบักอุยแสดงอาการดีซ่านเป็นผลมาจากเม็ดเลือดแดงถูกทำลายทำให้เกิดสภาวะโลหิตจาง ซึ่งรวมถึงสาเหตุของอาการขาดธาตุอาหารและแร่ธาตุ รวมถึงคุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสม โดยตรวจพบค่าไนโตรเจนในน้ำสูงซึ่งส่งผลให้เนื้อเยื่อในร่างกายของปลาเกิดสภาวะขาดออกซิเจนทำให้ปลาอ่อนแอ

วีณา เศษพุดชา และคณะ (2550) ได้มีการศึกษาผลของออกซิเจนละลายในน้ำต่อค่าทางโลหิตวิทยาของปลาดุก โดยทำการเลี้ยงปลาดุกในน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำ 3 ระดับ คือ (1) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 5-6 ppm (ระดับปกติ) (2) ออกซิเจนละลายน้ำต่ำระยะสั้น (3 ชั่วโมง) และ (3) ออกซิเจนละลายน้ำต่ำระยะยาว (90 วัน) พบว่าออกซิเจนละลายน้ำระดับปกติและออกซิเจน

ละลายน้ำต่ำระยะสั้นมีผลมีค่าทางโลหิตวิทยาทำให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในสถานะที่มีออกซิเจนละลายน้ำต่ำในระยะยาว พบว่าค่า cortisol มีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากปลาได้รับความเครียดจากปริมาณออกซิเจนในน้ำต่ำ

บัญญัติ ศิริชนาวงศ์ และคณะ (2551) ได้ศึกษาผลของความหนาแน่นและความถี่ในการให้อาหารต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการรอดตายและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกทะเลมาเลี้ยงในกระชังขนาด 1.5 m³ ด้วยความหนาแน่น 3 ระดับ คือ 20 25 และ 100 ตัวต่อตารางเมตร ให้อาหารแตกต่างกัน 3 แบบ คือ 1 2 และ 3 ครั้งต่อวัน พบว่าการเลี้ยงปลาดุกที่ความหนาแน่น 25 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลน้ำหนัก อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อดีที่สุด และอัตราการรอดตายในทุกความถี่การให้อาหารไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Senanan et al. (2004) พบว่ามากกว่าร้อยละ 80 ของปลาดุก เกษตรกรนิยมเลี้ยงปลาดุกผสมเนื่องจากมีการเจริญเติบโตเร็วและมีความทนทานสูง Tucker and D'Abramo (2008) รายงานว่าน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาดุกมีค่า pH อยู่ระหว่าง 7.5-8.5 และ Stickney and Andrews (1972) พบว่าปลาดุกอยู่ในช่วง 26 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงคืออุณหภูมิ -30°C

Nieuwgiessen et al. (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของอายุและความหนาแน่นของการเลี้ยงปลาดุกอเมริกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือ เฟส 2a ความหนาแน่น 67-1067 ตัวต่อตารางเมตร พบว่ามีน้ำหนัก 102.1±3.49 กรัม และเฟส 2b ความหนาแน่น 67-333 ตัวต่อตารางเมตร มีน้ำหนัก 1044.6±31.6 กรัม โดยทำการเปรียบเทียบค่าทางกายภาพ ค่าทางสรีรวิทยาและค่าทางพฤติกรรม พบว่าในเฟส 2a เมื่อเพิ่มความหนาแน่นอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและความตื่นตัวเพิ่มขึ้น จะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ 1.85-2.28 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนในเฟส 2b ความหนาแน่นไม่มีผลกระทบต่อปลา ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ 1.17-1.27 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน

2.7.2 การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้โดยผ่านการบำบัดด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Swartz and Boyd (1995) ได้ศึกษาโดยนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมาใช้ในการหมุนเวียนน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุก โดยแบ่งระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ออกเป็น 2 เซลล์ คือ เซลล์แรกปลูกพืช 2 ชนิด ได้แก่ กกสามเหลี่ยมและหญ้าส่วนอีกเซลล์ปลูกหญ้ากินนีเพียงชนิดเดียว ซึ่งจะศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 2 3 และ 4 วัน โดยมีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 77-91 ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน ผลการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวสามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในบ่อเลี้ยงปลาดุกโดยมี ประสิทธิภาพของระบบสามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ร้อยละ 59-84 ไนโตรหรือยละ 51-75 BOD ร้อยละ 37-67 และของแข็งแขวนลอยร้อยละ 75-87 ที่ระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน เป็นช่วงที่ระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด

Lin et al. (2002) ได้ศึกษาการบำบัดสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลา โดยนำเอาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวต่ออนุกรมกับแบบไหลใต้พื้นผิว โดยมีระยะเวลาในการเดินระบบ 8 เดือน และอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.8-13.5 cm/d ผลการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในโตรเจนได้มากกว่าแบบไหลใต้พื้นผิวแต่แบบไหลใต้พื้นผิวมีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ร้อยละ 86-98 และฟอสฟอรัสร้อยละ 32-71 ความเข้มข้นของแอมโมเนียของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้วมีค่าสามารถหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ในการเลี้ยงปลาได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อปลา

Lin et al. (2003) ศึกษาการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้พื้นผิวซึ่งต่ออนุกรมกัน เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงกุ้ง เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบชุดควบคุมและระบบชุดทดลอง ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.3 m/d มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 71 ในไตรที่ร้อยละ 90 ในเตรที่ร้อยละ 68 ในชุดทดลองหลังจากผ่านการบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้วมีค่าของแข็งแขวนลอย ความขุ่น ไนเตรที่มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม เนื่องจากในชุดควบคุมไม่มีระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย สำหรับค่าอัตราการรอดตายและน้ำหนักของกุ้งในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 71 2.3 ± 1.5 กรัมต่อตัว และร้อยละ 90 3.8 ± 1.8 กรัมต่อตัว ตามลำดับ

Gu et al. (2007) ได้ทำการศึกษาเอาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวมาบำบัดน้ำเสียที่ออกมาจากบ่อเลี้ยงปลาคาร์พ ปลาตะเพียน และปลาดุก โดยศึกษาคุณภาพน้ำ การเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ (1) ระบบชุดควบคุมซึ่งไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ และ (2) ระบบชุดทดลองซึ่งมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ โดยประสิทธิภาพในการบำบัด BOD_5 ร้อยละ 70.5 ของแข็งแขวนลอยร้อยละ 81.9 ไนโตรที่ร้อยละ 80.1 และฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 80.1 และมีอัตราการรอดตายของปลาในระบบชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าร้อยละ 71.9-90.6 และร้อยละ 97.2-98.8 ตามลำดับ

Zachritz et al. (2008) ศึกษาการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินเพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลานิล โดยศึกษาการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยและไนโตรเจน ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 3.03 m/d จากผลการศึกษาพบว่าระบบประสิทธิภาพของระบบสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรที่และไนเตรที่ร้อยละ 69.2 46.87 และ 40.6 ตามลำดับ ความลึกของชั้นตัวกลางและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสภาวะใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดไนโตรเจน

2.7.3 อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Lee et al. (2004) ได้ทำการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยทำการศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ แบ่งออกเป็น 3 เฟส คือ เฟส 1 (มีระยะเวลาเก็บกัก 8.5 วันและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 6 cm/d) เฟส 2 (ระยะเวลาเก็บกัก 4.3 วันและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 12 cm/d) เฟส 3 (ระยะเวลาเก็บกัก 14.5 วันและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 3.5 cm/d) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าในเฟสที่ 3 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 99 BOD₅ ร้อยละ 92 ไนเตรทร้อยละ 65 และฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 59 ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเฟส 1 และเฟส 2 ซึ่งมีค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงกว่าและระยะเวลาการบำบัดเก็บกักน้อยกว่า ดังนั้นอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์จะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและระยะเวลาเก็บกัก

Lin et al. (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงกุ้งภายใต้อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดินต่อแบบไหลใต้ผิวดิน บำบัดน้ำที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.57-1.97 m/d จากผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพของระบบสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 55-56 BOD₅ ร้อยละ 37-54 และแอมโมเนียทั้งหมดร้อยละ 64-66 และพบว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้มีอัตราการย่อยสลายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

Chazarence et al. (2007) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่อการบำบัดตะกอนจากน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยทำการศึกษาค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 3 ค่า คือ 30 60 และ 90 l/m²-d ประกอบด้วยบ่อที่ปลูกต้นอ้อ บ่อที่ปลูกหญ้าและบ่อที่ไม่มีปลูกพืชเป็นระบบควบคุม จากผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 90 l/m²-d มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD TKN และ NH₄ สูงกว่า 30 และ 60 l/m²-d โดยประสิทธิภาพของบ่อที่ปลูกต้นอ้อจะสูงกว่าบ่อที่ปลูกหญ้าและไม่มีพืชในระบบและจะประสิทธิภาพบำบัดได้ดีในฤดูร้อน เมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของตัวกลาง

Osorio et al. (2007) ได้ทำการศึกษาอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์สูงที่ 23 g COD/m²-day ซึ่งทำการเปรียบเทียบสารอินทรีย์ละลายน้ำ (กลูโคส) และอนุภาคของสารอินทรีย์ (แป้ง) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน 2 ชุด ใช้กรวดเป็นตัวกลางและปลูกต้นอ้อไว้บนตัวกลาง จากผลการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ชุดมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้มากกว่าร้อยละ 90 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของระบบที่ป้อนกลูโคสเข้าไปจะสูงถึงร้อยละ 57 ซึ่งสูงกว่าระบบที่ป้อนน้ำแป้งเข้าไป โดยประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียมีเพียงร้อยละ 43 เนื่องจากกระบวนการทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ใช้กลูโคสในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าน้ำแป้ง

Ayaz (2008) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสารอินทรีย์ โดยทำการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 3 แบบ คือ (1) แบบใช้กรวดเป็นตัวกลางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นแบบไหลใต้พื้นผิวในแนวนอน ปลูกกก (H-SSF) (2) ไม่มีตัวกลางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นแบบไหลใต้พื้นผิวและปลูกกก และ (3) พื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) 4 บ่อ ต่อเนื่องกัน ใช้แทนในการบำบัด ระยะเวลาในการเดินระบบ 3 ปี อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 4.8-15.6 m³/d จากผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ H-SSF มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย BOD₅ และ COD ร้อยละ 80 65 และ 50 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงขึ้น จะมีผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

Sindilariu et al. (2008) ศึกษาผลของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่อประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราต์ใช้ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง 6 เดือน อัตราการรับน้ำที่ใช้ในการศึกษา คือ 3.9 1.8 และ 0.9 l/s จากผลการศึกษาพบว่า การบำบัดแอมโมเนียมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 61.2-87.8 ประสิทธิภาพของการบำบัดสารอาหารและแอมโมเนียเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ลดลง

2.7.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้พื้นผิว

Summerfelt et al. (1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวในแนวตั้งและแบบไหลแนวนอน ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราต์ พืชที่ใช้ในระบบคือหญ้าแฝก จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดแบบไหลในแนวนอนและแนวตั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 98 และ 96 COD ทั้งหมดร้อยละ 91 และ 72 ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 90 และ 82 แอมโมเนียทั้งหมดร้อยละ 89 และ 86 ตามลำดับ

Karathansis et al. (2003) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวต่อการบำบัดแบคทีเรีย BOD และของแข็งแขวนลอยในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือน โดยแบ่งออกเป็นระบบที่ปลูกพืช คือ บ่อที่ปลูกต้นธูปฤๅษีและบ่อที่ปลูกต้นหญ้าเฟสตูก้า และระบบที่ไม่ปลูกพืช จากการศึกษาพบว่าทั้ง 2 ระบบมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดแบคทีเรียมากกว่าร้อยละ 93 โดยที่ระบบที่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีในฤดูร้อน ส่วนระบบที่ไม่มีการปลูกพืชจะบำบัดได้ดีในฤดูหนาว ระบบที่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD และของแข็งแขวนลอยได้ดีร้อยละ 75 และ 88 ตามลำดับ ส่วนระบบที่ไม่มีการปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 63 และ 46 ตามลำดับ

Schulz and Rennert (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเทราต์โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 ค่า คือ 3.5 5.5 และ 11 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 67-72 COD ร้อยละ 30-31 ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 41-53 และไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 19-30 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและแอมโมเนียมีค่าต่ำที่ระยะเวลาเก็บกัก 5.5 ชั่วโมง และ 11 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ 3 ชั่วโมง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาได้

Li et al. (2008) ได้ศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 3 แบบ คือ (1) แบบไหลใต้ผิวน้ำ (VSF) (2) แบบไหลใต้พื้นผิวน้ำ (HSF) และ (3) แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) โดยทำการศึกษาทดลองความสามารถในการฟอกตัวของน้ำในทะเลสาบไท่ห้ว ประเทศจีน ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 m/d ในแต่ละระบบ ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ร้อยละ 17-40 แอมโมเนียร้อยละ 23-46 ไนเตรทร้อยละ 34-65 ไนโตรเจนร้อยละ 20-56 และฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 35-66 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวน้ำแบบไหลแนวตั้งและแบบไหลแนวนอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียสูงแต่แบบไหลผ่านพื้นผิวมีผลกระทบน้อยกว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ออกจากระบบบำบัดแบบไหลใต้ในแนวตั้งและแนวนอนมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำระดับ 3 ของจีน

Kadlec (2009) ได้ทำการเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้พื้นผิว และพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนทั้งหมดค่อนข้างดี แต่ในฤดูหนาวประสิทธิภาพของระบบจะลดลงและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและแมลงต่าง ๆ ส่วนระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ไนเตรทและเชื้อโรคได้ค่อนข้างดี สามารถรับอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว แต่จะมีปัญหาเรื่องการอุดตันของตัวกลาง

Moortel et al. (2009) ทำการศึกษาเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดินในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 36.6 ± 3.3 ฟอสฟอรัสร้อยละ 36.0 ± 5 และ COD ร้อยละ 60.8 ± 7.1 ในขณะที่แบบไหลใต้พื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าโดยไนโตรเจนทั้งหมด 96.7 ± 1.9 ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 71.7 ± 7.7 และ COD ร้อยละ 88.1 ± 3.5 การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของระบบบำบัดแบบไหลผ่านพื้นผิวมีประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย เนื่องจากข้อจำกัดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน สำหรับตัวกลางในระบบบำบัดแบบไหลใต้พื้นผิวจะใช้กรวดเป็นตัวกลางทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิวที่ใช้ดินเป็นตัวกลาง เพราะกรวดมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่าดิน

2.7.5 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์

Lin et al. (2002) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ต่อกับแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.8-13.5 cm/d พบว่าค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปไนโตรเจนได้ดี ส่วนระบบ SF จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปฟอสฟอรัสได้ดี

Stein et al. (2006) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพืชที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF คือ ต้นกระเจ็ด ต้นกกสามเหลี่ยมและต้นธูปฤๅษีเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ปลูกพืช ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ โดยหมุนเวียนน้ำทุก 3 วัน เพื่อประเมินค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ พบว่าระบบที่ปลูกต้นกระเจ็ดมีค่าค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุด (0.925 d^{-1}) รองลงมาคือต้นกกสามเหลี่ยม (0.743 d^{-1}) ต้นธูปฤๅษี (0.612 d^{-1}) และระบบที่ไม่ปลูกพืช (0.366 d^{-1}) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงกว่าระบบที่ไม่มีการปลูกพืช

Zachritz et al. (2008) ได้ทำการศึกษาประเมินประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาชนิดที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 3.03 m/d อัตราการไหล 74.9-175.6 m^3/d และใช้ตัวกลางขนาด 380 mm ลึก 0.90 m พบว่าค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของ TSS TAN NO_2^- และ NO_3^- มีค่าเท่ากับ 9.861 0.614 20.03 และ 8.292 d^{-1} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ โดยค่าคงที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความลึกของชั้นตัวกลาง ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์

Trang et al. (2010) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF โดยใช้หญ้าแฉ่มในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 31-146 mm/d พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS BOD และ COD เท่ากับร้อยละ 86-95 65-83 และ 57-84 ตามลำดับ และการประเมินค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์พบว่าเมื่ออัตราการย่อยสลาย BOD อยู่ในช่วง 25-95 m/yr และ COD อยู่ในช่วง 22-30 m/yr จากผลการศึกษาจะเห็นว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD และ COD จะเพิ่มขึ้นด้วย

2.8 สรุป

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	อ้างอิง	สรุปผลงานวิจัย
1. ปลาตุ๊กตุ๊กผสม	<p>รักพงษ์ เพชรคำ และ ไชยณรงค์ นาวานุเคราะห์. (2540); เดชา นาวานุเคราะห์ และ ชลิต อินทร์ดี. (2543); วิมา เคนยพุดชา และคณะ (2550); บัญญัติ ศิริธรรมาวงศ์ และคณะ (2551); Stickney and Andrews (1972); Brown (1977) Tucker and Robinson (1990); Stickney (1993); Barton (1997); Ellis (1982); Wendelaar (1997); Senanen et al. (2004); Nieuwgiessen et al. (2009)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ปลาตุ๊กที่นิยมเลี้ยงมากกว่าร้อยละ 80 เป็นปลาตุ๊กลูกผสม - คุณภาพน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงปลาตุ๊กอยู่ในช่วง pH 7.5-8.5 และมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27-29°C - ค่า DO ที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 3-5 มิลลิกรัมต่อลิตร - อัตราการปล่อยปลาตุ๊กลูกผสมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 60-90 ตัวต่อตารางเมตร - การเลี้ยงที่มีความหนาแน่นสูง การอดอาหาร การจับและการขนส่งที่ไม่ดี คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสม การติดเชื้อ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ทำให้ปลาเกิดความเครียดมีผลต่อค่าทางโลหิตวิทยา - ความยาวเฉลี่ยของปลาตุ๊กในแหล่งน้ำธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 14.64±2.1 cm และน้ำหนักมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.99 กรัม - ความหนาแน่นและความถี่การให้อาหารแก่ปลาตุ๊กมีผลต่อน้ำหนัก อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและอัตราการรอดตาย - อายุและความหนาแน่นของปลาในบ่อมีผลต่อพฤติกรรมและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

ตารางที่ 2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	อ้างอิง	สรุปผลงานวิจัย
<p>2. การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้โดยผ่านการบำบัดด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์</p>	<p>Swartz and Boyd (1995); Lin et al. (2002; 2003); Gu et al. (2007); Zachritz et al. (2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - มีการนำน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น ปลานิล ปลาเทราต์ ปลาตะเพียน ปลาคาร์ฟ ปลาอุก และกุ้ง ผ่านระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดินสามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงอีกครั้งได้ - ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอาหารพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัส - ปลานิล ปลาเทราต์ ปลาอุก และกุ้ง มีอัตราการรอดตายสูง เมื่อมีคุณภาพน้ำดีหลังจากการบำบัดโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
<p>3. อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์</p>	<p>Lee et al. (2004); Chazarence et al. (2007) Ayaz (2008); Rousseau et al. (2008); Sindilariu et al. (2008); Lin et al. (2009);</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกของชั้นตัวกลางและอัตราการรับน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดไนโตรเจน - อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น การบำบัดสารอินทรีย์ ของแฉังแฉวนลอยและค่าแอมโมเนีย เป็นต้น - เมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและอัตราการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นด้วย - อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่สูงเกินไป มีผลต่อการอุดตันของชั้นตัวกลาง
<p>4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน</p>	<p>Schulz and Rennert (2003); Li et al. (2008); Kadlec (2009); Moortel et al. (2009)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่อุณหภูมิค่า แต่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะมีปัญหาในเรื่องการอุดตันของชั้นตัวกลาง - พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส สูงกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว เนื่องจากแบบไหลผ่านพื้นผิวจะมีการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นน้อยและปัจจัยของตัวกลาง

ตารางที่ 2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	อ้างอิง	สรุปผลงานวิจัย
5. ค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย	Stein et al. (2006); Trang et al. (2010); Lin et al. (2002); Zachritz et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีผลต่อค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ - เมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD และ COD จะเพิ่มขึ้นด้วย - ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปแบบไนโตรเจนได้ดี ส่วนระบบ SF จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปแบบฟอสฟอรัสได้ดี - ค่าคงที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความลึกของชั้นตัวกลาง ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำจากการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดิน ภายใต้สภาวะรับน้ำทางชลศาสตร์สูง โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษวิจัย

ทำการวัดพารามิเตอร์ทั้งหมด ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 (F5) และชุดการทดลองติดตั้งอยู่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 14 เดือน ตั้งแต่เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2553

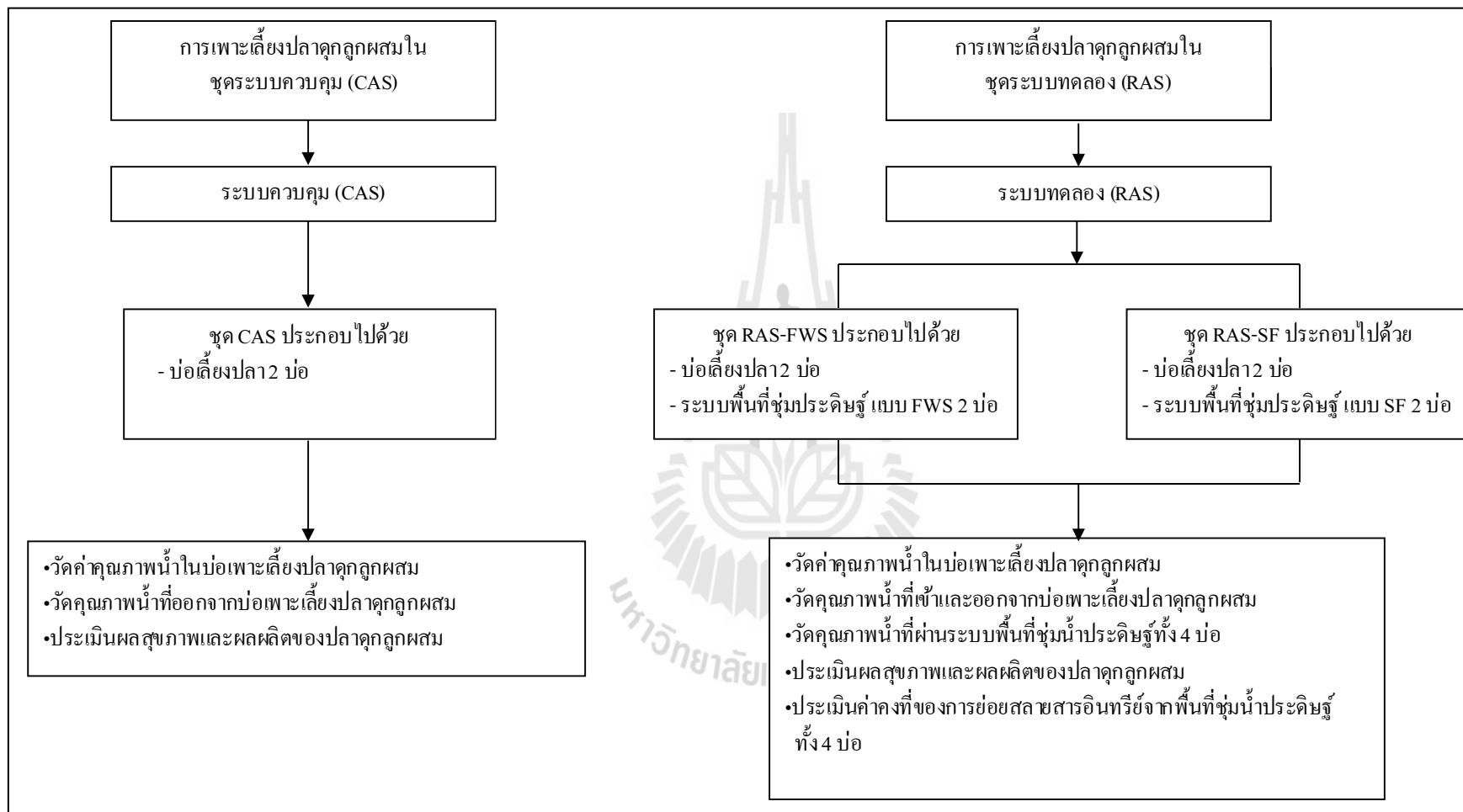
3.3 ขั้นตอนการศึกษวิจัย

ขั้นตอนการศึกษวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

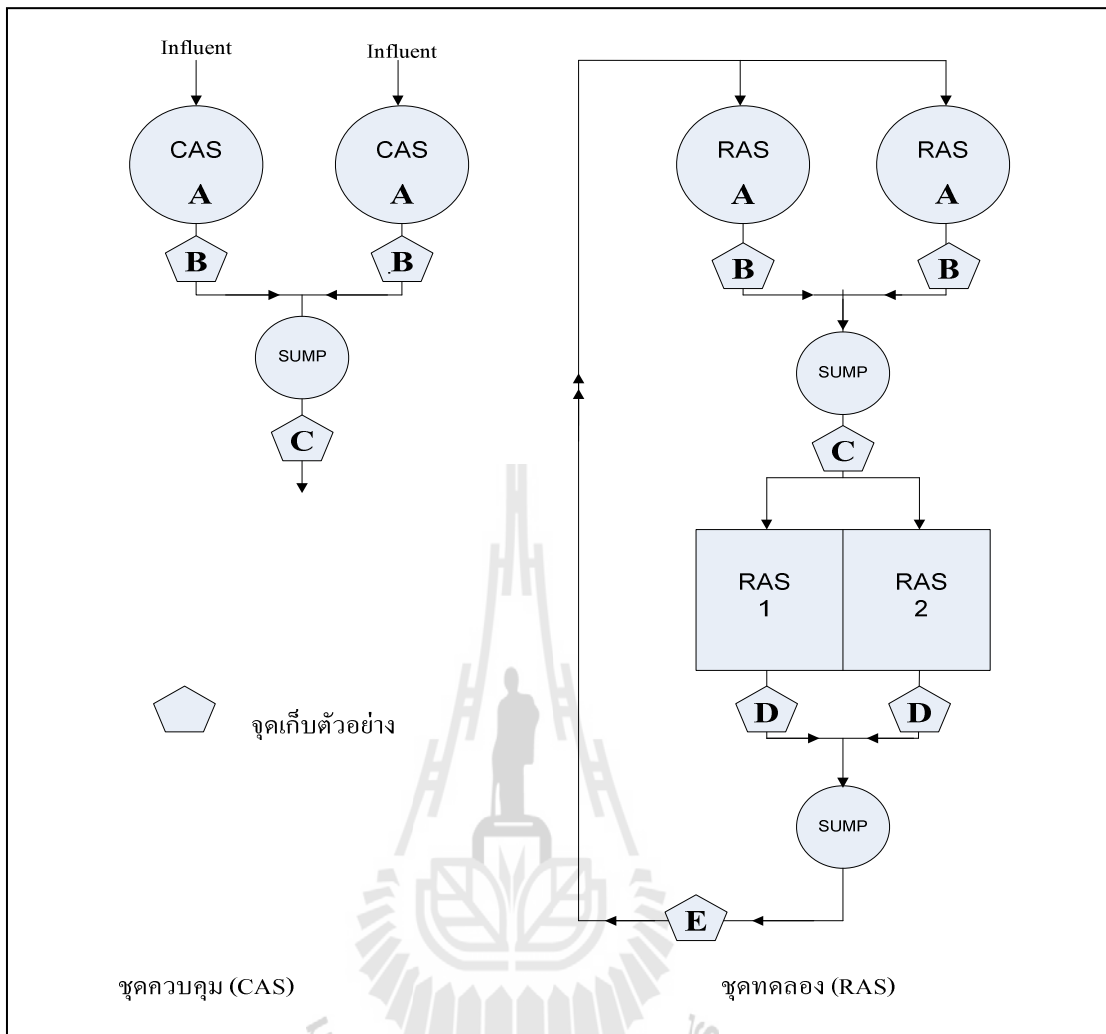
3.3.1 แผนผังการทดลอง

รายละเอียดแผนผังการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ประกอบไปด้วย

3.3.1.1 ระบบ CAS (Control Aquaculture System) เป็นชุดควบคุมประกอบไปด้วยบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมจำนวน 2 บ่อ เป็นบ่อซีเมนต์ โดยแต่ละบ่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ความลึก 1 เมตร โดยกำหนดความลึกของน้ำเท่ากับ 0.5 เมตร กำหนดให้บ่อ CAS เป็นบ่อควบคุม ได้แก่ ชุดควบคุม CAS 1 และชุดควบคุม CAS 2 เพื่อใช้เลี้ยงปลาดุกลูกผสมแบบถ่ายเทน้ำจากภายนอก



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองติดตั้งอยู่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ
ในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.1.2 ระบบ RAS (Recirculating Aquaculture System) เป็นชุดทดลอง 2 ชุดประกอบไปด้วย

1) ชุดทดลอง แบบ FWS ประกอบไปด้วยบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมจำนวน 2 บ่อและบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS จำนวน 2 บ่อ ได้แก่ RAS-FWS 1 และ RAS-FWS 2 ตามลำดับ โดยบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมมีขนาดเท่ากับบ่อเพาะเลี้ยงปลาในชุดควบคุม รายละเอียดบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS แสดงในหัวข้อ 3.3.3 เพื่อเป็นชุดทดลองสำหรับเลี้ยงปลาดุกลูกผสมแบบหมุนเวียนน้ำจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS

2) ชุดทดลอง แบบ SF ประกอบไปด้วยบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมจำนวน 2 บ่อและบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF จำนวน 2 บ่อ ได้แก่ RAS-SF 1 และ RAS-SF 2 โดยบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมมีขนาดเท่ากับบ่อเพาะเลี้ยงปลาในชุดควบคุม เพื่อเป็นชุดทดลองสำหรับเลี้ยงปลาดุกลูกผสมแบบหมุนเวียนน้ำจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF รายละเอียดบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF แสดงในหัวข้อ 3.3.3

3.3.2 การเตรียมปลาทดลอง

คัดเลือกปลาคูกลูกผสมขนาดประมาณ 3-4 นิ้ว มาเลี้ยงเพื่อปรับสภาพในบริเวณฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นทำการสุ่มปลาที่มีขนาดใกล้เคียงกันลงในบ่อ CAS จำนวน 2 บ่อ และบ่อ RAS จำนวน 4 บ่อ โดยมีอัตราการปล่อย 74 ตัวต่อตารางเมตร (Stickney, 1993) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้มีอัตราการปล่อยปลาคูกลูกผสม 37 ตัวต่อบ่อ และมีการควบคุมระดับน้ำให้มีความลึกเท่ากับ 0.5 เมตร ในทุก ๆ บ่อ โดยมีระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงทั้งหมด 45 วัน ต่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1 ค่า

3.3.3 การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เป็นบ่อทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร ลึก 0.5 เมตร จำนวน 4 บ่อ แบ่งออกเป็นระบบ RAS-FWS จำนวน 2 บ่อ และ RAS-SF จำนวน 2 บ่อ มีองค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

1) พืช

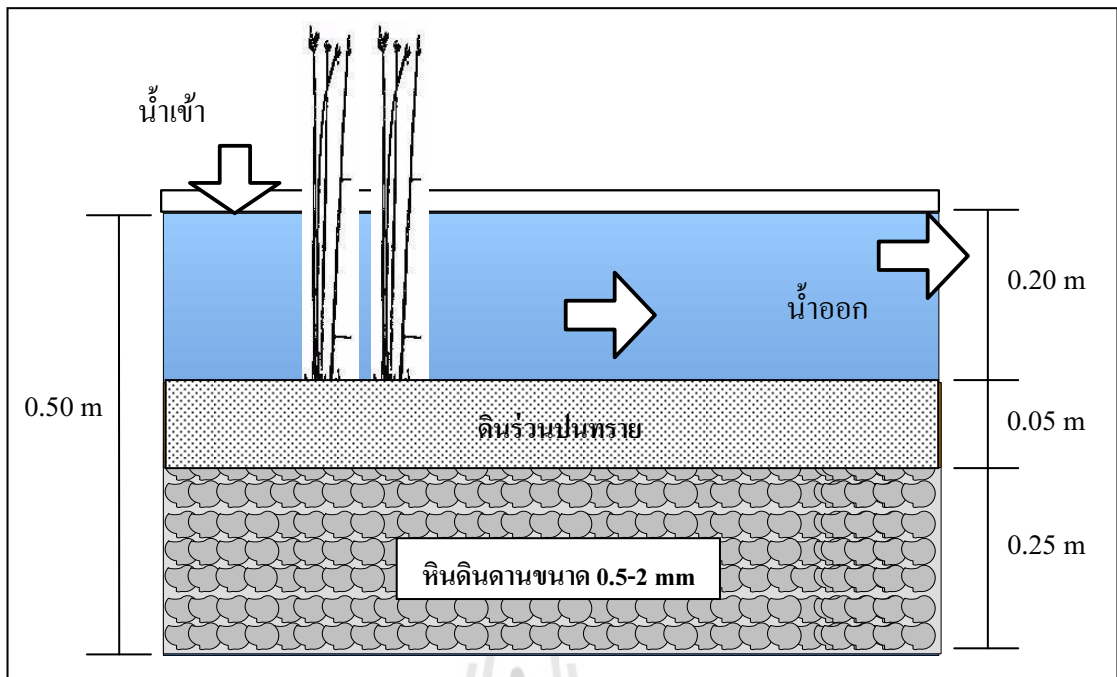
พืชที่เลือกใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ ต้นกกรงกา (*Cyperus involucra Rottb.*) เนื่องจากสามารถปรับตัวและทนทานต่อสภาพน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดชีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

2) ตัวกลาง

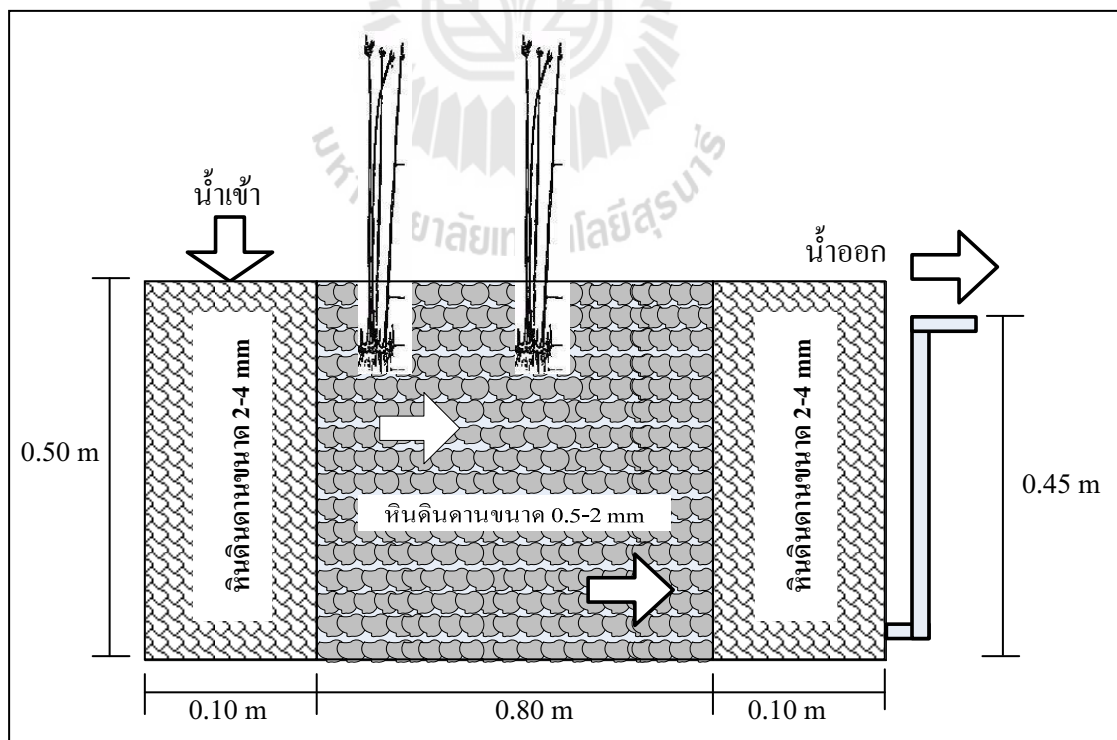
ตัวกลางของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้แก่ หินดินดาน เนื่องจากมีลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (Daothaisong and Yimrattanabovorn, 2008; Drizo et al., 1997; 1999; 2000) ส่วนตัวกลางบริเวณที่ใช้ปลูกพืชเลือกใช้ดินร่วนปนทราย เพื่อให้รากพืชสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ดี โดยมีรายละเอียดการปลูกตัวกลาง ดังต่อไปนี้

- ชุดทดลองระบบ RAS-FWS จะใช้หินดินดานขนาด 0.5-2.0 มิลลิเมตร เป็นตัวกลาง ปลูกที่ระดับความลึก 0.25 เมตร ส่วนด้านบนจะใช้ดินร่วนปนทรายหนา 0.05 เมตร เพื่อใช้สำหรับปลูกพืช และกำหนดระดับน้ำเหนือผิวดินให้มีความลึก 0.20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4

- ชุดทดลองระบบ RAS-SF บริเวณน้ำเสียเข้าและออกจากระบบจะใช้หินดินดานขนาด 2 -4 มิลลิเมตร บริเวณส่วนกลางจะใช้หินดินดานขนาด 0.5-2.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่มีการบำบัดสารอินทรีย์ และกำหนดให้ระดับน้ำที่ไหลใต้ผิวตัวกลางมีความลึก 0.45 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งสรุปรายละเอียดในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF

ตารางที่ 3.1 สรุปรายละเอียดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF

ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	US.EPA (2000)		ค่าที่ใช้การศึกษา	
	FWS	SF	FWS	SF
ความพรุน	0.32-0.45	0.32-0.45	0.40*	0.40*
ระดับน้ำ (m)	< 0.5	0.3-0.9	0.2	0.45
ความลึกของตัวกลาง (m)	-	0.3-0.8	0.3	0.5
สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง	2 : 1	2 : 1	2 : 1	2 : 1
ความยาว (m)	-	-	1	1
ความกว้าง (m)	-	-	0.5	0.5

หมายเหตุ : * Daothaisong (2008)

3.3.4 การเริ่มเดินระบบ

3.3.4.1 การเตรียมพืช

นำพืชมาเพาะเลี้ยงภายในบริเวณที่มีการติดตั้งชุดจำลองก่อนที่จะนำไปปลูกลงในระบบชุดจำลอง เพื่อให้พืชสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมจริง จากนั้นทำการคัดเลือกพืชที่มีขนาดใกล้เคียงกัน นำไปตัดให้มีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วนำมาปลูกลงในระบบจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 4 บ่อ มีระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 0.15 เมตร มีความหนาแน่น 42 ต้นต่อตารางเมตร (พิจิตรา ชโยปถัมภ์, 2544) ในช่วงแรกของการเดินระบบจะปล่อยน้ำประปาเข้าไปยังในระบบเพื่อให้พืชสามารถค่อย ๆ ปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อมเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ก่อนที่จะทำการศึกษาดูการติดตาม และเริ่มเดินระบบการทดลอง

3.3.4.2 การศึกษาผลของอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์

น้ำเสียที่ปล่อยออกจากบ่อเลี้ยงปลาถูกผสมแบบ RAS จะถูกนำเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ ทำการคำนวณค่าอัตราการไหลของน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 สำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถคำนวณค่าอัตราการไหลจากสมการที่ 3.2 และเมื่อได้ค่าอัตราการไหลของน้ำแล้ว นำมาคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (US.EPA, 2000) ได้ ดังแสดงในสมการที่ 3.3 โดยมีค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 3 ค่าคือ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.

สมการหาอัตราการไหลสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS
(US.EPA, 1993)

$$Q = \frac{LW[d_n + d_w]}{t} \quad (3.1)$$

- โดยที่ Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (m³/d)
 L = ความยาวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (m)
 W = ความกว้างของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (m)
 d_n = ความลึกของชั้นดิน (m)
 d_w = ความลึกของน้ำ (m)
 n = อัตราส่วนช่องว่างดิน
 t = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (d)

สมการหาอัตราการไหลสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF
(US.EPA, 1993)

$$Q = \frac{LWd_w}{t} \quad (3.2)$$

- โดยที่ Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (m³/d)
 L = ความยาวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (m)
 W = ความกว้างของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (m)
 d_w = ความลึกของน้ำ (m)
 n = อัตราส่วนช่องว่างดิน
 t = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (d)

สมการคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (US.EPA, 2000)

$$\text{HLR} = \frac{Q}{A} \quad (3.3)$$

โดย HLR = อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate) ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (m^3/d)

A = พื้นที่หน้าตัดของบ่อ (m^2)

3.3.4.3 ศึกษาผลของค่าการกระจายการไหล และค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย

การศึกษาดังกล่าว (Tracer study) ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวสามารถใช้ประเมินหาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม ประเมินการไหลลัดวงจรในระบบและสามารถประเมินลักษณะการไหลในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 5,000 mg/l เนื่องจาก NaCl ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลและไม่ถูกดูดซับในชั้นตัวกลาง (Metcalf and Eddy, 2003) โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาระยะเวลาเก็บกักน้ำและค่าการกระจายการไหลของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 4 บ่อ โดยใช้สมการของ Levenspiel (1972) ดังแสดงในสมการที่ (3.4)-(3.7)

ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ย ;

$$T_{mean} = \frac{\sum t_i C_i \Delta i}{\sum C_i \Delta i} \quad (3.4)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน;

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta i}{\sum C_i \Delta i} - T_{mean}^2 \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$\sigma^2\theta = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.6)$$

ค่ากระจายการไหล (d) ;

$$d = \frac{D}{uL_1} \quad (3.7)$$

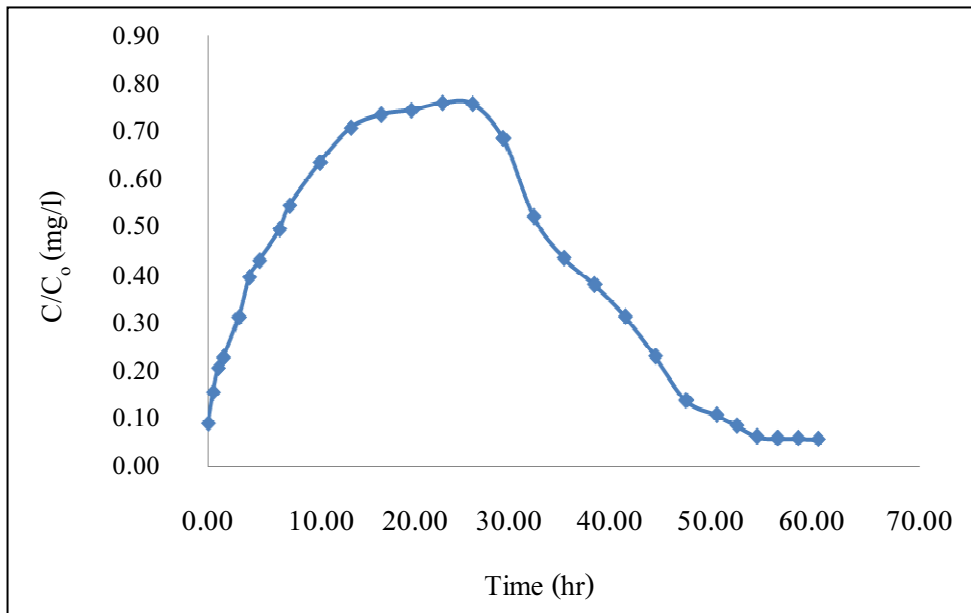
โดย	T_{mean}	=	ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย (d)
	σ^2	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	t_i	=	ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ (d)
	C_i	=	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบที่เวลาใด ๆ (mg/l)
	Δt	=	ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ (d)
	D	=	สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวนอน
	u	=	อัตราการเร็วไหล (m/d)
	L_1	=	ระยะทางของการไหลจากทางเข้าถึงทางออก (m)
	d	=	ค่ากระจายการไหล

จากการศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ โดยใช้สมการ (3.4)-(3.7) ผลการศึกษาและรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข. ตัวอย่างผลการศึกษาสารติดตาม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.2 จากรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลา ผลการศึกษาได้เส้นกราฟเป็นรูประฆังคว่ำ โดยในช่วงแรกความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของคลอไรด์ใกล้เคียงความเข้มข้นเริ่มต้นโดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันทั้งในระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ

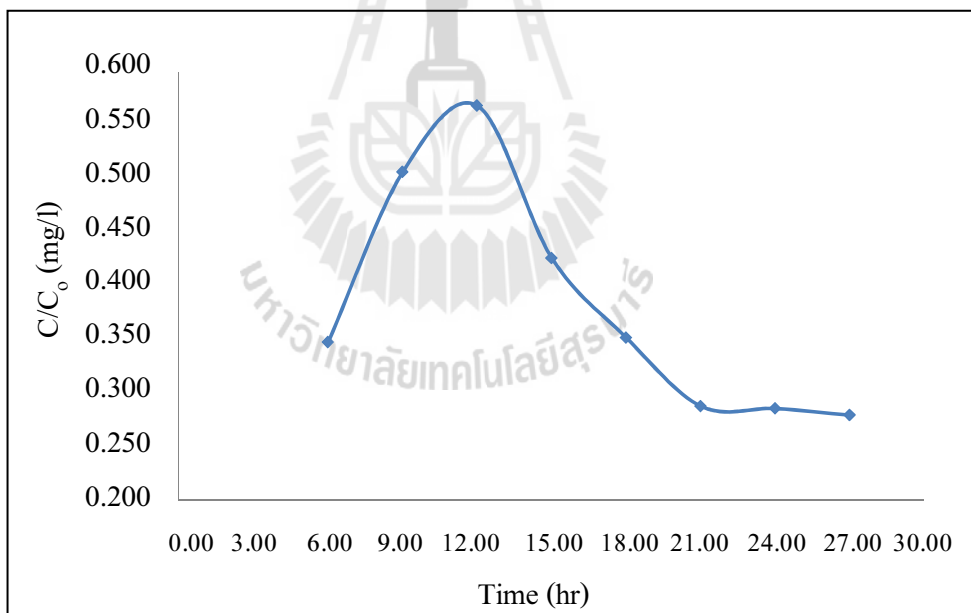
ตารางที่ 3.2 ผลการศึกษาสารติดตาม

HLR ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	ระบบ	T (hr)		ค่าการกระจาย การไหล (d)
		T_{theory}	T_{mean}	
0.32	RAS-FWS	24	24.09	0.033
	RAS-SF	13.5	15.02	0.024
0.64	RAS-FWS	12	14.57	0.036
	RAS-SF	6.75	7.29	0.036
1.28	RAS-FWS	6	6.99	0.047
	RAS-SF	3.38	3.40	0.036

จากตารางที่ 3.2 เมื่อนำผลการศึกษามาคำนวณหาค่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ โดยใช้สมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า T_{mean} และจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เพื่อหาค่า T_{theory} ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ตามลำดับ พบว่าค่า T_{theory} ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าน้อยกว่า T_{mean} ที่อัตราารรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ เนื่องจากเกิดการไหลของคลอรีนเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำเหนือผิวดิน การไหลของคลอรีนในชั้นดินมีน้อยสำหรับระบบ RAS-FWS ส่วนระบบ RAS-SF เนื่องมาจากการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง ความหนาแน่นของพืชและรากพืช มีผลต่อการไหลของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ และเมื่อพิจารณาค่าการกระจายการไหล (d) ของอัตราารรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF มีค่าอยู่ในช่วง 0.024-0.047 พบว่าตัวประกอบการกระจายมีลักษณะการไหลแบบกระจุกกระจายค่อนข้างมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของน้ำ ทำให้เกิดการกวนแบบสมบูรณในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Metcalf and Eddy, 2003)



(ก) ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$



(ข) ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

รูปที่ 3.6 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

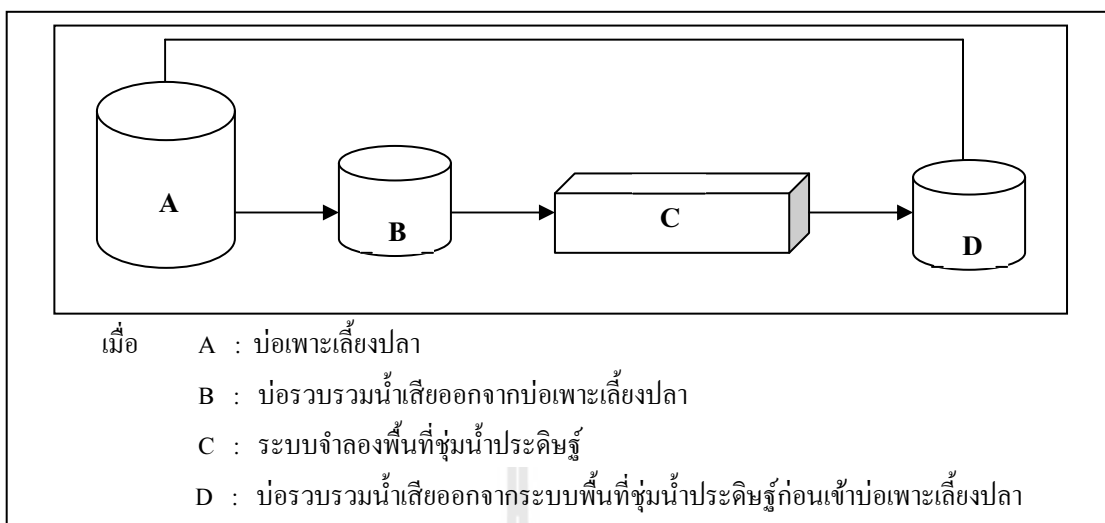
3.3.5 การเดินระบบ

3.3.5.1 การเดินระบบ RAS

การหมุนเวียนน้ำจากการเพาะเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 3.7 ทำการเพาะเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมในบ่อเพาะเลี้ยง (จุด A) ด้วยน้ำประปาเป็นระยะเวลา 5 4 และ 3 วัน ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ตามลำดับ จากนั้นจะทำการปล่อยน้ำออกจากบ่อเลี้ยงปลาประมาณ 3/4 ของน้ำในบ่อไปยังถังรวบรวมน้ำ (จุด B) ในช่วงแรกจะเติมน้ำประปาลงในบ่อเลี้ยงปลาเพื่อให้ได้ระดับน้ำเท่ากับ 50 เซนติเมตรเหมือนเดิม ส่วนน้ำที่อยู่ในถังเก็บน้ำที่จุด B จะถูกปล่อยเข้าไปยังระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (จุด C) เมื่อน้ำที่ถูกบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้วจะถูกรวบรวมที่ถังเก็บรวบรวมน้ำก่อนเข้าบ่อเพาะเลี้ยงปลา (จุด D) เมื่อครบระยะเวลาที่จะต้องมีการหมุนเวียนน้ำ จะทำการสูบน้ำจากจุด D กลับไปยังจุด A จากการศึกษาสมดุลมวลน้ำในระบบในหัวข้อ 3.3.9 พบว่ามีปริมาณน้ำหายไปจากระบบคิดเป็นร้อยละ 8 ของปริมาณน้ำเริ่มต้น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมน้ำประปาเข้าไปในบ่อเลี้ยงปลาเท่ากับปริมาณน้ำที่หายไป เพื่อที่จะรักษาระดับน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาให้คงที่ในทุกกรอบการหมุนเวียน (ปริมาตรน้ำร้อยละ 8 ที่หายไป คือ ปริมาตรน้ำที่นำไปตรวจวิเคราะห์และการคายระเหยของระบบ รายละเอียด ดังแสดงในภาคผนวก ง.)

3.3.5.2 การเดินระบบ CAS

สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมแบบ CAS เป็นระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาตู้ลูกผสม การเปลี่ยนน้ำในบ่อเลี้ยงปลา จะทำการปล่อยน้ำออกจากบ่อเลี้ยงปลาประมาณ 3/4 ของน้ำในบ่อ และเติมน้ำประปาเข้าไปในบ่อเลี้ยงปลาจนได้ระดับความลึก 50 เซนติเมตร โดยมีระยะเวลาในการเปลี่ยนน้ำเท่ากับระบบ RAS



รูปที่ 3.7 แผนผังการหมุนเวียนน้ำในระบบ RAS

3.3.6 การศึกษาระบบ CAS และ RAS

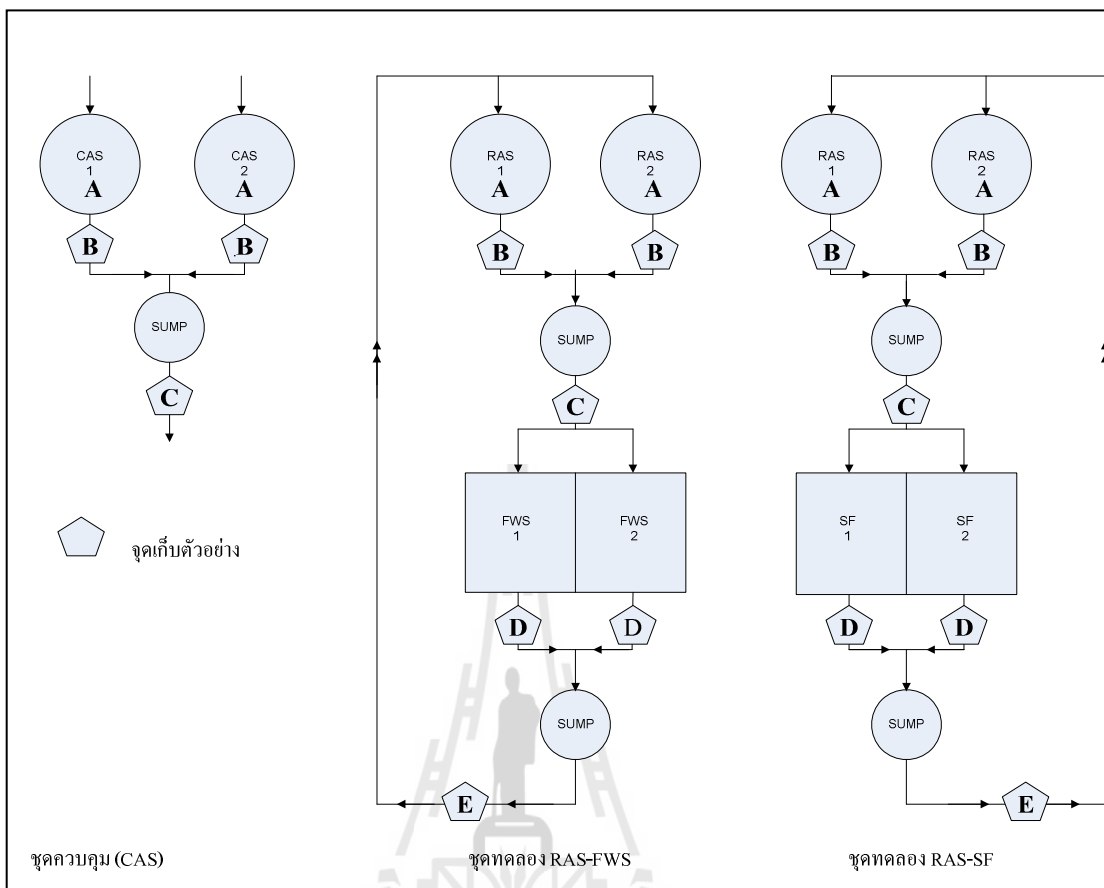
3.3.6.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาตุ๊กตาคอม โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ทำการเก็บตัวอย่างคุณภาพน้ำออกจากบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS จำนวน 4 บ่อ (จุดเก็บตัวอย่าง B) และตรวจวัดคุณภาพน้ำเข้า-ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF (จุดเก็บตัวอย่าง C และ D ตามลำดับ) ดังแสดงในแผนผังการทดลองในรูปที่ 3.8 ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 วัน ($n = 9$) ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 วัน ($n = 11$) และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 3 วัน ($n = 15$) ค่าที่ได้นำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ TSS COD TKN และ TP โดยใช้สมการที่ 3.8 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาตุ๊กตาคอม โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ (\%)} = \frac{C_i - C_e}{C_e} \times 100 \quad (3.8)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำเข้าระบบ

C_e = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำออกจากระบบ



รูปที่ 3.8 จุดเก็บตัวอย่างตัวอย่างคุณภาพน้ำของระบบ CAS และ RAS

3.3.6.2 ศึกษาความเหมาะสมของคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณกผสม

โดยทำการเก็บตัวอย่างคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ จุดเก็บตัวอย่าง E (ก่อนหมุนเวียนน้ำเข้าบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุณกผสมแบบ RAS) ดังแสดงในแผนผังการทดลองในรูปที่ 3.8 ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 วัน ($n = 9$) ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 วัน ($n = 11$) และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 3 วัน ($n = 15$) โดยทำการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้ TSS COD Ammonia (NH_4^+) Nitrite (NO_2^-) Nitrate (NO_3^-) และ TP เพื่อศึกษาความเหมาะสมของคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ในการหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณกผสม

3.3.6.3 ศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาทั้งแบบ CAS และ แบบ RAS

ทำการเก็บตัวอย่างคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาแบบ CAS จำนวน 2 บ่อ และแบบ RAS จำนวน 4 บ่อ (จุดเก็บตัวอย่าง A) ดังแสดงในแผนผังการทดลองในรูปที่ 3.8 ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 วัน ($n = 9$) ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 วัน ($n = 11$) และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 3 วัน ($n = 15$) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ COD Alkalinity Turbidity pH Temperature Ammonia และค่าการส่องผ่านของแสง เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานและดูความแตกต่างคุณภาพน้ำของระบบ CAS และระบบ RAS เพื่อเปรียบเทียบกัน

3.3.6.4 ศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ในบ่อเลี้ยงปลา (K_T)

ทำการเก็บคุณภาพน้ำที่ออกจากบ่อเลี้ยงปลา (จุดเก็บตัวอย่าง C) เพื่อนำไปศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ในบ่อเลี้ยงปลา โดยใช้เครื่องมือ Oxitop[®]-OC110 เป็นเวลา 20 วัน ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ที่อุณหภูมิ 20°C ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ การคำนวณหาค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังแสดงในสมการที่ 3.9 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.)

$$\text{BOD} = \frac{M(\text{O}_2)}{RT_m} \left[\frac{V_t - V_1}{V_1} + \frac{\alpha T_m}{T_0} \right] \cdot \Delta P(Q_2) \quad (3.9)$$

- โดย $M(\text{O}_2)$ = น้ำหนักโมเลกุลของออกซิเจน (32,000 mg/mol)
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส (83.144 l·mbar/mol·k)
 T_0 = อุณหภูมิอ้างอิง (273.15 K)
 T_m = อุณหภูมิที่วัดสำหรับ BOD₅ (293.15 K)
 V_t = ปริมาตรขวดตัวอย่าง (ml)
 V_1 = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)
 α = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึม Bunsen (0.03103)
 $\Delta P(\text{O}_2)$ = ความแตกต่างของความดันออกซิเจน (mbar)

ค่า BOD ที่ได้ นำมาคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (K_{20}) จากสมการ 3.10 (Metcalf and Eddy, 2003) ดังต่อไปนี้

$$\frac{dy}{dt} = K_{20}(L_0 - y) \quad (3.10)$$

- โดย t = ระยะเวลา (d)
 K_{20} = ค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ที่อุณหภูมิ 20 °C (d⁻¹)
 L_0 = ค่า BOD สูงสุดของน้ำตัวอย่าง (Ultimate BOD) (mg/l)
 Y = ความเข้มข้น BOD ณ เวลาใด ๆ ในน้ำตัวอย่าง (mg/l)

สำหรับค่าคงที่อัตราการย่อยสลายภาคสนาม ทำการคำนวณหาค่าอัตราการย่อยสลายที่อุณหภูมิใด ๆ (K_T) ดังแสดงในสมการที่ 2.1 (U.S.EPA, 1993) เมื่อได้ค่า K_T ของภาคสนามแล้ว นำมาคำนวณหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 20°C (K_{20}) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 (U.S.EPA, 2000) สมการที่ 2.1 และ 2.2 ในหัวข้อ 2.6 มีรายละเอียดสมการ ดังต่อไปนี้

$$\frac{C_c}{C_i} = (K_T) t$$

$$K_T = K_{20} (\theta)^{T-20}$$

นำค่าคงที่อัตราการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 20°C (K_{20}) ที่ได้จากการคำนวณในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากภาคสนาม เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสียจากบ่อเพาะเลี้ยงปลาในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.3.7 ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตของปลาดุกลูกผสมและผลกระทบต่อสุขภาพปลาดุก ลูกผสมระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้ผิวดิน

3.3.7.1 ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม

ทำการชั่งน้ำหนักอาหารแห้งที่ปลากินและวัดค่าความยาวและชั่งน้ำหนักของปลาดุกลูกผสมทั้ง 6 บ่อ ก่อนที่จะปล่อยลงบ่อเพาะเลี้ยงและหลังจากที่เลี้ยงจนครบ 45 วัน (Desai and Singh, 2009) จำนวนตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด 12 ตัวอย่างต่อครั้ง โดยทำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ค่าความยาวลำตัว
- 2) น้ำหนักตัว
- 3) น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (average daily weight gain; ADG) (กรัม/วัน)

$$ADG = \frac{W_2 - W_1}{T} \quad (3.11)$$

4) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม (percentage weight gain, WG) (%)

$$WG = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.12)$$

5) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate, SGR) (%/วัน)

$$SGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{T} \times 100 \quad (3.13)$$

6) อัตราการรอดตาย (survival rate) (%)

$$\text{Survivalrate} = \frac{\text{finaloffish}}{\text{Initialoffish}} \times 100 \quad (3.14)$$

7) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio, FCR)

$$FRC = \frac{\text{Wetweightgain}}{\text{Dryweightoffeed}} \times 100 \quad (3.15)$$

โดย W_1 = น้ำหนักของปลาคูกลูกผสมเริ่มต้น (g)

W_2 = น้ำหนักของปลาคูกลูกผสมสุดท้าย (g)

T = ระยะเวลาทดลอง (วัน)

3.3.7.2 ผลกระทบต่อสุขภาพปลา

ทำการสุ่มตัวอย่างปลาดุกร้อยละ 25 จากจำนวนปลาทั้งหมดในแต่ละชุดการทดลอง (Desai and Singh, 2009) โดยการเจาะเลือดปลา เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางโลหิตวิทยา การเปลี่ยนแปลงทางโลหิตวิทยาสามารถบอกถึงการตอบสนองของร่างกายต่อสิ่งที่มากระตุ้น อีกทั้งยังเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการตอบสนองต่อความเครียดและสรีรวิทยาของปลา ค่าทางโลหิตวิทยาที่นำมาตรวจวิเคราะห์ ได้แก่

1) ค่าเม็ดเลือดแดงอัดแน่น (Packed cell volume) ใช้เข็มดูดเลือดของปลาดุกถูกผสมให้ได้ประมาณ 2 มิลลิลิตร นำเลือดไปใส่ในหลอดเก็บตัวอย่าง ที่มีสาร K_2 EDTA อยู่ด้านใน เขย่าเบา ๆ เพื่อให้สารผสมเข้ากับตัวอย่างเลือด และป้องกันเลือดแข็งตัว จากนั้นนำตัวอย่างเก็บไว้ในที่เย็น ก่อนที่จะนำไปเหวี่ยง ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อวินาที นาน 5 นาที อ่านค่าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ (จรรยา พุกกะเวส และ เสาวนิตย์ ทิพย์เสวก, 2531)

2) ปริมาณฮีโมโกลบิน วิธีการเก็บตัวอย่างเลือดเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การหาค่าปริมาณฮีโมโกลบินหาโดยวิธี Acid hematin (Brown, 1993) โดยใช้หลักการเทียบสีของตัวอย่างเลือดกับค่ามาตรฐาน อ่านค่าได้หน่วยเป็นกรัมเปอร์เซ็นต์

3.3.8 การประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3.6.4 นำมาประเมินหาค่าพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้สมการที่ 3.16 (US.EPA, 2000) นำไปเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ที่แนะนำโดย U.S. EPA เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสียในการเพาะเลี้ยงปลาดุกถูกผสมและใกล้เคียงสภาพแวดล้อมสำหรับประเทศไทย

$$K_T = \frac{Q \ln(C_i - C_e)}{dA} \quad (3.16)$$

โดย K_T = ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (d^{-1})

C_i = ความเข้มข้นของ COD ในน้ำเข้าระบบ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของ COD ในน้ำออกจากระบบ (mg/l)

d = ความลึกของระดับน้ำในบ่อ (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของบ่อ (m^2)

3.3.9 สมดุลมวลน้ำ

ทำการวัดระดับน้ำในบ่อปลาทั้ง 6 บ่อ และนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำที่เข้าและออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (จุดเก็บตัวอย่าง A และ E) ดังแสดงแผนผังการทดลองในรูปที่ 3.8 และคำนวณหาอัตราการระเหยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ RAS-FWS และ RAS-SF ดังแสดงในสมการที่ 3.17 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

$$L_w = (E_T - P_R)(1 + L_R)100/E \quad (3.17)$$

โดย L_w = อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (m/yr)

E_T = อัตราการระเหย (m/yr)

P_R = ปริมาณน้ำฝน (1,307 mm/yr)

ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดนครราชสีมา, 2550)

L_R = การชะซึมลงดิน 0.1-0.2 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

E = ประสิทธิภาพของระบบให้น้ำแก่พืช

แบบปล่อยไหลตามพื้นดิน 0.65-0.75 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

จากผลการศึกษาอัตราการคายระเหยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 $m^3 m^{-2} d^{-1}$ มีค่าอัตราการคายระเหยน้อยมาก ประมาณร้อยละ 0.85-1.61 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.)

3.4 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้า-ออกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และน้ำในบ่อเลี้ยงปลาจุกผสมแบบ CAS และแบบ RAS ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้า-ออกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ลักษณะสมบัติ ของน้ำเสียเข้า-ออก	วิธีการวิเคราะห์
COD (mg/l)	Close Reflux Method
BOD (mg/l)	Azide Modification Method
TSS (mg/l)	Filtration/Evaporation
TKN (mg/l)	TKN method
Ammonia (mg/l)	Nesslerization
Nitrate (mg/l)	Colorimetric Method
Nitrite (mg/l)	Colorimetric Method
TP (mg/l)	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method

หมายเหตุ : APHA et al. (2005)

ตารางที่ 3.4 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาจุกผสม

ลักษณะสมบัติของน้ำในบ่อปลา	วิธีการวิเคราะห์
DO (mg/l)	DO meter
Alkalinity (mg/l)	Titration Method
Transparency Depth (cm)	Secchi Dish
Turbidity (NTU)	Nephelometric Method
pH	pH Meter
Temperature ($^{\circ}$ C)	Thermometer
Ammonia (mg/l)	Titration

หมายเหตุ : APHA et al. (2005)

3.5 สมมติฐานการทดสอบค่าทางสถิติ

3.5.1 ทดสอบความแตกต่างของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF มีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยวิธี Paired Test (2-tailed) สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยระบบ RAS-FWS เท่ากับ RAS-SF หรือระบบ RAS-FWS ไม่แตกต่างจาก RAS-SF

H_1 : ค่าเฉลี่ยระบบ RAS-FWS ไม่เท่ากับ RAS-SF หรือระบบ RAS-FWS แตกต่างจาก RAS-SF

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (2-tailed) < 0.05

3.5.2 ทดสอบความแปรปรวนของระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF โดยทดสอบด้วยวิธี One way ANOVA สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยของระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF เท่ากัน หรือระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยของระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ไม่เท่ากัน หรือระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF แตกต่างกัน

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. < 0.05

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 ประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้ข้อมูลคุณภาพเข้าและออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ นำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ที่อัตรารับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัด COD TSS TKN และ TP ดังแสดงในสมการที่ 3.8 นำข้อมูลที่คำนวณได้มาวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติโดยวิเคราะห์ด้วยวิธี Paired Test

3.6.2 การควบคุมดูแลคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลา โดยทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในบ่อ CAS จำนวน 2 บ่อ และบ่อ RAS จำนวน 4 บ่อ และนำไปเปรียบเทียบค่ามาตรฐานในการเพาะเลี้ยงปลา ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6

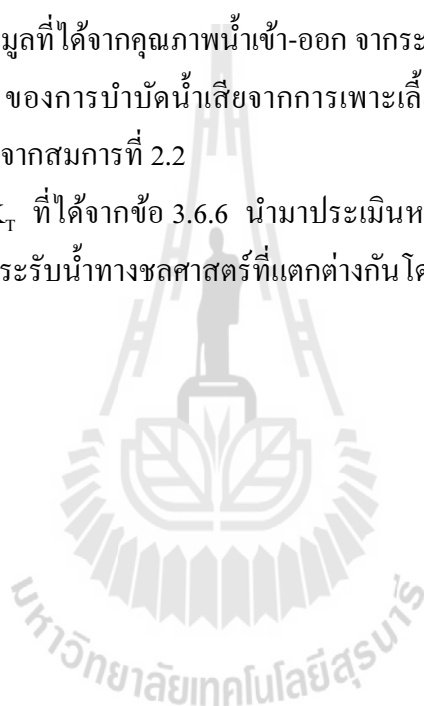
3.6.3 ศึกษาคุณภาพน้ำที่เข้าระบบเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม เพื่อดูความเหมาะสมของคุณภาพน้ำเข้าบ่อเลี้ยงปลาดุกลูกผสมให้ได้ตามมาตรฐานการเพาะเลี้ยงปลา ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6

3.6.4 การวิเคราะห์ค่าทางโลหิตวิทยา โดยทำการเจาะเลือดปลาตรวจวัดค่าทางโลหิตวิทยาในหัวข้อ 3.3.7 เพื่อประเมินผลสุขภาพของปลาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ CAS และระบบ RAS โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test

3.6.5 เปรียบเทียบผลผลิตของปลาดุกลูกผสมที่ได้จากการเลี้ยงโดยระบบ CAS และระบบ RAS ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ค่าความยาวลำตัว น้ำหนัก อัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test

3.6.6 นำผลข้อมูลที่ได้จากคุณภาพน้ำเข้า-ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดมาประเมินค่าคงที่ (K_T) ของการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ จากสมการที่ 2.2

3.6.7 จากค่า K_T ที่ได้จากข้อ 3.6.6 นำมาประเมินหาพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สำหรับภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ที่แตกต่างกัน โดยใช้สมการที่ 3.16



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุก ลูกผสมโดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ระบบ คือ (1) ชุดควบคุม (CAS) เป็นระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม และ (2) ชุดทดลอง (RAS) ซึ่งจะประกอบด้วย RAS-FWS และ RAS-SF เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ โดยมีรายละเอียดผลการศึกษา ดังต่อไปนี้

4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

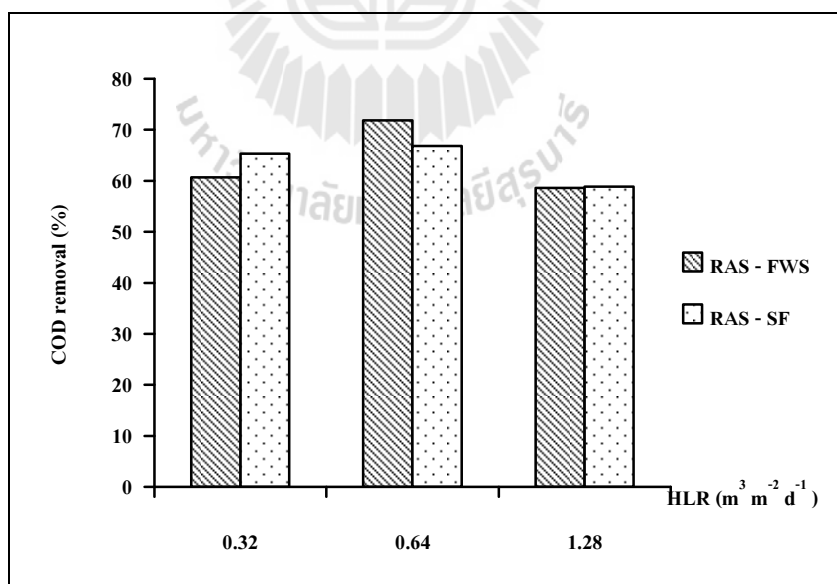
4.1.1 ซีโอดี (COD)

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS เปรียบเทียบกับระบบแบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 60.67 และ 65.33 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 71.82 และ 66.82 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 58.60 และ 58.87 ตามลำดับ เมื่อนำผลการศึกษา มาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำผลประสิทธิภาพการกำจัด COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากัน ไปทดสอบ ค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 ถึง จ.3) และเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS จะเห็นได้ว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด

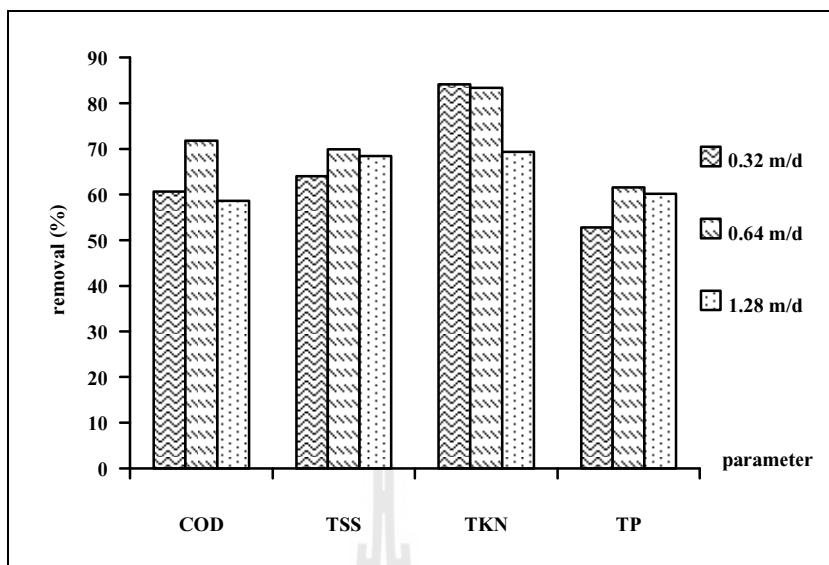
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของน้ำที่เข้า-ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (mean±S.D.)

ลักษณะ น้ำเสีย	ระบบ	0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 9)			0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 11)			1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 15)		
		ความเข้มข้น (mg/l)		ประสิทธิภาพ	ความเข้มข้น (mg/l)		ประสิทธิภาพ	ความเข้มข้น (mg/l)		ประสิทธิภาพ
		น้ำเข้า	น้ำออก	(%)	น้ำเข้า	น้ำออก	(%)	น้ำเข้า	น้ำออก	(%)
COD	RAS-FWS	79	30	60.67±14.9	117	36	71.82±12.2	76	32	58.60±16.4
	RAS-SF	69	23	65.33±13.9	132	46	66.82±11.4	108	45	58.87±13.9
TSS	RAS-FWS	68	24	64.00±9.4	81	24	69.91±7.4	100	32	68.4±5.5
	RAS-SF	61	25	58.56±10.0	74	26	64.27±9.6	91	35	64.6±8.3
TKN	RAS-FWS	3.22	0.64	84.11±6.2	2.75	0.43	83.36±6.9	1.79	0.51	69.31±12.6
	RAS-SF	3.55	1.16	67.11±11.2	2.62	0.67	73.45±6.5	1.66	0.67	59.87±9.88
TP	RAS-FWS	1.51	0.66	52.78±9.8	0.043	0.016	61.55±9.4	0.037	0.014	60.13±6.62
	RAS-SF	0.95	0.35	67.78±10.3	0.066	0.18	73.18±10.8	0.036	0.009	74.6±6.45

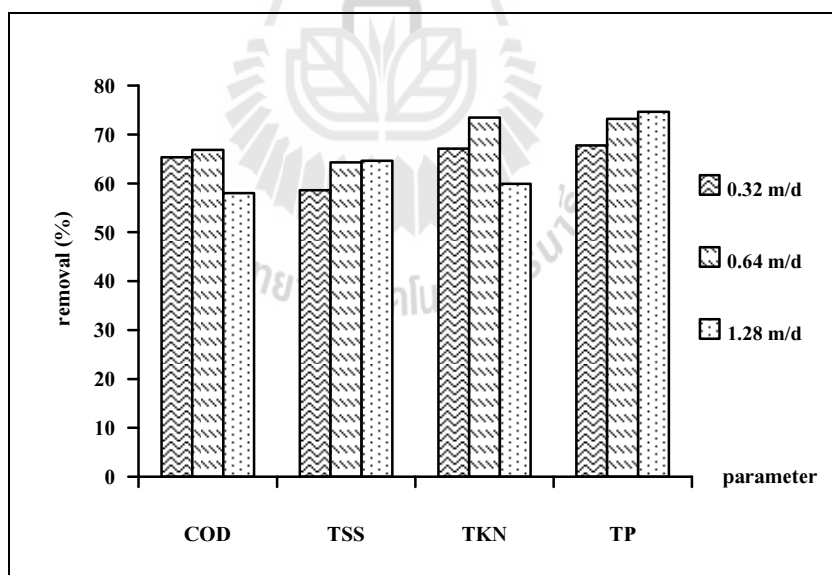
เท่ากับร้อยละ 71.82 (ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 68.82 (ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3) และเมื่อนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4 และ จ.5) จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ไม่แตกต่างกันแม้เพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Schulz et al. (2003) ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราท์โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1 3 และ $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ พบว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD เนื่องจากความเข้มข้นของ COD ที่เข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความเข้มข้นต่ำ และระบบมีระยะเวลาเก็บกักน้อย อีกทั้ง COD เกิดการตกตะกอนและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์บริเวณรากพืช ในการศึกษาครั้งนี้ที่มีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์อยู่ในช่วง $0.32\text{-}1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ซึ่งน้อยกว่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาของ Schulz et al. (2003)



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ



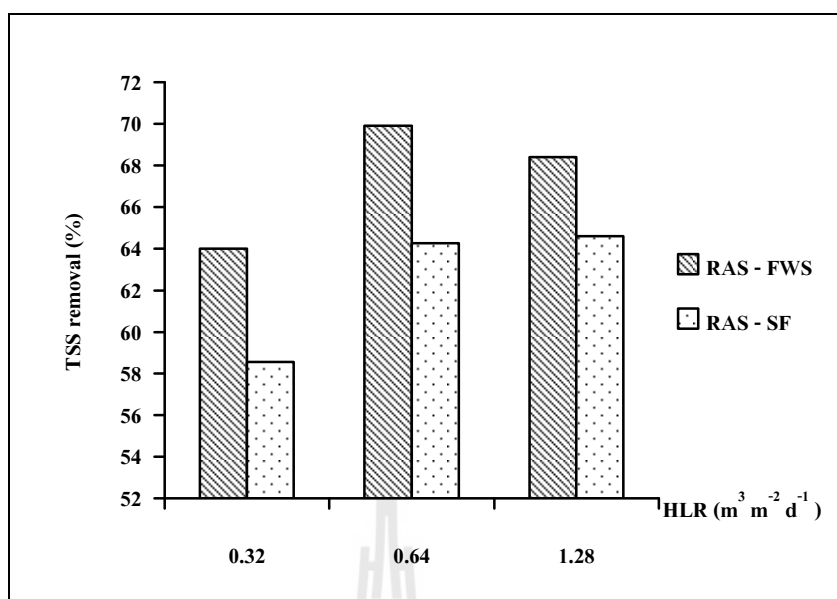
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.1.2 ของแข็งแขวนลอย (TSS)

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS เปรียบเทียบกับระบบแบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 64.00 และ 58.56 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 69.91 และ 64.27 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 68.40 และ 64.6 ตามลำดับ เมื่อนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด TSS ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยระบบ RAS-FWS จะมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TSS สูงกว่าระบบ RAS-SF ทุกอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ แต่เมื่อนำผลประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด TSS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัด TSS สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 69.91 (ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด TSS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันของระบบ RAS-SF พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัด TSS สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 64.60 (รูปที่ 4.3) และเมื่อนำข้อมูลของทั้ง 2 ระบบ มาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4 และ จ.5) จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ไม่แตกต่างกันแม้มีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น Schulz et al. (2003) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราท์โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1 3 และ $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ พบว่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นและระยะเวลาเก็บกักที่ลดลง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด TSS เนื่องจาก TSS ในระบบจะถูกกำจัดโดยยืดอกที่ผิวของต้นพืชและมีบางส่วนถูกกรองโดยชั้นของตัวกลาง

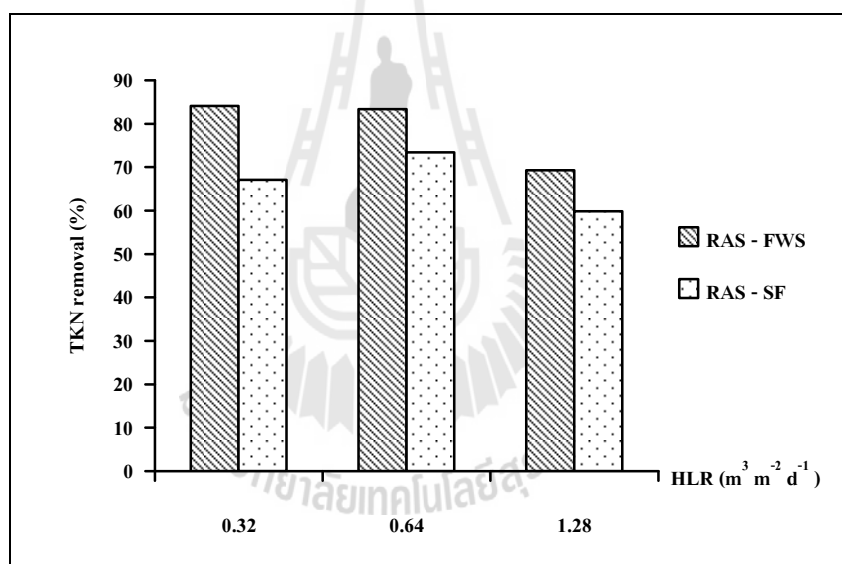


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.1.3 ทีเคเอ็น (TKN)

เมื่อนำข้อมูลค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS เปรียบเทียบกับระบบ RAS-SF (รูปที่ 4.5) ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 81.11 และ 67.11 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 83.36 และ 73.45 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 69.33 และ 59.87 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าระบบ RAS-FWS จะมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TKN สูงกว่าระบบ RAS-SF ในทุกอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัด TKN ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TKN ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS พบว่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัด TKN สูงสุดเท่ากับร้อยละ 84.11 (รูปที่ 4.2) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด TKN ของระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 73.45 (รูปที่ 4.3) และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วย

วิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ง. (ตารางที่ จ.4 และ จ.5) จากการศึกษาของ Lin et al. (2003); กรมควบคุมมลพิษ (2548) พบว่าในระบบ FWS สามารถรับออกซิเจนได้โดยตรงจากอากาศทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายได้ทั้งแบบใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจน เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า Nitrification แต่ระบบ SF โดยส่วนใหญ่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบดีไนตริฟิเคชัน และจากการศึกษาของ Kadlec and Knight (1996); U.S.EPA (2000) พบว่ากลไกหลักของการกำจัด TKN เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน อีกทั้ง Schulz et al. (2004) ยังศึกษาพบว่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นและระยะเวลาเก็บกักที่น้อยลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ที่พบว่า ระบบ RAS-FWS จะมีประสิทธิภาพกำจัด TKN ลดลงเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น

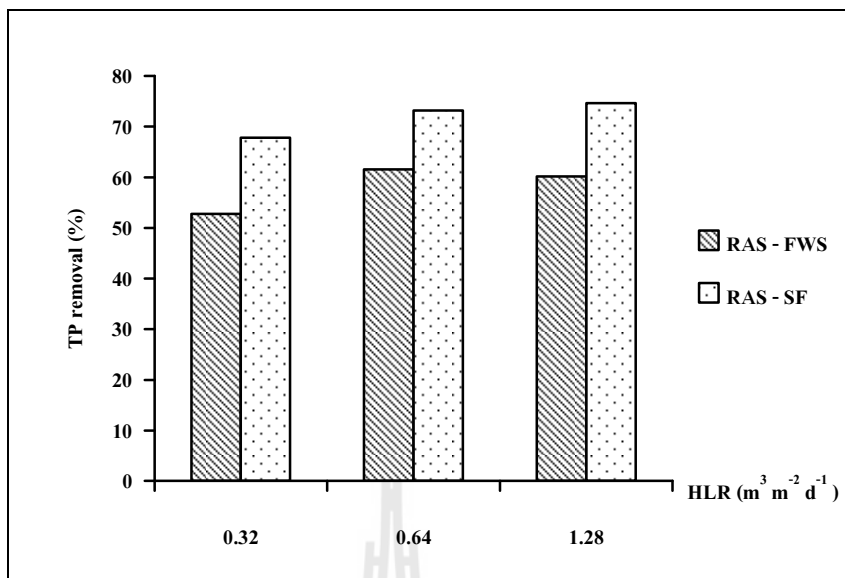


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TKN ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.1.4 ฟอสฟอรัส (TP)

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS เปรียบเทียบกันกับระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 52.78 และ 67.78 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 61.55 และ 73.18 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 60.13 และ 74.60 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระบบ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการกำจัด TP สูง

กว่าระบบ RAS-FWS ในทุก ๆ อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด TP ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด TP สูงสุด ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีประสิทธิภาพการกำจัด TP ร้อยละ 61.55 และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด TP ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด TP สูงสุด ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เท่ากับร้อยละ 74.60 โดยจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด TP เพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4 และ จ.5) แสดงว่าการเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด TP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Daizo et al. (1997) กล่าวว่ากลไกหลักของการกำจัด TP ได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับ และการกรองที่ตัวกลาง และจากการศึกษาของ Lin et al. (2002); Lu et al. (2008) พบว่าระบบ SF จะมีกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสเอาไว้ที่ตัวกลางและพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต ดังนั้นระบบ RAS-SF ซึ่งมีปริมาณของตัวกลางมากกว่าระบบ FWS จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัด TP ได้มากกว่า และการเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sindilariu et al. (2008) ที่ศึกษาคุณภาพน้ำจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราส์ที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยศึกษาที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.9-3.9 ลิตรต่อวินาที พบว่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด TP



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TP ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.1.5 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1) ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF พบว่าระบบ RAS-FWS มีประสิทธิภาพในการกำจัด TKN สูงกว่าระบบ RAS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากระบบ RAS-FWS สามารถรับออกซิเจนได้โดยตรงจากอากาศ ทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ใน ไตรเจนแบบไนตริฟิเคชัน ในขณะที่ระบบ RAS-SF โดยส่วนใหญ่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบดีไนตริฟิเคชัน และระบบ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการกำจัด TP สูงกว่าระบบ RAS-FWS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพราะกลไกหลักของการกำจัด TP ได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับ และการกรองที่ตัวกลาง โดยระบบ RAS-SF จะมีปริมาณของตัวกลางมากกว่าระบบ RAS-FWS จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด TP ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ TSS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเนื่องจากในการเดินระบบครั้งนี้มีการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีค่าต่ำ และสำหรับค่า TSS จะมีกลไกในการกำจัดโดยการยึดเกาะที่ลำต้นพืชและถูกกรองโดยชั้นตัวกลาง

2) ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละระบบ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด TKN ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ของระบบ RAS-FWS และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์

$0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ของระบบ RAS-SF มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัด TKN สูงสุด เนื่องจากที่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ต่ำจะมีระยะเวลาในการเก็บกักของระบบนาน ทำให้แบคทีเรีย Nitrifying และ Denitrifying ในระบบสามารถย่อยสลาย TKN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัด COD TSS และ TP ของทั้ง 2 ระบบไม่แตกต่างกัน แม้มีอัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น

4.2 คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ ก่อนเข้าบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุณลักษณะ เปรียบเทียบค่าคุณภาพน้ำที่ได้กับค่ามาตรฐานที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณลักษณะ โดยมีรายละเอียดของคุณภาพน้ำในแต่ละพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

4.2.1 ค่า COD

จากผลการศึกษาคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่า COD พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25-40 และ 16-38 mg/l ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า COD โดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า COD อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งจากการศึกษาของ Samudro and Mangkoedihardjo (2010) พบว่าค่า COD ที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าน้อยกว่า 50 mg/l เนื่องจากค่า COD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสกปรกของน้ำ ซึ่งเกิดเนื่องจากเศษอาหารที่ปลากินและของเสียที่ปลาขับถ่าย

4.2.2 ค่า TSS

จากผลการศึกษาคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่า TSS พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10-21 และ 12-30 mg/l ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า TSS โดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า TSS มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดย Tucker and Hargreaves (2004) กล่าวว่าค่า TSS ในบ่อเลี้ยงปลาคูควรมีค่าไม่เกิน 225 mg/l ปริมาณ TSS ในบ่อปลาจะเกิดจากแพลงค์ตอน ของเสียที่ปลาขับออกมา เศษอาหารที่ปลากินไม่หมด และอนุภาคของดินที่ฟุ้งกระจายในบ่อปลา หากของแข็งในบ่อปลามากเกินไปจะทำให้ไปอุดตันเหงือกของปลา ขัดขวางการลำเลียงออกซิเจนในเลือดของปลา ขวางกันแสงและออกซิเจนจากอากาศลงสู่บ่อเลี้ยงปลา (Swann, 1997)

ตารางที่ 4.2 คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (mean±S.D.)

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น mean±S.D (mg/l)						ค่ามาตรฐาน (mg/l)
	0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 9)		0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 11)		1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 15)		
	FWS	SF	FWS	SF	FWS	SF	
COD	40±18.58	16±8.3	33±9.2	38±8.4	25±14.1	34±14.47	< 50 ¹
TSS	17±9.07	13±6.98	10±4.65	12±6.07	21±8.5	30±12.8	< 225 ³
TP	0.188±0.07	0.140±0.007	0.011±0.004	0.010±0.005	0.011±0.001	0.007±0.002	< 0.5 ⁴
NH ₄	0.42±0.07	0.56±0.1	0.42±0.09	0.52±0.13	0.28±0.11	0.28±0.10	0.02-1 ³
NO ₂ ⁻	0.006±0.003	0.005±0.003	0.016±0.004	0.02±0.006	0.007±0.002	0.011±0.003	< 0.1 ²
NO ₃ ⁻	0.300±0.027	0.236±0.031	0.180±0.07	0.174±0.03	0.181±0.021	0.176±0.017	0 – 3 ²

หมายเหตุ : ¹ Samudro and Mangkoedihardjo (2010)

² Meade (1989)

³ Tucker and Hargreaves (2004)

⁴ กระทรวงธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2551)

4.2.3 ค่า TP

จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่า TP พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.010-0.188 และ 0.007-0.140 mg/l ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า TP โดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า TP ในน้ำออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2551) ได้กำหนดให้ปริมาณ TP ที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าน้อยกว่า 0.50 mg/l ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจาก TP เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย หากในบ่อมีสาหร่ายมากจะทำให้น้ำในบ่อปลาขาดออกซิเจนในเวลา กลางคืน

4.2.4 ค่าแอมโมเนีย (NH_3)

จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่าแอมโมเนีย พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.28-0.56 และ 0.28-0.52 mg/l ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าแอมโมเนียโดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าแอมโมเนียมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จากการศึกษาของ Tucker and Hargreaves (2004) กล่าวว่าค่าแอมโมเนียที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.02-1.00 mg/l เนื่องจากแอมโมเนียมีผลต่อการลดการลำเลียงออกซิเจนของปลา และมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อปลาได้ (Stickney, 1993)

4.2.5 ค่าไนไตรท์ (NO_2^-)

จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่าไนไตรท์ พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.006-0.016 และ 0.005-0.02 mg/l ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าไนไตรท์โดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณไนไตรท์มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดย Tucker and Hargreaves (2004) กล่าวว่าค่าไนไตรท์ในบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าไม่เกิน 0.10 mg/l ถ้าหากไนไตรท์มีค่ามากเกินไปจะส่งผลเกี่ยวกับการลำเลียงออกซิเจนในเลือดของปลา ทำให้ปลาไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำได้ (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2544)

4.2.6 ค่าไนเตรท (NO_3^-)

จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งระบบแบบ RAS-FWS และ RAS-SF สำหรับค่าไนเตรท พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.181-0.300 และ 0.174-0.236 mg/l ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าไนเตรทโดยรวมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณไนเตรทมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดย Meade (1989) กล่าวว่าปริมาณไนเตรทที่เหมาะสม

และไม่เป็นพิษต่อปลาจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-3.0 mg/l ในเตรทมีผลทำให้เกิดพิษต่อปลาเหมือนกับไนไตรท์คือ ขัดขวางการลำเลียงออกซิเจนในเลือดปลาทำให้ปลาไม่กระฉับกระเฉง กินอาหารได้น้อย ในเตรทที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรท์เมื่อมีปริมาณเท่ากัน (Lawsos, 1995)

4.2.7 สรุปผลการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากการศึกษาคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ค่า COD TSS TP แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท พบว่าค่าคูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาอุกुकผสม เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาอุกुकผสม ดังนั้นจึงทำให้คูณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาอุกुकผสมได้

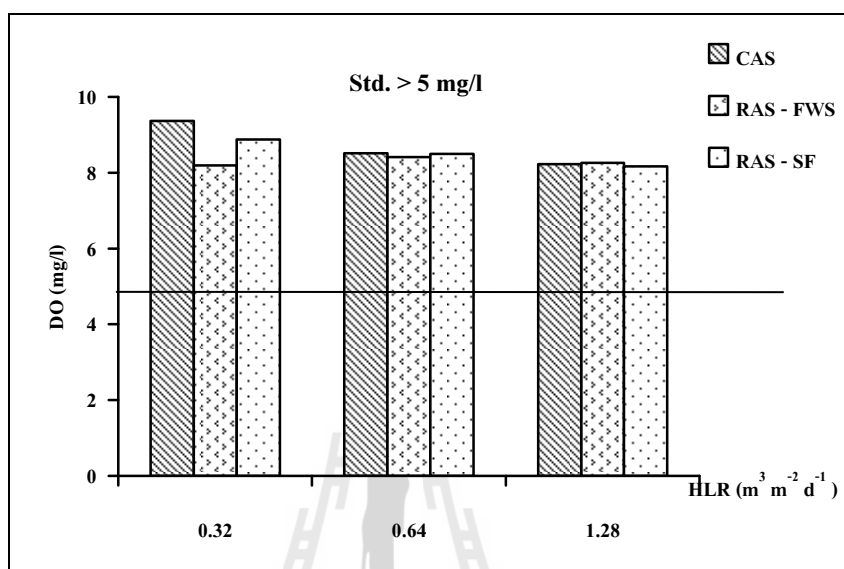
4.3 คูณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกुकผสม

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาคูณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาอุกुकผสมของระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ โดยทำการเปรียบเทียบคูณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.14 โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.3.1 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO)

ค่าเฉลี่ยของ DO ในบ่อเลี้ยงปลาอุกुकผสมแบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 9.37 8.19 และ 8.81 mg/l ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 8.51 8.41 และ 8.50 mg/l ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 8.23 8.26 และ 8.17 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.7 พบว่าผลค่า DO ดังกล่าวมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ($\text{DO} > 5 \text{ mg/l}$; Meade, 1989) นำข้อมูลของค่า DO ของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) จะเห็นว่าค่า DO ของระบบ RAS และ CAS มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำข้อมูลค่า DO ของระบบ RAS แบบ FWS และแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่า DO ไม่แตกต่างกัน แม้เพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ Meade (1989) กล่าวว่าค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลา

ควรมีค่ามากกว่า 5 mg/l เนื่องจากค่า DO มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของปลาเป็นอย่างมากและจากผลการศึกษาของ Swann (1997) กล่าวว่าถ้าออกซิเจนในน้ำมีค่าน้อยกว่า 2 mg/l จะมีผลทำให้ปลาเสียชีวิตได้



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างๆ

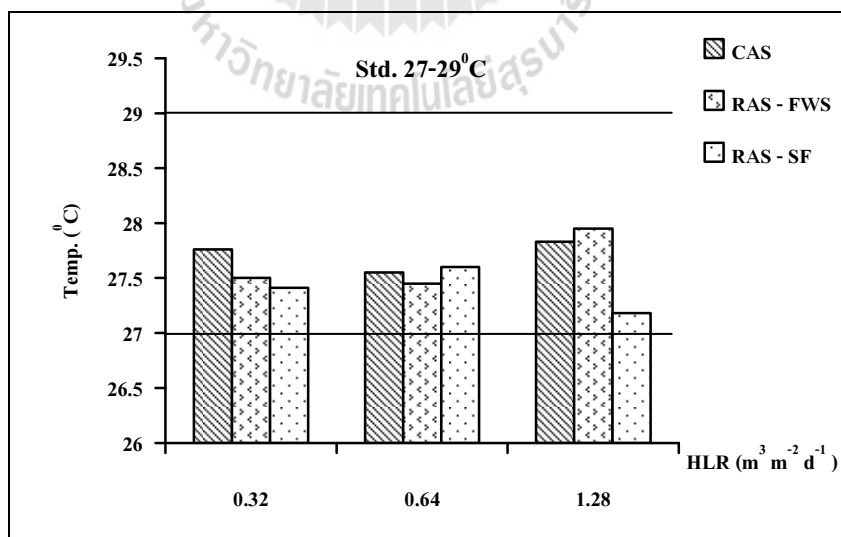
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุณูกผสม ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน (mean±S.D.)

HLR (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	ระบบพื้นที่ ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	DO (mg/l)	Temperature (°C)	pH	Transpiration Depth (cm)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	COD (mg/l)	NH ₄ (mg/l)
Std.		> 5	27-29	7.5-8.5	30-60	5-10.	40-400	< 50	0.02-1.00
0.32 (n = 9)	CAS	9.37±2.34	27.76±2.28	7.64±0.64	26.89±3.03	9.44±0.8	341.06±46.9	89.00±32.4	1.14±0.19
	RAS-FWS	8.19±1.57	27.50±2.40	7.84±0.46	27.95±3.18	9.30±1.7	375.61±23.5	90.18±43.4	1.35±0.25
	RAS-SF	8.88±2.40	27.41±2.23	7.77±0.56	26.37±4.40	9.27±2.1	369.22±32.3	74.44±27.3	1.05±0.16
0.64 (n = 11)	CAS	8.51±0.42	27.54±0.63	7.71±0.14	32.91±1.69	8.00±1.8	118.59±7.4	134.64±28.6	1.42±0.31
	RAS-FWS	8.41±0.33	27.45±0.56	8.13±0.37	31.55±1.01	8.50±2.0	131.09±8.2	164.73±25.8	1.95±0.62
	RAS-SF	8.50±0.18	27.60±0.60	8.22±0.28	31.05±0.69	8.56±1.6	145.73±12.2	171.09±24.6	1.30±0.21
1.28 (n = 15)	CAS	8.23±0.36	27.83±0.43	8.00±0.31	32.67±3.06	8.67±2.1	79.40±8.9	95.93±39.6	1.26±0.25
	RAS-FWS	8.26±0.34	27.95±0.36	7.92±0.31	31.07±3.59	9.08±1.6	130.60±34.0	59.27±12.6	1.12±0.23
	RAS-SF	8.17±0.35	27.18±3.44	8.06±0.25	30.33±4.15	10.04±2.0	146.47±37.0	112.07±45.6	0.94±0.12

4.3.2 ค่าอุณหภูมิ (Temperature)

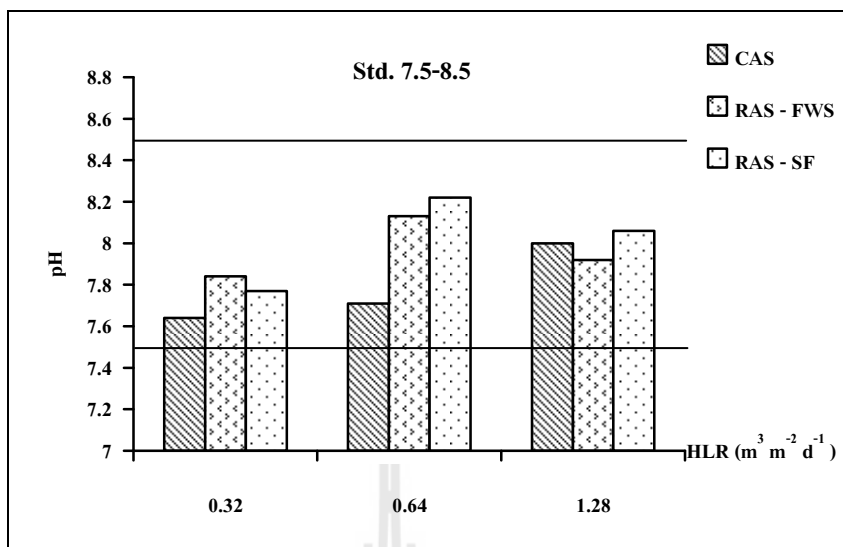
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 27.76 27.50 และ 27.41°C ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 27.55 27.45 และ 27.60°C ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 27.83 27.95 และ 27.18°C ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) และจากรูปที่ 4.8 พบว่าผลค่าอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ($27\text{-}29^\circ\text{C}$; Tucker and Robinson, 1990) เมื่อนำข้อมูลของค่าอุณหภูมิของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) เมื่อนำข้อมูลค่าอุณหภูมิของระบบ RAS แบบ FWS และแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน แม้เพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ Tucker and Robinson (1990) กล่าวว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าอยู่ระหว่าง $27\text{-}29^\circ\text{C}$ และจากผลการศึกษาของ Swann (1997); ถาวร ทันใจ (2551) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลา มีผลต่อการดำรงชีวิต พฤติกรรม การเจริญเติบโต การกินอาหาร และการสืบพันธุ์ของปลา



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าเฉลี่ยของ pH ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาตู้กลุ่มผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 7.64 7.84 และ 7.77 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 7.71 8.13 และ 8.22 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 8.00 7.92 และ 8.06 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) และจากรูปที่ 4.9 พบว่าผลค่า pH ดังกล่าวมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (7.5 -8.5; Tucker and Abramo, 2008) นำข้อมูลของค่า pH ของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $1.28 \text{ m}^3/\text{d}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) แต่ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) โดยค่าเฉลี่ยของ pH ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS มีค่าสูงกว่าบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS เมื่อนำข้อมูลผลค่า pH ของระบบ RAS แบบ FWS และแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่า pH สูงที่สุด จากผลการศึกษาของ Stickney (1993) and Osman (2010) พบว่าค่า pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งถ้า pH มีค่าสูงกว่า 9 จะทำให้สาหร่ายในบ่อเลี้ยงปลาเจริญเติบโตได้ดี

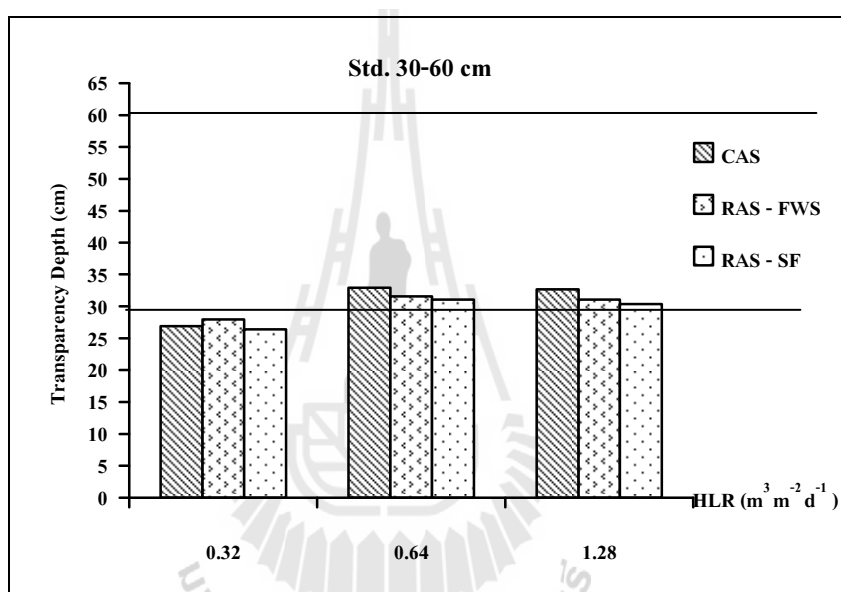


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า pH ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.4 ค่าการส่องผ่านของแสง (Transparency Depth)

ค่าเฉลี่ยการส่องผ่านของแสงในบ่อเลี้ยงปลาคอกกุ่มผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 26.89 27.95 และ 26.37 cm ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 32.91 31.56 และ 31.05 cm ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 32.67 31.07 และ 30.33 cm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่าการส่องผ่านของแสงมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐาน (30-60 cm; มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) และเมื่อนำข้อมูลของค่าการส่องผ่านของแสงของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) แต่ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) โดยค่าเฉลี่ยของการส่องผ่านของแสงในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS มีค่าสูงกว่าบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และเมื่อนำข้อมูลค่าการส่องผ่านของแสงของระบบ RAS แบบ FWS และแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่

ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าการส่องผ่านของแสงสูงที่สุด จะเห็นได้ว่าการส่องผ่านของแสงทั้ง 2 ระบบ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของน้ำดีขึ้น ทำให้แสงสามารถส่องผ่านไปในบ่อได้ลึกมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาของมันลิน ตันทุลเวสม์ และ ไพพรรณ พรประภา(2544) พบว่าการส่องผ่านของแสงที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 30-60 cm ถ้าค่าการส่องผ่านของแสงมีค่าน้อยกว่า 30 cm น้ำมีความขุ่นมาก ถ้าน้ำมีค่าการส่องผ่านของแสงมากกว่า 60 cm น้ำไม่มีความอุดมสมบูรณ์ไม่เหมาะต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

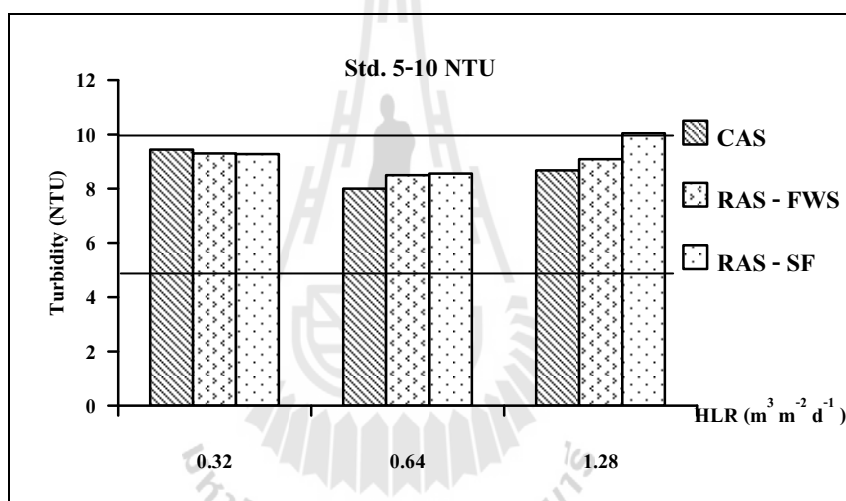


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.5 ค่าความขุ่น (Turbidity)

ค่าเฉลี่ยความขุ่นของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกกุ่มผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 9.44 9.30 และ 9.27 NTU ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 8.0 8.50 และ 8.56 NTU ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 8.76 9.08 และ 10.04 NTU ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.11 พบว่าผลค่าความขุ่นดังกล่าวมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (5-10 NTU; มันลิน ตันทุลเวสม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2544) เมื่อนำข้อมูลของค่าความขุ่นของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่

อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.1 ฉ.2 และ ฉ.3) เมื่อนำข้อมูลค่าความขุ่นของระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.4) จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าความขุ่นไม่แตกต่างกัน แม้เพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ จากการศึกษาของ Lawson (1995); Osman (2010) พบว่าความขุ่นในบ่อเลี้ยงปลาเกิดจากแพลงก์ตอนพืช เศษอาหารหรือตะกอนที่ปลาขับถ่ายออกมา ถ้าหากตะกอนในบ่อปลามาก ทำให้เข้าไปอุดตันเหงือกของปลาทำให้มีปัญหาในการลำเลียงออกซิเจน

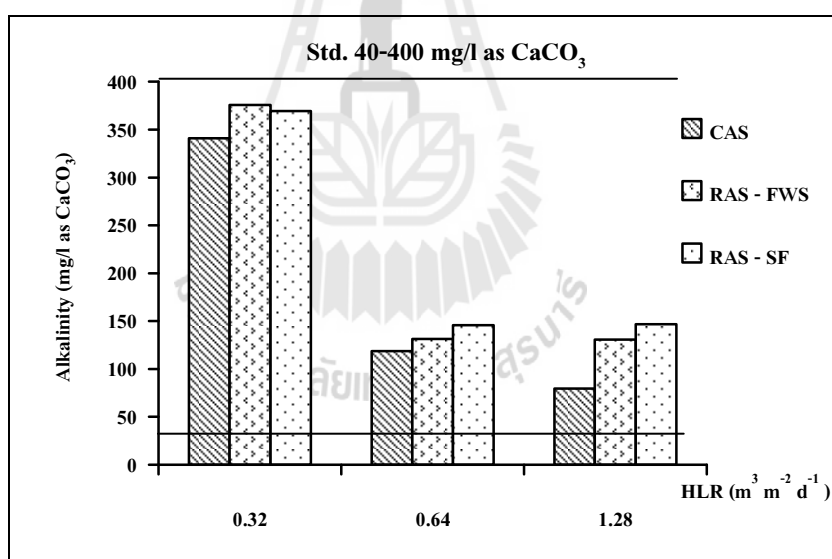


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความขุ่นของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.6 ค่าสภาพด่างของน้ำ (Alkalinity)

ค่าเฉลี่ยสภาพด่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาคูกลูกผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 341.06 375.61 และ 368.22 mg/l as CaCO_3 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 118.59 131.09 และ 145.73 mg/l as CaCO_3 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 79.4 130.06 และ 146.47 mg/l as CaCO_3 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.12 พบว่าผลค่าสภาพด่างของน้ำดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (40-400 mg/l as CaCO_3 ; Tucker and

Robinson, 1990; Meade, 1989) เมื่อนำข้อมูลของค่าสภาพต่างของน้ำของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) โดยระบบ RAS จะมีค่าสภาพต่างของน้ำสูงกว่าระบบ CAS และเมื่อนำข้อมูลค่าสภาพต่างของน้ำของระบบ RAS แบบ FWS และแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าสภาพต่างของน้ำน้อยที่สุด จากการศึกษาของ Lawson (1995) กล่าวว่าสภาพต่างของน้ำไม่ได้มีผลทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยตรง แต่ถ้าค่าสภาพต่างของน้ำน้อยกว่า 30 mg/l as CaCO_3 จะมีผลทำให้ pH ในแหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ปลาไม่สามารถปรับตัวได้ทันและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำค่าอื่น ๆ เช่น แอมโมเนียและค่าความเป็นกรด-ด่าง

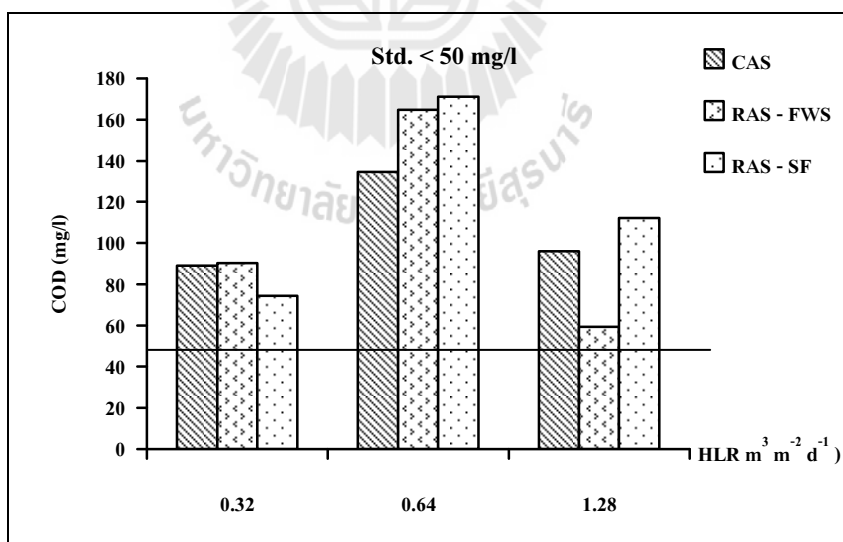


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.7 ค่า COD

ค่าเฉลี่ย COD ในบ่อเลี้ยงปลาดุกกลุ่มผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 89.00 90.18 และ 74.44 mg/l

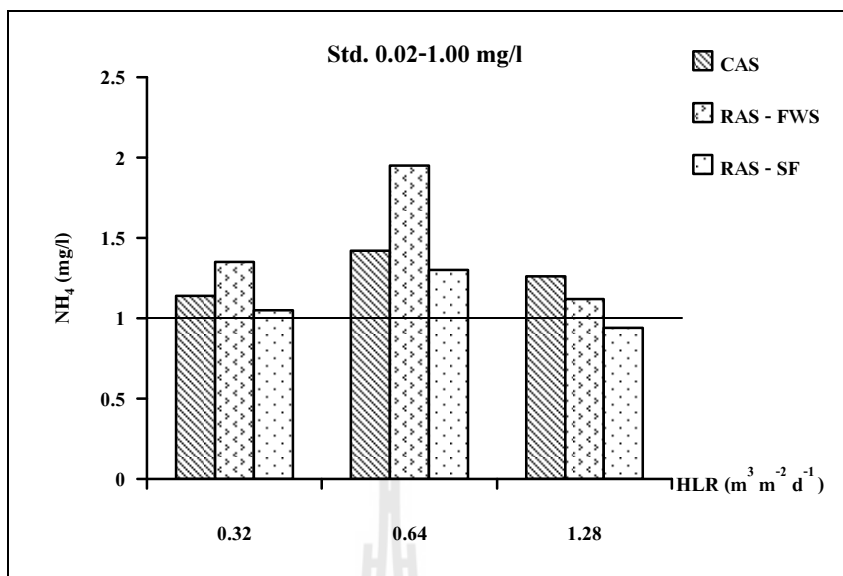
ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 134.64 164.73 และ 171.09 mg/l ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 95.93 59.27 และ 112.07 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.13 พบว่าผลค่า COD ดังกล่าวมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ($< 50 \text{ mg/l}$; Samudro, 2010) แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าคุณค่า COD ของระบบ RAS และ CAS มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำข้อมูลของคุณค่า COD ของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) แต่ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.1 ฉ.2 และ ฉ.3) โดยค่าเฉลี่ยของ COD ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS มีค่าสูงกว่าบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และเมื่อนำข้อมูลค่า COD ของระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.4) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่า COD น้อยที่สุด Samudro (2010) กล่าวว่าค่า COD ในบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าน้อยกว่า 50 mg/l เนื่องจากค่า COD จะส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลาทุกกลุ่ม



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบ COD ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.8 แอมโมเนีย (NH₄)

ค่าเฉลี่ยแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 m³ m⁻² d⁻¹ มีค่าเท่ากับ 1.14 1.35 และ 1.05 mg/l ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 m³ m⁻² d⁻¹ มีค่าเท่ากับ 1.42 1.95 และ 1.30 mg/l ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 m³ m⁻² d⁻¹ มีค่าเท่ากับ 1.26 1.12 และ 0.94 mg/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากรูปที่ 4.14 พบว่าผลค่าแอมโมเนียดังกล่าวมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน (0.02-1.00 mg/l; Meade, 1989) แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าแอมโมเนียของระบบ RAS และ CAS มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำข้อมูลของค่าแอมโมเนียของระบบ CAS และ RAS ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ 0.64 m³ m⁻² d⁻¹ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P > 0.05) แต่ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 m³ m⁻² d⁻¹ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P < 0.05) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.1 จ.2 และ จ.3) โดยค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS มีค่าสูงกว่าบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS และเมื่อนำข้อมูลค่าแอมโมเนียของระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกันมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P < 0.05) ดังแสดงในภาคผนวก จ. (ตารางที่ จ.4) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 m³ m⁻² d⁻¹ มีค่าแอมโมเนียน้อยที่สุด โดย Meade (1989) กล่าวว่าค่าแอมโมเนียที่พอเหมาะควรอยู่ในช่วง 0.02-1.00 mg/l เมื่อทำการเปรียบเทียบ pH และอุณหภูมิของน้ำในบ่อปลาที่ได้จากการศึกษากับตารางที่ 2.5 พบว่าค่าของแอมโมเนียในระบบควรมีค่าไม่เกิน 1.00 mg/l จึงจะไม่เป็นพิษต่อปลาคูกลูกผสม ดังนั้นจึงควรมีการควบคุม pH ไม่ให้เกิน 7.8 โดยการเติม alum เพื่อลด pH และปริมาณแพลงค์ตอนพืชในบ่อปลา (Tucker and Abramo, 2008)



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

4.3.9 สรุปผลคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลา

1) บ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกกุ่มผสมระบบ CAS และ RAS มีค่าคุณภาพน้ำ DO อุณหภูมิ pH ความโปร่งใสของน้ำ ความขุ่น และความเค็มของน้ำ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเพาะเลี้ยงปลา ยกเว้นค่า COD และแอมโมเนีย ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากมีปริมาณเศษอาหารและการขับถ่ายของเสียของปลาดุกกุ่มผสม จึงมีผลทำให้ค่า COD และความเข้มข้นแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงปลาดุกกุ่มผสมมีค่าเกินมาตรฐาน

2) เมื่อเปรียบเทียบค่าคุณภาพน้ำของบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกกุ่มผสมระหว่างระบบ CAS และ RAS พบว่าค่า DO อุณหภูมิ และความขุ่น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่พบว่าค่า pH ความโปร่งใสของน้ำ สภาพค่างของน้ำ COD และแอมโมเนียของระบบ CAS และ RAS มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 m³ m⁻² d⁻¹ จะมีค่า pH ความโปร่งใสของน้ำ และ COD ของระบบ CAS ต่ำกว่าระบบ RAS ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 m³ m⁻² d⁻¹ จะมีค่าแอมโมเนียของระบบ CAS ต่ำกว่าระบบ RAS และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ ค่าสภาพค่างของน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาของระบบ CAS มีค่าต่ำกว่าระบบ RAS เนื่องจากค่าคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกกุ่มผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยการกินอาหาร การขับถ่ายและ

สำหรับในบ่อปลา ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าโดยรวมคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมแบบ CAS และ RAS มีค่าคุณภาพน้ำใกล้เคียงกัน

4.4 ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในบ่อซีเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบค่าผลผลิตของปลาดุกลูกผสมระหว่างระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ในแต่ละอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ ผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 ค่าน้ำหนักปลาดุกลูกผสม

ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ พบว่าปลาดุกลูกผสมมีค่าน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 23.30 24.27 และ 22.75 กรัม ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 39.00 38.84 และ 38.78 กรัม ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 23.34 21.97 และ 21.97 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผล การศึกษาน้ำหนักของปลาดุกลูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละน้ำหนักระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชล ศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) โดยร้อยละค่าน้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกลูกผสมของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จากการศึกษาของจิตติมา หมั่นกิจ และคณะ (2550) พบว่าการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในบ่อซีเมนต์ที่ใช้ น้ำสะอาดเลี้ยง เป็นเวลา 1 เดือน มีค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ประมาณ 16.21 กรัมต่อตัว

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยผลผลิตของปลาอุกถูกผสมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ (mean±S.D.)

ผลผลิต	HLR 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 12)			HLR 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 12)			HLR 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n = 12)		
	CAS	RAS-FWS	RAS-SF	CAS	RAS-FWS	RAS-SF	CAS	RAS-FWS	RAS-SF
น้ำหนัก (g)	23.30±2.41	24.27±2.70	22.75±1.72	39.00±2.01	38.84±1.09	38.74±2.74	23.34±1.15	21.97±0.97	21.97±1.06
ความยาว (cm)	13.98±1.33	14.03±1.12	14.14±1.18	16.89±0.66	16.86±0.71	16.93±0.72	16.15±1.38	15.93±1.10	15.83±1.36
ADG ¹ (g/d)	0.25±0.06	0.27±0.05	0.23±0.05	0.48±0.53	0.48±0.55	0.48±0.53	0.26±0.03	0.25±0.02	0.25±0.03
Weight gain ² (%)	100±37.65	102±26.12	93±28.85	141±34.84	140±31.39	139±28.67	106±13.68	104±12.87	104±14.69
SGR ³ (%/d)	1.50± 0.42	1.55±0.28	1.44±0.34	1.85±0.31	1.84±0.29	1.84±0.26	1.60±0.15	1.58±0.14	1.58±0.16
FCR ⁴	0.72±0.20	0.63±0.12	0.75±0.17	0.54±0.06	0.55±0.08	0.55±0.09	0.45±0.05	0.46±0.05	0.46±0.06
Survival rate (%)	100±0.00	100±0.00	99.25±1.06	100±0.00	100±0.00	98.75±1.77	100±0.00	100±0.00	100±0.00

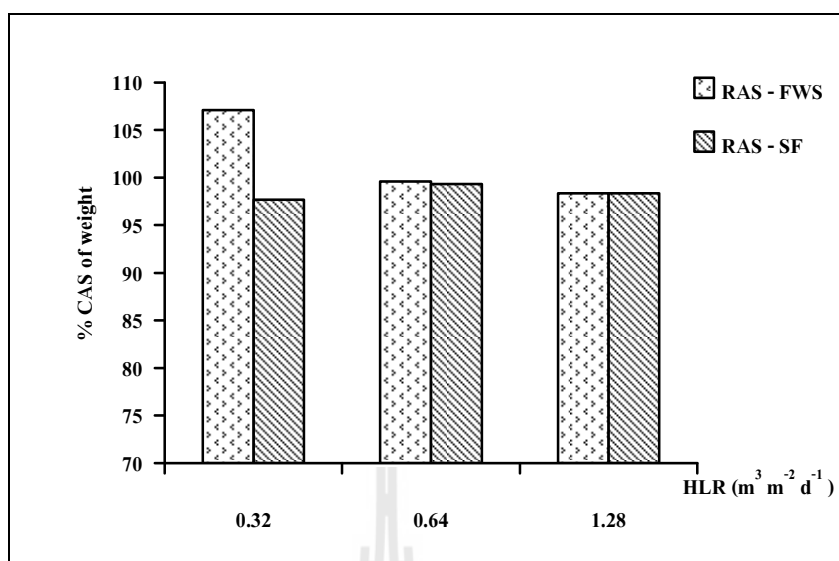
หมายเหตุ : ¹ น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน

² เปอร์เซนต์น้ำหนักเพิ่ม

³ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

⁴ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

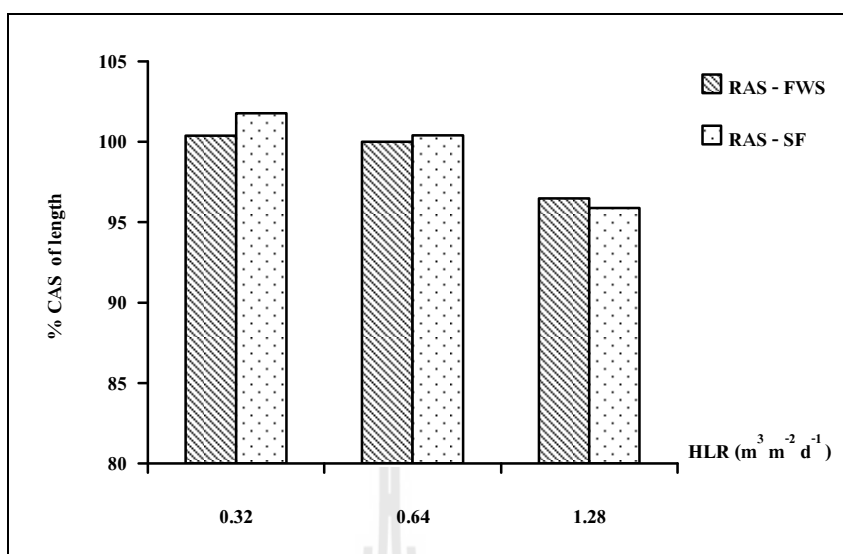




รูปที่ 4.15 ร้อยละน้ำหนักของปลาตุ๊กตูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.2 ค่าความยาวปลาตุ๊กตูกผสม

ค่าความยาวเฉลี่ยของปลาตุ๊กตูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าความยาวเฉลี่ยของปลาตุ๊กตูกผสมเท่ากับ 13.98 14.03 และ 14.14 cm ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 16.80 16.86 และ 16.93 cm ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 16.15 15.93 และ 15.83 cm ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาน้ำหนักของปลาตุ๊กตูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละความยาวระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยค่าความยาวของระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าความยาวเฉลี่ยสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS สำหรับอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ CAS และ RAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) และแสดงในรูป 4.16 จากการศึกษาของ จิตติมา หมั่นกิจ และคณะ (2550) พบว่าการเพาะเลี้ยงปลาตุ๊กตูกผสมในบ่อซีเมนต์ที่ใช้น้ำสะอาดเลี้ยง เป็นเวลา 1 เดือน มีค่าความยาวเฉลี่ยประมาณ 11.90 cm

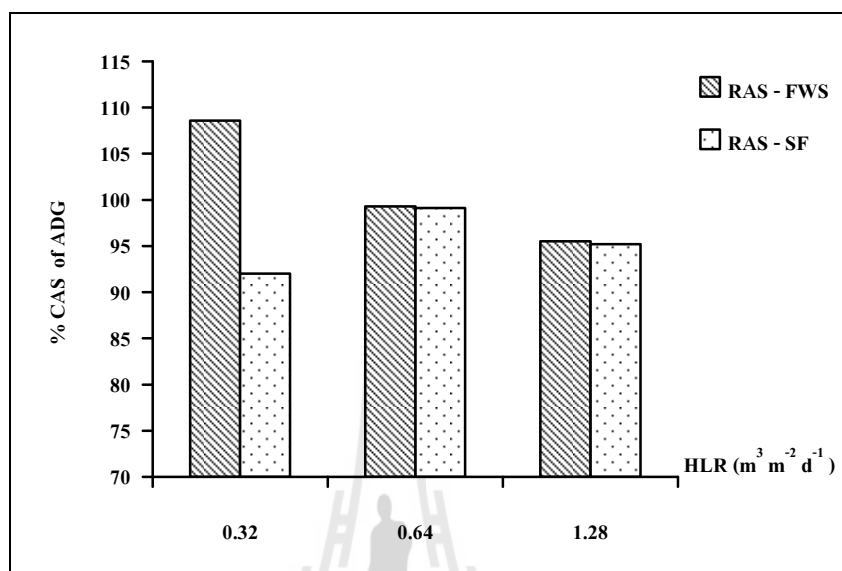


รูปที่ 4.16 ร้อยละความยาวของปลาคูกูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.3 ค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกูกผสม (ADG)

ค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกูกูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกูกูกผสมเท่ากับ 0.25 0.27 และ 0.23 g/d ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.48 0.48 และ 0.48 g/d ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.26 0.25 และ 0.25 g/d ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกูกูกูกผสมมาเปรียบเทียบกับร้อยละน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันมากกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากการศึกษาของ Amin et al. (2010) พบว่าค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกูกูกูกผสมมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.42

ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าการศึกษาของ Amin et al. (2010)

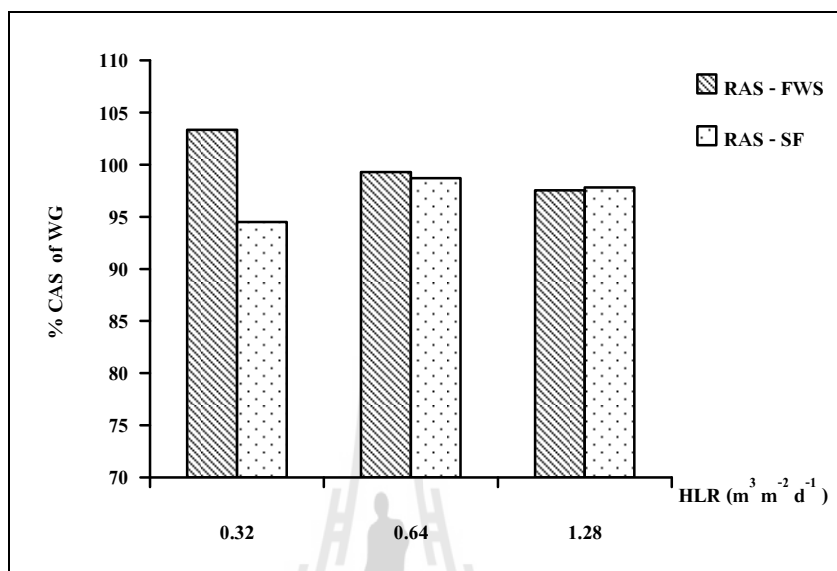


รูปที่ 4.17 ร้อยละน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคูกลูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.4 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคูกลูกผสม (Weight gain)

ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคูกลูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มเท่ากับ 100 102 และ 93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มเท่ากับ 141 140 และ 139 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มเท่ากับ 106 104 และ 104 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคูกลูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) โดยค่าแสดงในรูป 4.18 จากการศึกษาของ Zheung et al. (2010) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคูกลูกผสมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 102.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ใน

อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคุณ
 ลูกผสมสูงกว่าการศึกษาของ Zheung et al. (2010)

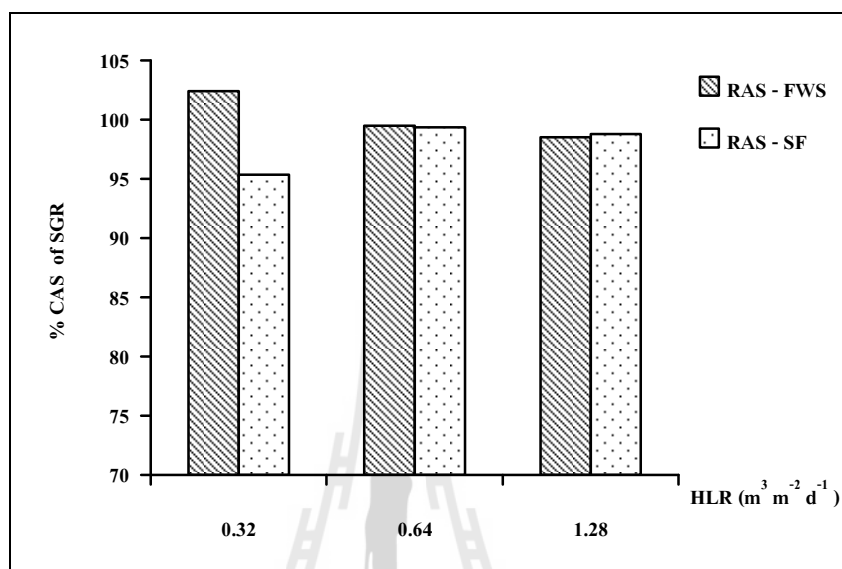


รูปที่ 4.18 ร้อยละเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคูกผสมระหว่างระบบ RAS
 แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.5 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคูกผสม (SGR)

ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้ง
 แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเจริญเติบโต
 จำเพาะเท่ากับ 1.50 1.55 และ 1.44 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์
 0.64 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 1.85 1.84 และ 1.84 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน
 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ
 เท่ากับ 1.60 1.58 และ 1.58 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราการ
 เจริญเติบโตจำเพาะของปลาคูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะระหว่าง
 ระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความ
 แตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี
 นัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) โดย
 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคูกผสมระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีแนวโน้มเพิ่ม
 สูงขึ้นเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากการศึกษาของ Metwally

and Fouad (2009) พบว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาดุกลูกผสมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.58 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาดุกลูกผสมสูงกว่าการศึกษาของ Metwally and Fouad (2009)

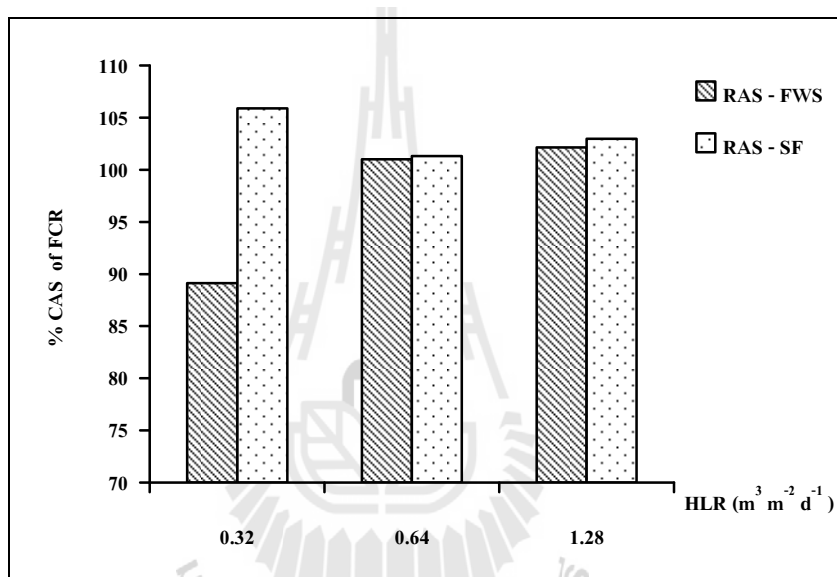


รูปที่ 4.19 ร้อยละอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาดุกลูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.6 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสม (FCR)

ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 0.72 0.63 และ 0.75 ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 0.54 0.55 และ 0.55 ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 0.45 0.46 และ 0.46 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมาทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64

และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) โดยค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากการศึกษาของ Amin et al. (2010) พบว่าค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.15 ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมสูงกว่าการศึกษาของ Amin et al. (2010)

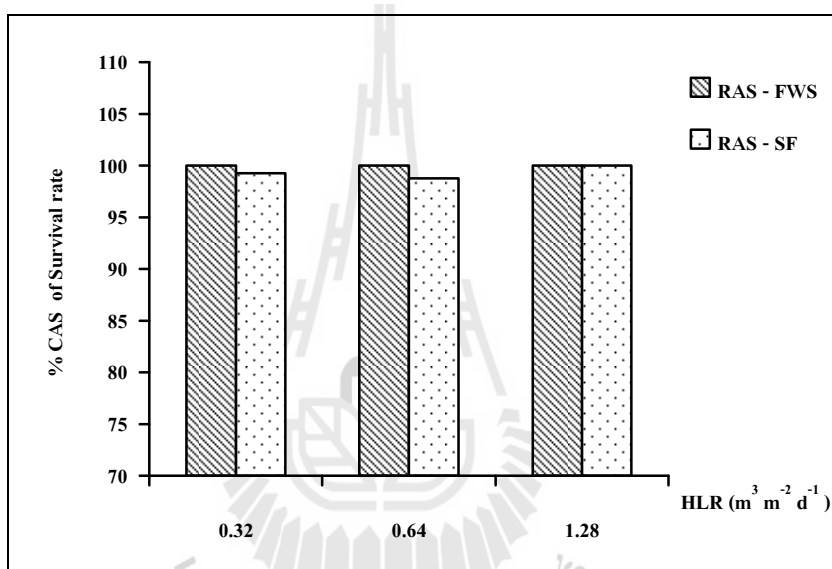


รูปที่ 4.20 ร้อยละอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกลูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.7 อัตราการรอดตายของปลาดุกลูกผสม (Survival rate)

ค่าอัตราการรอดตายของปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS ระบบ RAS ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าอัตราการรอดตายเท่ากับ 100 100 และ 99.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าอัตราการรอดตายเท่ากับ 100 100 และ 98.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าอัตราการรอดตายเท่ากับ 100 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราการรอดตายของปลาดุกลูกผสมมาเปรียบเทียบร้อยละอัตราการรอดตายระหว่างระบบ RAS-FWS และ RAS-SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกันมา

ทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test พบว่าร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 (ภาคผนวก ข.) จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่ออัตราการรอดตายของปลาคุณลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จากการศึกษาของ Zheung et al. (2010) พบว่าอัตราการรอดตายของปลาคุณลักษณะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 95.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ มีค่าอัตราการรอดตายของปลาคุณลักษณะสูงกว่าการศึกษาของ Zheung et al. (2010)



รูปที่ 4.21 ร้อยละอัตราการรอดตายของปลาคุณลักษณะระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.4.8 สรุปผลผลิตของปลาคุณลักษณะ

เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของปลาคุณลักษณะโดยร้อยละของระบบ RAS แบบ FWS และ SF เทียบกับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกัน พบว่าร้อยละอัตราส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตาย ระหว่างระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS และระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าน้ำหนัก และน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีค่าสูงกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ในขณะที่ค่าความยาว และอัตราการ

เปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมที่ได้จากการทดลอง พบว่าคุณภาพน้ำในระบบ CAS และ RAS มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาอุกผสม จึงทำให้ค่าผลผลิตของปลาอุกผสมโดยรวมของทั้ง 2 ระบบ มีค่าใกล้เคียงกัน

4.5 สุขภาพของปลาอุกผสม

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมในบ่อซีเมนต์ และทำการเปรียบเทียบค่าทางโลหิตวิทยา ซึ่งบ่งบอกถึงค่าสุขภาพปลาอุกผสมระหว่างระบบ CAS และระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าฮีโมโกลบินและค่าฮีมาโตคริตของปลาอุกผสมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ (mean±S.D.) (n = 12)

HLR (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	ฮีโมโกลบิน (g/dl)	ฮีมาโตคริต (%)
งานวิจัย ¹		6-11.09	14-39.70
0.32	CAS	8.37±1.82	26.58±4.94
	RAS-FWS	9.95±1.77	29.33±4.33
	RAS-SF	9.17±1.75	28.25±5.43
0.64	CAS	9.53±1.20	28.88±5.43
	RAS-FWS	11.02±1.39	33.38±3.50
	RAS-SF	10.65±1.94	33.04±5.77
1.28	CAS	6.28±1.56	17.70±5.79
	RAS-FWS	6.69±2.20	21.22±6.57
	RAS-SF	8.00±1.25	24.79±3.68

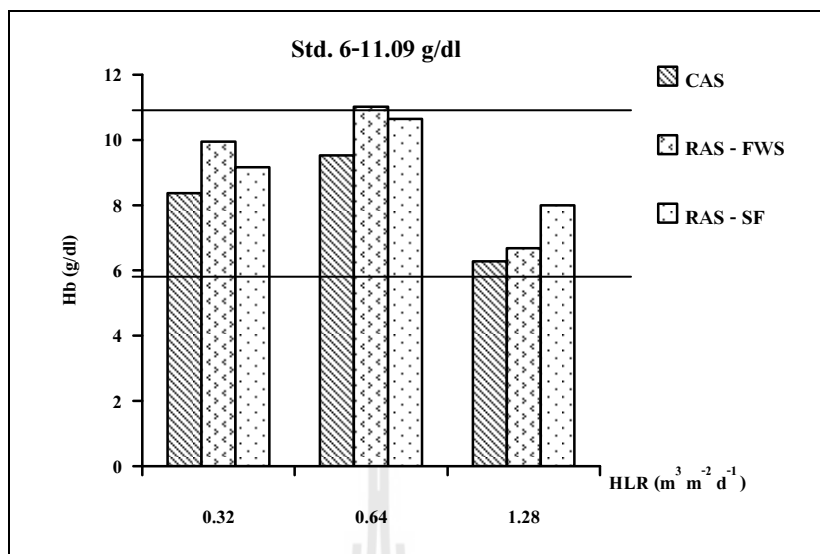
หมายเหตุ : ¹ ส่องศรี มหาสวัสดิ์ (2532); Mahasawasde (1989); Supamattaya et al. (2005);

Oluyemi et al. (2008); Ahmadifar et al.(2009);

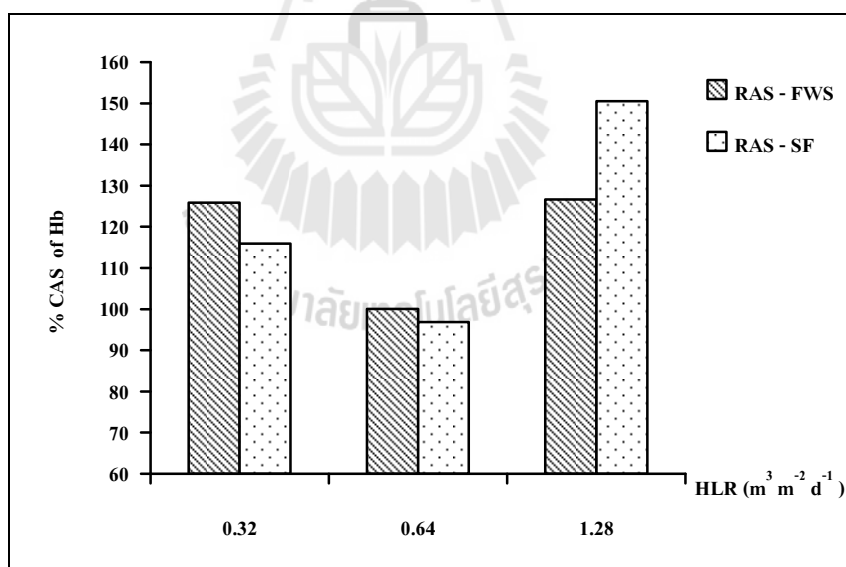
Metwally and Fouad (2009); Sabri et al. (2009)

4.5.1 ค่าฮีโมโกลบิน (Hb)

ค่าเฉลี่ยฮีโมโกลบินของปลาอุกถูกผสมในระบบการเพาะเลี้ยงแบบ CAS เปรียบเทียบกับระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีโมโกลบินเท่ากับ 8.37 9.95 และ 9.17 g/dl ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีโมโกลบินเท่ากับ 9.95 11.02 และ 10.65 g/dl ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีโมโกลบินเท่ากับ 6.28 6.69 และ 8.00 g/dl ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) และจากรูปที่ 4.22 พบว่าค่าฮีโมโกลบินดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (6-11.09; สنجศรี มหาสวัสดิ์, 2532; Mahasawasde, 1989; Supamattaya et al., 2005; Oluyemi et al., 2008; Ahmadifar et al., 2009; Sabri et al., 2009; Metwally and Fouad, 2009) และเมื่อนำข้อมูลของค่าฮีโมโกลบินมาเปรียบเทียบร้อยละระหว่าง RAS แบบ FWS และ SF กับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกัน มาทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าค่าฮีโมโกลบินที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีโมโกลบินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS ดังแสดงในรูปที่ 4.23 แต่ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ซ. (ตารางที่ ซ.1 ซ.2 และ ซ.3) จากการศึกษาของ Mlay et al. (2007) พบว่าค่าฮีโมโกลบินมีผลต่อการไหลเวียนของเลือดและการขนส่งออกซิเจนของปลา หากค่าอุณหภูมิและคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฮีโมโกลบินเพิ่มขึ้นและหากค่า pH และออกซิเจนในน้ำลดลงจะทำให้ค่าฮีโมโกลบินลดลงตามไปด้วย



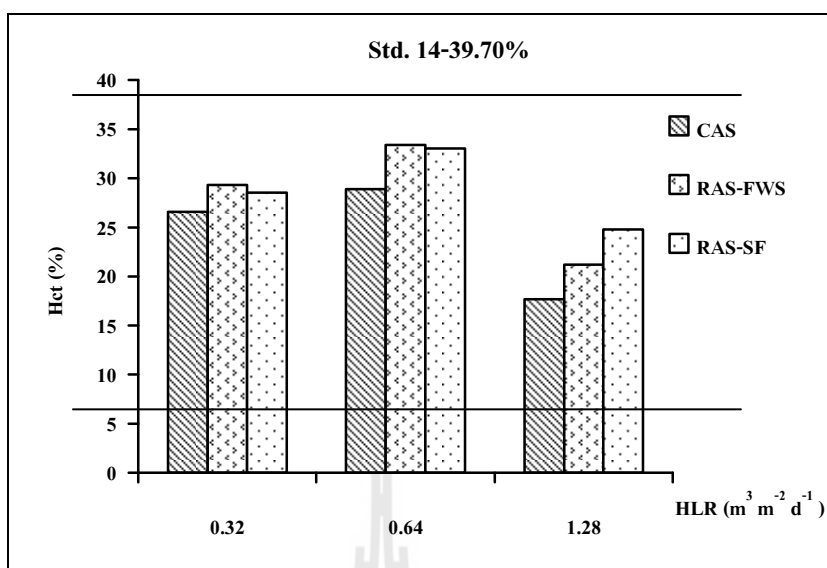
รูปที่ 4.22 ค่าฮีโมโกลบินของปลาตุ๊กตาสวมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างๆ



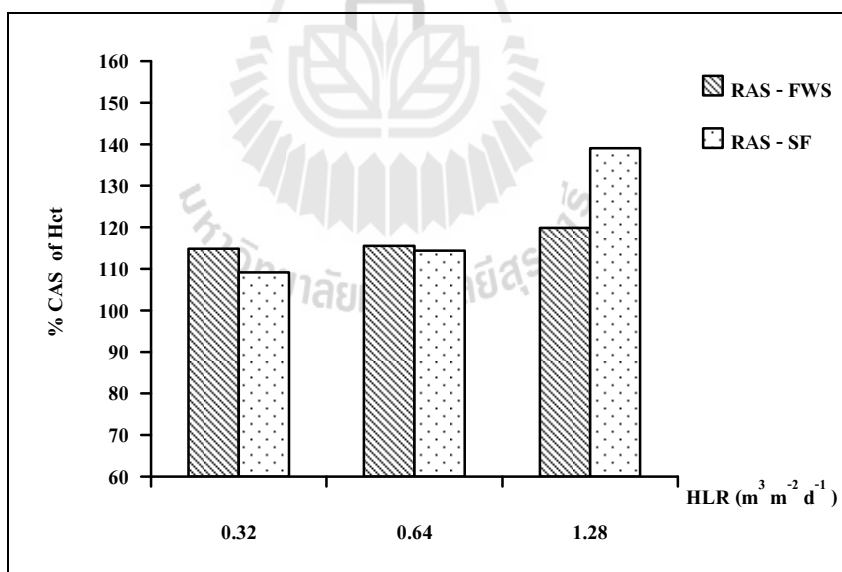
รูปที่ 4.23 ร้อยละฮีโมโกลบินของปลาตุ๊กตาสวมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.5.2 ค่าฮีมาโตคริต (Hct)

ค่าเฉลี่ยฮีมาโตคริตของปลาดุกลูกผสมในระบบการเพาะเลี้ยงแบบ CAS เปรียบเทียบกับระบบ RAS แบบ FWS และ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีมาโตคริตเท่ากับ 26.58 29.33 และ 28.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีมาโตคริตเท่ากับ 28.88 33.38 และ 33.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีมาโตคริตเท่ากับ 17.70 21.22 และ 24.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) และจากรูปที่ 4.24 พบว่าค่าฮีมาโตคริตดังกล่าวมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (14-39.70; ส่องศรี มหาสวัสดิ์, 2532; Mahasawasde, 1989; Supamattaya et al., 2005; Oluyemi et al., 2008; Ahmadifar et al., 2009; Sabri et al., 2009; Metwally and Fouad, 2009) และเมื่อนำข้อมูลของค่าฮีมาโตคริตของปลาดุกลูกผสมมาเปรียบเทียบกับร้อยละระหว่าง RAS แบบ FWS และ SF กับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกัน มาทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Paired Test พบว่าค่าฮีมาโตคริตที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าฮีโมโกลบินไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.1 ข.2 และ ข.3) ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละของระบบ RAS ต่อระบบ CAS แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีมาโตคริตสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ค่าฮีมาโตคริตในระบบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากการศึกษาของ กำมัชพล ภูริพงษ์ (2550) พบว่าความเครียดจากการถูกจับของปลาและการอยู่ในสถานะที่มีค่าออกซิเจนต่ำมีผลทำให้ค่าฮีมาโตคริตเพิ่มขึ้น สำหรับค่าฮีมาโตคริตที่ลดลงอาจเนื่องจากการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินลดลงจึงมีผลทำให้เกิดสถานะเลือดจาง



รูปที่ 4.24 ค่าสีมาโตคริตของปลาคุกลูกผสมในระบบ CAS RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 4.25 ร้อยละสีมาโตคริตของปลาคุกลูกผสมระหว่างระบบ RAS แบบ FWS และ SF กับ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างกัน

4.5.3 สรุปผลสุขภาพของปลาคุณกผสม

1) เมื่อเปรียบเทียบสุขภาพของปลาคุณกผสมระหว่างระบบ CAS และระบบ RAS พบว่าค่าสุขภาพของปลาคุณกผสมมีค่าฮีโมโกลบินและค่าฮีมาโตคริต อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเพาะเลี้ยงปลา เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าอยู่ในเกณฑ์การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปลาคุณกผสม

2) เมื่อเปรียบเทียบค่าสุขภาพของปลาคุณกผสมโดยร้อยละของระบบ RAS แบบ FWS และ SF เทียบกับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำเดียวกันพบว่าค่าฮีโมโกลบินที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละอัตราส่วนของระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS จะมีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS สำหรับค่าฮีมาโตคริตที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีมาโตคริตสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS ความเครียดจากการถูกจับของปลาคุณกผสมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าฮีโมโกลบินและฮีมาโตคริต

4.6 การหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์

ในการศึกษาการหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิใด ๆ (K_T) และค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 20°C (K_{20}) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และแบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เปรียบเทียบกับค่าจากห้องปฏิบัติการ และ U.S.EPA (รายละเอียดการหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์แสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.1 ถึง ฉ.6) ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิใด ๆ (K_T) จากข้อมูลการเดินระบบในภาคสนามของระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 0.303 0.758 และ 1.438 ต่อวัน ตามลำดับ และระบบ RAS-SF มีค่าเท่ากับ 0.802 1.834 และ 3.406 ต่อวัน ตามลำดับ จากข้อมูลค่า K_T นำมาคำนวณหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 20°C (K_{20}) ของทั้ง 2 ระบบ พบว่าระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำ 0.32 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 0.168 0.508 และ 0.964 ต่อวัน ตามลำดับ และระบบ RAS-SF มีค่าเท่ากับ

0.538 1.229 และ 2.283 ต่อวัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบ RAS-SF จะมีค่ามากกว่าระบบ RAS-FWS ประมาณ 2.37-2.65 เท่า และเมื่ออัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของทั้ง 2 ระบบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อนำค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการเดินระบบในภาคสนามมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของ U.S.EPA (2000) พบว่าค่า K_{20} และค่า K_T (ที่อุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 26.87°C) ของระบบ FWS มีค่าเท่ากับ 0.501 และ 0.747 ต่อวัน ตามลำดับ และระบบ SF มีค่าเท่ากับ 1.104 และ 1.647 ต่อวัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบ RAS-FWS และระบบ RAS-SF ในภาคสนามที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ จะมีค่าสูงกว่าค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ของ U.S.EPA ผลค่าคงที่ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการนำน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาดุกผสมไปวัดค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอยู่ในสภาวะที่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิได้ โดยค่า K_{20} และ K_T ที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 0.510 และ 0.761 ต่อวัน ตามลำดับ แสดงว่าลักษณะน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี จากผลการศึกษาของ Zachritz et al. (2008) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาชนิดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.84 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ และมีระยะเวลาเก็บกัก 3.23 ชั่วโมง พบว่าค่า K_T ของระบบมีค่าเท่ากับ 0.614 ต่อวัน นอกจากนี้ U.S.EPA (2000) กล่าวว่าระบบบ่อฝิ่งมีค่า K_{20} เท่ากับ 0.117 ต่อวัน เมื่อนำผลที่ได้ทำการศึกษาครั้งนี้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้นพบค่า K_T ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่ได้จะมีค่าสูงกว่า ดังนั้นจากผลการศึกษาจะเห็นว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ระบบ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากกว่าระบบบ่อฝิ่ง และเมื่อนำไปใช้ในการคำนวณพื้นที่ในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีค่าลดลงด้วย

ตารางที่ 4.6 ค่า K_T และ K_{20} ในระบบ RAS-FWS RAS-SF และค่าจากห้องปฏิบัติการ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

HLR ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	K_T (d^{-1})		K_{20} (d^{-1})	
	RAS-FWS	RAS-SF	RAS-FWS	RAS-SF
0.32	0.303	0.802	0.168	0.538
0.64	0.758	1.834	0.508	1.229
1.28	1.438	3.406	0.964	2.283
ห้องปฏิบัติการ	0.761		0.510	
U.S.EPA	0.747	1.647	0.501	1.104

หมายเหตุ : K_T คัดที่อุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 26.87°C

4.7 การประเมินหาพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในการศึกษาการประเมินหาพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ เปรียบเทียบกับ U.S.EPA (รายละเอียดการประเมินหาพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แสดงในภาคผนวก ฉ. (ตารางที่ ฉ.1 ถึง ฉ.6) ผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 การประเมินการใช้พื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SFW และ RAS-SF เปรียบเทียบกับ U.S.EPA

HLR ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	ผลการศึกษา	พื้นที่ (m^2)	
		RAS-FWS	RAS-SF
0.32	งานวิจัยครั้งนี้	11.86	2
	U.S.EPA	6.25	1.26
0.64	งานวิจัยครั้งนี้	10	1.85
	U.S.EPA	12.49	2.52
1.28	งานวิจัยครั้งนี้	9.71	1.81
	U.S.EPA	24.89	5.04

การประเมินพื้นที่เพื่อใช้ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 11.86 10.00 และ 9.71 m^2 ตามลำดับ และแบบ RAS-SF มีค่าเท่ากับ 2.00 1.85 และ 1.81 m^2 ตามลำดับ จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS ทั้ง 2 ระบบ เมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงขึ้น จะสามารถลดพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ และระบบ RAS-SF มีขนาดการใช้พื้นที่น้อยกว่าระบบ RAS-FWS ประมาณ 5 เท่า และเมื่อนำพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่ที่ U.S.EPA แนะนำให้ใช้สำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ มีขนาดของพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์น้อยกว่าของ U.S.EPA สำหรับระบบ RAS-FWS เท่ากับ 1.25 และ 2.56 เท่า ตามลำดับ และระบบ RAS-SF เท่ากับ 1.36 และ 2.78 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้พื้นที่ที่เหมาะสมในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มากที่สุดคือ ขนาดพื้นที่ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ โดยนำผลการศึกษารื่องประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คุณภาพน้ำที่ได้ผลผลิตและสุขภาพของปลาตุ๊กตาสมาพิจารณาพร้อมในการตัดสินใจ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสม สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 *ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย* ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสม โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมได้ สามารถสรุปผลการศึกษาในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ดังต่อไปนี้

5.1.1.1 ระบบ RAS-FWS มีประสิทธิภาพในการกำจัด TKN สูงกว่าระบบ RAS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระบบ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการกำจัด TP สูงกว่าระบบ RAS-FWS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ TSS ของทั้ง 2 ระบบ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

5.1.1.2 เมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด COD TSS และ TP แต่จะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด TKN ของทั้งระบบ RAS-FWS และ RAS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ของระบบ RAS-FWS และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ของระบบ RAS-SF มีค่าประสิทธิภาพการบำบัด TKN สูงสุด

5.1.2 *คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์* แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ระดับ มีค่า COD TSS TP แอมโมเนีย ไนโตรท์ และไนเตรท มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำไปเพาะเลี้ยงปลาจุกผสม ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF สามารถหมุนเวียนกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาจุกผสมได้

5.1.3 คุณภาพน้ำในบ่อปลา

5.1.3.1 ค่าคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาคุณภาพผสมของทั้งระบบ CAS และ RAS ได้แก่ ค่า DO อุณหภูมิ pH ความโปร่งใสของน้ำ ความขุ่น และความเป็นด่างของน้ำ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเพาะเลี้ยงปลา ยกเว้นค่าคุณภาพน้ำ COD และแอมโมเนีย ของทั้งระบบ CAS และ RAS พบว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐาน

5.1.3.2 เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างระบบ CAS และ RAS พบว่าค่า DO อุณหภูมิ และความขุ่น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้น pH ความโปร่งใสของน้ำ COD และแอมโมเนีย พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.1.4 ผลผลิตของปลาคุณภาพผสม

5.1.4.1 เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของปลาคุณภาพผสมโดยร้อยละของระบบ RAS แบบ FWS และ SF เทียบกับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เดียวกัน พบว่าร้อยละอัตราส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตายระหว่างระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS และระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าน้ำหนัก และน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS มีค่าสูงกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ในขณะที่ค่าความยาวและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS

5.1.5 สุขภาพของปลาคุณภาพผสม

5.1.5.1 เมื่อเปรียบเทียบสุขภาพของปลาคุณภาพผสมระหว่างระบบ CAS และระบบ RAS พบว่าค่าสุขภาพของปลาคุณภาพผสมมีค่าฮีโมโกลบินและค่าฮีมาโตคริต อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเพาะเลี้ยงปลา

5.1.5.2 เมื่อเปรียบเทียบค่าสุขภาพของปลาคุณภาพผสมโดยร้อยละของระบบ RAS แบบ FWS และ SF เทียบกับระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำเดียวกันพบว่าค่าฮีโมโกลบินที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ร้อยละอัตราส่วนของระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS จะ มีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีโมโกลบินสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS สำหรับค่าฮีมาโตคริตที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.32 และ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนที่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ระบบ RAS-SF ต่อระบบ CAS มีค่าฮีมาโทคริตสูงกว่าระบบ RAS-FWS ต่อระบบ CAS

5.1.6 ค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบ RAS-FWS และระบบ RAS-SF ในภาคสนามที่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ มีค่าสูงกว่าค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งใช้โดยทั่วไป อีกทั้งมีค่าค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์มากกว่าระบบบ่อฝิ่ง และเมื่อนำไปใช้ในการคำนวณพื้นที่ในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีผลทำให้พื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างลดลงด้วย

5.1.7 การประเมินพื้นที่ของระบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.64 และ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ พบว่ามีขนาดพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์น้อยกว่าพื้นที่ที่ได้จากค่าที่ใช้โดยทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเลือกใช้ควรนำผลการศึกษารื่องประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คุณภาพน้ำที่ได้ ผลผลิต และสุขภาพของปลาคุณลักษณะมาประกอบร่วมในการพิจารณาตัดสินใจด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ในการกำจัด COD TSS และ TP มีค่าประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน แต่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาที่อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์มากกว่า $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ เพื่อนำไปหาค่าที่เหมาะสมได้มากขึ้น

5.2.2 จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ขณะที่ระบบ RAS-SF มีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคูกลุผสม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น

5.2.3 ควรมีการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและมีการหมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในระดับผลผลิตเพื่อการค้า เพื่อประเมินความคุ้มค่า และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ และ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. (2548). การศึกษาโครงการพัฒนาแนวทางด้านเทคนิคและสาธิตระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_water.cfm
- กรมประมง. (2548). ปริมาณและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั่วประเทศ จำแนกตามชนิด ปี 2546-2548. [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.fisheries.go.th/fish>
- กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ. (2544). การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กฤตธี วงศ์สถิตย์. (2544). การบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมการจัดการน้ำเสีย. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: เอส. อาร์. พรินติ้ง แมสโปรดักส์.
- ก้ามชพล ภูริพงษ์. (2550). พยาธิสภาพของเนื้อเยื่อและโลหิตวิทยาของปลาบางชนิดในแม่น้ำโขง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิตติมา หมั่นกิจ จิตรา อาจิมกิจ และ วิไลลักษณ์ สิทธิสังข์. (2550). การศึกษาผลของ EM ต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกบักอูยที่เลี้ยงในบ่อซีเมนต์. แผนกวิชาประมง วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีศรีสะเกษ.
- จรรยา พุกกะเวส และ เสาวนิตย์ ทิพย์เสวก. (2531). การศึกษาค่าโลหิตวิทยาของปลาน้ำจืดที่ติดเชื้อแอโรโมนาส ไฮโดรฟีลา. ว.เกษตรศาสตร์ 22 : 110-115.
- เดชา นาวานุเคราะห์ และ ชลิต อินทร์ตัน. (2543). การศึกษาการเจริญเติบโตของปลาดุกอูยที่เลี้ยงในบ่อคอนกรีตกลมด้วยอัตราการปล่อยที่ต่างกัน. รายงานวิจัย สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพิษณุโลก.
- ถาวร ทันใจ. (2551). การเจริญเติบโตของปลาดุกกลมผสมภายใต้สภาพการควบคุมอุณหภูมิและการเลี้ยงในสภาพแวดล้อมปกติ. ประชุมวิชาการประมง. กรมการประมง. กรุงเทพมหานคร.

- บัญญัติ ศิริชนาวงศ์ สุพิศ ทองรอด ทิวต์ถ์ มณีโชติ และ ละอองทิพย์ มัทธูรศ. (2551). การศึกษาความหนาแน่นและความถี่ในการให้อาหารปลาดุกทะเล (*Plotosus canius*) ที่เลี้ยงในกระชัง. วารสารวิจัย ราชภัฏพระนคร.
- ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2551). เรื่อง กำหนดให้บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 21ง. ประเทือง เชาวรัชกลาง. (2534). คุณภาพน้ำทางการประมง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- พิจิตร ชโยปลัมภ์. (2544). การปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พรวิรัช ลำเจียกเทศ. (2548). เทคนิคพื้นฐานทางโลหิตวิทยา (Basic Hematological Techniques) ภาควิชาจุลทรรศน์ศาสตร์คลินิก คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2540). คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. (2544). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ มันรัช ตันฑุลเวศม์. (2547). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มงคล ปรีมผล. (2533). การศึกษาสาเหตุและการป้องกันโรคในปลาดุกอูย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การประมง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ขงยุทธ์ เคนคำภา. (2549). หลักสูตรท้องถิ่นเรื่อง ปลาดุกเงินล้าน. [ออนไลน์]. ได้จาก : 202.143.137.100/kruyongyut/fff6.pdf
- รักพงษ์ เพชรคำ และ ไชยณรงค์ นาวานุเคราะห์. (2540). ผลของความเค็มต่อดัชนีทางโลหิตบางชนิดของปลาดุกอูย (*Clarias macrophalus*). รายงานการวิจัย ภาควิชาประมง ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. (2548). การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุธามาศ ช้อยสุวรรณ. (2543). กายวิภาคเปรียบเทียบของปลาอุกอูย (*Claris macrocephalus* Gunther) ปลาอุกรัสเชีย (*Claris gariepinus*) และปลาอุกบิกอูย (*Claris macrocephalus* x *C. gariepinus*). วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสัตววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาพร สุกรีเหลือง. (2538). การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท พิมพ์ดี จำกัด.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. (2548). วิศวกรรมปลา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- ส่งศรี มหาสวัสดิ์. (2532). ผลของเกลือแกงที่มีต่อค่าโลหิตวิทยาและปริมาณพลาสมาอิเล็กโทรไลต์ในปลาอุก. วารสารเกษตรศาสตร์ 23 : 172-177.
- วิกรม เจตนาวิชัย สุชีรา สุขศิลป์ชัย อาภาพร เพียรรุ่งโรจน์ จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์ สุขประดิษฐ์ หวังในธรรม และ อัจฉริยา ไสละสูต. (2549). การศึกษาค่าทางโลหิตวิทยา เคมีคลินิกและพยาธิวิทยาของปลาอุกบิกอูยที่แสดงอาการดีซ่าน. การประชุมวิชาการทางสัตวแพทย์และการเลี้ยงสัตว์. กรุงเทพมหานคร. การเลี้ยงสัตว์. กรุงเทพมหานคร.
- วีณา เคยพุดชา มาลินี กิตกำธร เกสรสะดู และ อัจฉริยา ไสละสูต. (2550). ผลของออกซิเจนละลายในน้ำต่ำระยะสั้น (DO, 0 ppm, 3 ชั่วโมง) และ ออกซิเจนละลายในน้ำต่ำระยะยาว (DO, 3-4 ppm, 90 วัน). ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะสัตวแพทย์ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- เวียง เชื้อโพธิ์หัก. (2525). คุณภาพน้ำน้ำกับกำลังการผลิตของบ่อปลา. ภาควิชาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ศุวสา กานตวนิชกูร. (2544). การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined Constructed Wetland ในเขตอากาศร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Ahmadifar, E., Azari, Takami, G. A., and Sudagar, M. (2009). Growth Performance, Survival and Immunostimulation, of Beluga (*Huso huso*) Juvenile Following Dietary Administration of Alginic Acid (Ergosan). **Nutrition**. 8 (3): 227-232.
- Amin, M. R., Mollah, M. F. A., Ali, M. R., and Nahiduzzaman, M. (2010). Effect of different feed on the growth and survival of endangered riverine catfish *Rita rita* (Hamilton). **Univ. J. zool**. 28: 11-14.

- APHA, AWWA, and WEF. (1998). **Standard methods for the examination of water and wastewaters (20th ed.)**. Washington D.C.: American Public Health Association.
- Ayaz, S. C. (2008). Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands. **Desalination**. 226, 249-255.
- Barton, B. A. (1997). **Stress in finfish: past, present and future- a historical perspective**. In: Iwana, G.K., Pickering, A.D., Sumpter, J.P., Schreck, C.B. (eds). Fish stress and health in aquaculture. Soc Exper boil Seminar Series, Vol 62. Cambridge University Press, New York. P 1-34.
- Brown, E. E. (1977). **World Fish Farming Cultivation and Economics**, AVI Publishing, Westport, CT.
- Clem, L., Faulmann, E., Miller, N., Ellsaesser, D., Lobb, C., and Cuchens, M. (1984). Temperature-mediated processes in teleost immunity: differential effects of in vitro and in vivo temperatures on mitogenic responses of channel catfish lymphocytes. **comp immunol**. 8: 313-322.
- Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., and Shute, R. B. E. (1996). **Reed Bed and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. WRc Swindon :Wiltshire.
- Daothaisong, A., and Yimrattanabovorn, J. (2008). **Phosphate Removal by Shale for Utilization in Constructed Wetland**. In Proceeding of International Conference on Managing Wetlands for Sustainable Development : Innovative Research and Lessons Learned, Effective Partnerships, and the Need for Co-Management 2008 (pp 1-9). Trang, Thailand. Prince of Songkla University.
- Desai, A. S., and Singh, R. K. (2009). The effects of water temperature and ration size on growth and body composition of fry of common carp, *cyprinus carpio*. **Journal of Thermal Biology**.
- Drizo, A., Frost C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1997). Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Science and Technology**. 35 (5) : 95-102.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1999). Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. **Water Research**. 33(17) : 3595-3602.

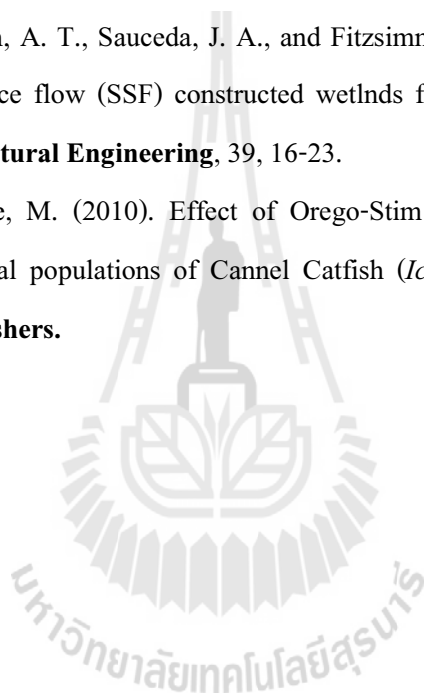
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (2000). Phosphate and ammonium distribution in pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Research**. 34 (9) : 2483-2490.
- Dunham, R. A., Smitherman, R. O., and Webber, C. (1993). Relative tolerance of channel x blue hybrid and channel catfish to low dissolved concentrations, **Prog. Fish-Cult.**, 45, 55.
- Ellsaesser, D., and Chem, L. (1986). Haematological and immunological changes in channel catfish stressed by handling and transport. **J Fish Biol**. 28 : 511-521.
- Ellis, A. (1982). **Differences between the immune mechanisms of fish and higher vertebrates**. In: Roberts R. (ed) Microbial diseases of fish. Academic Press, London, p 1-30.
- Gu, L., Zhenbin, W., Shuping, C., Wei, L., Feng, H., Guiping, F., and Fei, Z. (2007). Application of Constructed Wetlands on Wastewater Treatment for Aquaculture Ponds. **J Natural Sciences**. Vol.12,1131-1135.
- Iamchaturapart, I., Yi, S. W., and Rhee, J. S. (2007). Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland. **Ecology Engineering**. 29, 287-293.
- Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. **Ecological Engineering**. 35, 159-174.
- Kadlec, R. H., and Knight, R. L. (1996). **Treatment Wetlands**. Lewis Publishers, New York.
- Koeypuksa, W., Kitkumthorn, M., Suda, K., and Sailsuda, A. (2007). Effect of short term anoxia (DO 0 ppm, 3 hours) and long term hypoxia (DO 3-4 ppm, 90 days) on hematology of catfish. **J Health Res**. 21(1), 13-23.
- Klinger, H., Deventhai, H., and Hilge, V. (1983). Water quality and stocking density as stressors of channel catfish (*Ictalurus punctatus* Rafinesque). **Aquaculture**. 30: 263-272.
- Koottatep, T., Polprasert, C., Oanh, N. T. K., Surinkul, N., Montangero, A., and Strauss, M. (2002) **Constructed Wetlands for Septage Treatment-Towards Effective Faecal Sludge Management**. AIT, Thailand.
- Lawson, T. B. (1995). **Fundamental of Aquacultural Engineering**. New York : Chapman and Hall.
- Levenspiel, O. (1972). **Chemical Reaction Engineering** (2nd ed.). New York: Wiley International.

- Lee, C-Y., Lee, C-C., Lee, F-Y., Tseng, S-K., and Liao, C-J. (2004). Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. **Bio. Tech.** 92, 173-179.
- Li, L., Li, Y., Biswas, D. K., Nian, Y., and Jiang, G. (2007). Potail of constructed wetlands in treat the eutrophic water : Evidence from Thaihu Lake China. **Bio. Tech.** 99: 1656-1663.
- Liang, Y., Cheung, R. Y. H., Everitt, S., and Wong, M. H. (1997). Reclamation of wastewater for polyculture of freshwater fish : wastewater treatment in pond. **Wat. Res.** Vol.32, No.6 pp. 1864-1880.
- Lin, Y-F., Jing, S-R., and Lee, D-R.(2003). The potential use of constructed wetland in a recirculating aquaculture system for shrimp **culture.Envi. poll.**123:107-113.
- Lin, Y-F., Jing, S-R., Lee, D-Y., and Wang, T-W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. **Aquaculture.** 209, 169-184.
- Lin, Y-F., Jing, S-R., Lee, D-Y., Chang, Y-F., Chen, Y-M., and Shih, K-C. (2005). Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate. **Environmental Pollution.** 134, 411-421.
- Meade, J. W. (1989). **Aquaculture management.** New York: Van Nostrand Reinhold.
- Metcalf and Eddy. (2003). **Wastewater engineering, treatment and reuse** (4th ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Metwally, M. A. A., and Fouad, I. M. (2009). Effects of Protomine Sulfate on Growth Perfotmance, Body Composition and Blood Constituents in Catfish (*Clarias lazera*). **Word J. of fish and marine Sci.** 1 (2): 115-120.
- Mlay, P. S., Seth, M., Balthazary, S. T., Chibunda, R. T., Phiri, E. C. J. H., and Balemba, O. B. (2007). Total plasma proteins and hemoglobin levels as affected by worm burden in freshwaterfish in Morogoro, Tanzania. **Rural Dev.** 19 (2).
- Moortel, A. M. K., Rousseau, D. P. L., Tack, F. M. G., and Pauw, N. D. (2009). A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetland for treatment of combined sewer overflows: A greenhouse experiment. **Eco. Eng.** 35:175-183.
- Nieuwegissen, P. G., Olwo, J., Khong, S., Verreth, J. A. J., and Schrama, W. (2009). Effect of age and stocking desity on the welfare of African catfish *Clarias gariepinus* Burchell. **Aquaculture.** 288: 69-75.

- Oluyemi, G. K., Adeparusi, E. A., and Olanrewaju, J. (2008). Basic Haematological Parameters in African Catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell,1822) FED Ascorbic Acid Supplemented Diets. **Animal Sci.** 2(1): 17-21.
- Osman, M. A., Mohamed, M. A. M., Ali, M. H. H., and Al-Afify, A. D. G. (2010). Assessment of Agriculture Drainage Water Quality to be Used for Fish Farm Irrigation. **Nature and Science.** 8: 8.
- Osrio, A. C., Porta, A., Porras, M., and Garcia, J. (2007). Effect of high Organic loading rate of particulate and dissolved organic matter on the efficiency of shallow experimental horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Water Air Soil Pollut.** 183: 367-375.
- Polprasert, C. (2004). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Principles and Practices. **Dev Eco.** AIT, Thailand.
- Reddy, K. R., and Debusk, W. F. (1987). **Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants.** In R.H. Kadlec, and R.L. Knight. Treatment wetland. Michigan : Lewis Publishers.
- Reed, R. C., Middlebrooks, E. J., and Crites, R. W. (1988). **Natural Systems for Waste Management and Treatment.** New York : McGraw-Hill.
- Rousseau, D. P. L., Lesage, E., Story, A., Vanrolleghem, P. A., and Pauw, N. D. (2008). Constructed wetlands for water reclamation. **Desalination.** 218, 181-189.
- Sabri, D. M., El-Danasoury, M. A. E-H., Eissa, I. A. E-M., and Khouraiiba, H. M. (2009). Impact of Henneguyosis Infestation on Hematological Parameters of Catsish (*Clarias gariepinus*). **Int. J. Agric. Biol.** 11 : 228-230.
- Schuls, C. Gelbrecht, J., and Rennert, B. (2003). Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. **Aquac.** 217 : 207-221.
- Schulz, C., Gelbrecht, J., and Rennert, B. (2003). **Constructed wetland with free water surface for treatment of aquaculture effluents.** J Appl. Ichthyol. 20 : 64-70.
- Senanan, W., Kapuscinski, A. R., Na-Nakhon, U., and Miller, L. M. (2004). Genetic impacts of hybrid catfish farming (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) on native catfish populations in central Thailand. **Aquaculture.** 235,167-184.

- Sewartz, M. F., and Boyd, C. (1995). Constructed Wetland for Treatment of Channel Catfish Pond Effluents. **Pro.fish-cult.** 35 : 255-266.
- Sindilariu, P. D., Schulz, C., and Reiter, R. (2007). Treatment of flow-trough trout aquaculture effluent in a constructed wetland. **Aquac.** 270 : 92-104.
- Sindilariu, P. D., Wolter, C., and Reiter, R. (2008). Constructed wetland as a treatment method for effluents from intensive trout farms. **Aquaculture.** 227, 179-184.
- Stein, O. R., Biederman, J. A., Hook, P. B., and Allen, W.C. (2006). Planr specie and temperature effect on the $k-C^*$ first-order model for COD remove in batch-loaded SSF wetlands. **Ecological Engineering.** 26 : 100-112.
- Stickney, R. R. (1993). **Culture of nonsalmonid freshwater fishes. (2nd ed.)**. Florida : CRC Press.
- Summerfelt, S. T., Adler, P. R., Glenn, D. M., and Kretschmann, R. N. (1999). Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. **Aquaculture Engineering.** 19: 81-92.
- Samudro, G., and Mangkoedihardjo, S. (2010). Review on BOD, COD and BOD/COD ratio: A Triangle zone for toxic, biodegradable and stable levels. **J. Academic Res.** 2(4), 235-239.
- Supamattaya, K., Ruangsri, J., Ruggamol, R., Songpradit, A., Bhuvanath, S., and Promkhunthong, W. (2005). Trypanosomiasis in hybrid catfish (*Clarias macroepalus x Clarias gariepinus*) and other freshwater fishes. **Sci. Technol.** 27(suppl.1) : 321-332.
- Swann, L. (1997). A Fish Farmer's Guide to understanding water quality. **Water quality.** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://aquanic.org/publicat/state/il-in/il-in.htm>
- Trang, N. T. D., Konnerup, D., Schierup, H. H., and Chiem, N. H. (2010). Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow consturuted wetland system : of hudraulic loading rate. **Ecological Engineering.** 36: 527-535.
- Tucker, C. S., and D'Abramo, L. R. (2008). **Managing High pH in Freshwater Ponds.** SRAC Publication No. 4604.
- Tucker, C. S., and Hargreaves, J. A. (2004). Biology and Culture of Channel Catfish. **Dev aquacul fish sci.** vol.34. New York : Elsevier.
- Tucker, C. S., and Robinson, E. H. (1990). **Channel Catfish Farming Handbook.** New York : Van Nostrand Reinhold.

- U.S. EPA. (1988). **Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment.** Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1993). **Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, A Technology Assessment.** Washington, D.C.
- U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment.** Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- Wendelaar, B. S. (1997). The stress response in fish. **Physiological Reviews.** 77: 591-625.
- Zachritz , W. H., Hanson, A. T., Saucedo, J. A., and Fitzsimmons, K. M. (2008). Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production system. **Aquacultural Engineering**, 39, 16-23.
- Zheng, Z. L., and Peare, M. (2010). Effect of Orego-Stim on the growth performance and intestinal bacterial populations of Cannel Catfish (*Ictalurus punctatus*). **International Aquafeed Publishers.**





ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์

- ก.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)
 บ่อกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1.0 เมตร
 ความลึกของน้ำ 0.20 เมตร (d_w) ชั้นดินสูง 0.30 เมตร (d_n)
 ระยะเวลาที่เก็บ 1 วัน
 ความพรุน (n) 0.40 (Daothaisong, 2008)

ขั้นตอนการคำนวณอัตราการไหล :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{LW[d_n + d_w]}{t} \\
 &= \frac{0.5 \times 1 \times [(0.3)(0.4) + 0.2]}{1} \\
 &= 0.16 \text{ ลูกบาศก์เมตร/วัน}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนการคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ :

$$\begin{aligned}
 \text{HLR} &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{0.16}{(0.5 \times 1)} \\
 &= 0.32 \text{ ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/วัน}
 \end{aligned}$$

และทำการเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์อีก 2 ค่า คือ 0.64 และ 1.28 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/วัน

ก.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว (SF)

บ่อกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1.0 เมตร

ความลึกของน้ำ 0.45 เมตร (d)

ระยะเวลาที่เก็บ 0.56 วัน

ความพรุน (n) 0.40 (Daothaisong, 2008)

ขั้นตอนการคำนวณอัตราการไหล :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{LWnd}{t} \\
 &= \frac{0.5 \times 1 \times [(0.4)(0.45)]}{0.56} \\
 &= 0.16 \text{ ลูกบาศก์เมตร/วัน}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนการคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ :

$$\begin{aligned}
 \text{HLR} &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{0.16}{(0.5 \times 1)} \\
 &= 0.32 \text{ ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/วัน}
 \end{aligned}$$

และทำการเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์อีก 2 ค่า คือ 0.64 และ 1.28 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/วัน



ภาคผนวก ข

การคำนวณการศึกษาระดับปริญญาตรี

การคำนวณการศึกษาสารติดตาม

- ข 1. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.3)(0.4) + 0.2]}{0.16}$$

$$= 24 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum tiCi\Delta t}{\sum Ci\Delta t} = \frac{595.792}{24.728}$$

$$= 24.09 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum ti^2 Ci\Delta t}{\sum Ci\Delta t} - T_{mean}^2$$

$$= \frac{18142.169}{24.728} - (24.09)^2$$

$$= 153.341$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$0.264 = \frac{153.341}{(24.09)^2}$$

$$d = 0.033$$

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0	5.85	464.856	0.088	0.000	0.000	0.000
0.50	0.5	9.3	809.749	0.153	0.077	0.038	0.019
1.00	0.5	12	1079.665	0.205	0.102	0.102	0.102
1.50	0.5	13.15	1194.630	0.226	0.113	0.170	0.255
3.00	1.5	17.65	1644.490	0.312	0.467	1.402	4.206
4.00	1	22.05	2084.354	0.395	0.395	1.580	6.318
5.00	1	23.9	2269.296	0.430	0.430	2.150	10.748
7.00	1	27.4	2619.188	0.496	0.496	3.473	24.314
8.00	1	30	2879.107	0.545	0.545	4.364	34.909
11.00	3	34.8	3358.958	0.636	1.909	21.000	231.000
14.00	3	38.65	3743.839	0.709	2.128	29.790	417.057
17.00	3	40.1	3888.794	0.737	2.210	37.574	638.756
20.00	3	40.6	3938.779	0.746	2.239	44.773	895.455
23.00	3	41.4	4018.754	0.761	2.284	52.534	1208.285
26.00	3	41.3	4008.757	0.759	2.278	59.239	1540.205
29.00	3	37.5	3628.875	0.688	2.063	59.813	1734.564
32.00	3	28.8	2759.144	0.523	1.568	50.182	1605.819
35.00	3	24.2	2299.287	0.436	1.307	45.739	1600.853
38.00	3	21.25	2004.378	0.380	1.139	43.290	1645.012
41.00	3	17.7	1649.489	0.313	0.938	38.438	1575.938
44.00	3	13.3	1209.625	0.229	0.688	30.250	1331.001
47.00	3	8.4	719.777	0.136	0.409	19.227	903.682
50.00	3	6.8	559.826	0.106	0.318	15.909	795.455
52.00	2	5.6	439.864	0.083	0.167	8.667	450.667
54.00	2	4.4	319.901	0.061	0.121	6.545	353.455
56.00	2	4.2	299.907	0.057	0.114	6.364	356.364
58.00	2	4.2	299.907	0.057	0.114	6.591	382.273
60.00	2	4.1	289.910	0.055	0.110	6.591	395.455
Sum					24.728	595.792	18142.169

- ข 2. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.45)(0.4)]}{0.16}$$

$$= 13.5 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum tiCi\Delta t}{\sum Ci\Delta t} = \frac{104.273}{9.338}$$

$$= 15.02 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum ti^2 Ci\Delta i}{\sum Ci\Delta i} - T_{mean}^2$$

$$= \frac{2519.008}{9.338} - (15.02)^2$$

$$= 44.158$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$0.196 = \frac{44.158}{(15.02)^2}$$

$$d = 0.024$$

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0.00	1	79.975	0.019	0.000	0.000	0.000
3.00	3	1.9	259.919	0.063	0.189	0.568	1.704
6.00	3	9	1679.479	0.347	1.041	6.248	37.488
9.00	3	12.85	2449.241	0.506	1.519	13.667	123.006
12.00	3	14.35	2749.148	0.568	1.705	20.455	245.455
15.00	3	10.9	2059.361	0.426	1.277	19.153	287.293
18.00	3	9.1	1699.473	0.351	1.054	18.967	341.405
21.00	3	7.55	1389.569	0.287	0.862	18.093	379.952
24.00	3	7.5	1379.572	0.285	0.855	20.529	492.694
27.00	3	7.35	1349.582	0.279	0.837	22.593	610.010
Sum					9.338	140.273	2519.008



- ข 3. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.3)(0.4) + 0.2]}{0.32}$$

$$= 12 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum t_i C_i \Delta i}{\sum C_i \Delta i} = \frac{200.491}{13,762}$$

$$= 14.57 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{mean}^2$$

$$= \frac{3744.94}{13.762} - (14.57)^2$$

$$= 59.837$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$0.282 = \frac{59.837}{(14.57)^2}$$

$$d = 0.036$$

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0	9.75	1829.433	0.30	0.000	0.000	0.000
1.00	1	11.3	2139.337	0.36	0.356	0.356	0.356
2.00	1	14.2	2719.157	0.45	0.453	0.905	1.810
3.00	1	16.45	3169.017	0.53	0.527	1.582	4.747
4.00	1	18.7	3618.878	0.60	0.602	2.409	9.637
5.00	1	19.35	3748.838	0.62	0.624	3.120	15.599
9.00	1	21.25	4128.720	0.69	0.687	6.185	55.662
11.00	2	25.45	4968.459	0.83	1.654	18.193	200.123
13.00	2	27.15	5308.354	0.88	1.767	22.972	298.632
15.00	2	27.95	5468.304	0.91	1.820	27.304	409.567
17.00	2	19.45	3768.831	0.63	1.255	21.328	362.572
19.00	2	15.5	2979.076	0.50	0.992	18.842	357.997
21.00	2	12.1	2299.287	0.38	0.765	16.073	337.537
23.00	2	9.45	1769.451	0.29	0.589	13.547	311.591
25.00	2	8.2	1519.529	0.25	0.506	12.646	316.140
27.00	2	6.3	1139.647	0.19	0.379	10.243	276.559
29.00	2	4.8	839.740	0.14	0.280	8.106	235.088
31.00	2	3.2	519.8388	0.09	0.173	5.364	166.296
33.00	2	3.1	499.845	0.08	0.166	5.491	181.198
35.00	2	3.1	499.845	0.08	0.166	5.824	203.827
Sum					13.762	200.491	3744.940

- ข 4. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.45)(0.4)]}{0.32}$$

$$= 6.75 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum tiCi\Delta t}{\sum Ci\Delta t} = \frac{51.45}{7.058}$$

$$= 7.29 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum ti^2 Ci \Delta i}{\sum Ci \Delta i} - T_{mean}^2$$

$$= \frac{484.15}{7.058} - (7.29)^2$$

$$= 15.452$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$0.291 = \frac{15.452}{(7.29)^2}$$

$$d = 0.036$$

ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0.00	3.65	609.81	0.20	0.00	0.00	0.00
0.25	0.25	4.00	679.79	0.22	0.055	0.014	0.003
0.50	0.25	4.60	799.75	0.26	0.065	0.032	0.016
0.75	0.25	5.10	899.72	0.29	0.073	0.055	0.041
1.00	0.25	5.45	969.70	0.31	0.079	0.079	0.079
1.25	0.25	7.30	1339.58	0.44	0.109	0.136	0.170
1.50	0.25	8.55	1589.51	0.52	0.129	0.194	0.290
3.00	1.5	10.1	1899.41	0.62	0.925	2.776	8.328
4.50	1.5	11.35	2149.33	0.70	1.047	4.712	21.203
6.00	1.5	11.7	2219.31	0.72	1.081	6.487	38.922
7.50	1.5	9.75	1829.43	0.59	0.891	6.684	50.132
9.00	1.5	7.7	1419.56	0.46	0.692	6.224	56.016
10.50	1.5	6.5	1179.63	0.38	0.575	6.034	63.358
12.00	1.5	5.8	1039.68	0.34	0.506	6.078	72.935
13.00	1	4.6	799.75	0.26	0.260	3.377	43.896
14.00	1	3.6	599.81	0.19	0.195	2.727	38.182
15.00	1	3.5	579.82	0.19	0.188	2.825	42.370
16.00	1	3.5	579.82	0.19	0.188	3.013	48.208
				sum	7.058	51.45	484.15

- ข 5. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.3)(0.4) + 0.2]}{0.64}$$

$$= 6 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum tiCi\Delta t}{\sum Ci\Delta t} = \frac{35.395}{5.063}$$

$$= 6.991 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum ti^2 Ci\Delta t}{\sum Ci\Delta t} - T_{mean}^2$$

$$= \frac{342.387}{5.063} - (6.991)^2$$

$$= 18.751$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$\frac{18.751}{(6.991)^2} = 0.384$$

$$d = 0.047$$

ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	1	8.65	1609.501	0.333	0.333	0.333	0.333
2.00	1	11	2079.355	0.430	0.430	0.860	1.719
3.00	1	11.85	2249.303	0.465	0.465	1.395	4.184
4.00	1	12.7	2419.250	0.500	0.500	2.000	8.000
5.25	1.25	13.85	2649.179	0.548	0.684	3.593	18.864
6.75	1.75	12.15	2309.284	0.477	0.835	5.638	38.055
7.75	1	9.3	1739.461	0.360	0.360	2.786	21.593
10.75	3	5.65	1009.687	0.209	0.626	6.730	72.346
12.75	2	4.5	779.758	0.161	0.322	4.110	52.396
14.75	2	4	679.789	0.140	0.281	4.145	61.133
16.75	2	3.35	549.830	0.114	0.227	3.807	63.764
Sum					5.063	35.395	342.387

- ข 6. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$$T_{theory} = \frac{V}{Q} = \frac{0.5 \times 1 \times [(0.45)(0.4)]}{0.64} = 3.38 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{mean} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{7.11}{2.088} = 3.41 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{mean}^2 = \frac{31.33}{2.088} - (3.41)^2 = 3.377$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2}$$

$$0.290 = \frac{3.377}{(3.41)^2}$$

$$d = 0.074$$

ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-SF
ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Time (ti)	Δti	AgNO ₃ (ml)	NaCl (mg/L), C	C/C0= Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0.00	0.00	3.20	519.84	0.10	0.00	0.00	0.00
0.25	0.25	4.8	839.74	0.15	0.039	0.010	0.002
0.50	0.25	4.9	859.73	0.16	0.040	0.020	0.010
0.75	0.25	5.7	1019.68	0.19	0.047	0.035	0.026
1.00	0.25	6	1079.67	0.20	0.050	0.050	0.050
1.25	0.25	7.5	1379.57	0.25	0.064	0.080	0.099
1.50	0.25	9.2	1719.47	0.32	0.079	0.119	0.179
1.75	0.25	11	2079.36	0.38	0.096	0.168	0.294
2.00	0.25	12.3	2339.27	0.43	0.108	0.216	0.432
2.25	0.25	14.1	2699.16	0.50	0.125	0.280	0.630
2.50	0.25	15.7	3019.06	0.56	0.139	0.348	0.871
2.75	0.25	15.1	2899.10	0.54	0.134	0.368	1.012
3.00	0.25	14.5	2779.14	0.51	0.128	0.385	1.154
3.25	0.25	14.25	2729.15	0.50	0.126	0.409	1.330
3.50	0.25	13.1	2499.23	0.46	0.115	0.404	1.413
3.75	0.25	12.2	2319.28	0.43	0.107	0.401	1.505
4.00	0.25	11.1	2099.35	0.39	0.097	0.387	1.550
4.25	0.25	10	1879.42	0.35	0.087	0.369	1.566
4.50	0.25	8.5	1579.51	0.29	0.073	0.328	1.476
4.75	0.25	7.1	1299.60	0.24	0.060	0.285	1.353
5.00	0.25	6	1079.67	0.20	0.050	0.249	1.245
5.25	0.25	4.6	799.75	0.15	0.037	0.194	1.017
5.75	0.5	3.65	609.81	0.11	0.056	0.324	1.861
6.25	0.5	3.3	539.83	0.10	0.050	0.311	1.946
6.75	0.5	3.1	499.85	0.09	0.046	0.311	2.102
7.25	0.5	3.1	499.85	0.09	0.046	0.334	2.424
7.75	0.5	3.1	499.85	0.09	0.046	0.357	2.770
8.25	0.5	3	479.85	0.09	0.044	0.365	3.014
				sum	2.088	7.11	31.33



ภาคผนวก ค

คำนวณ BOD ที่ได้จากเครื่อง Oxitop® -OC110

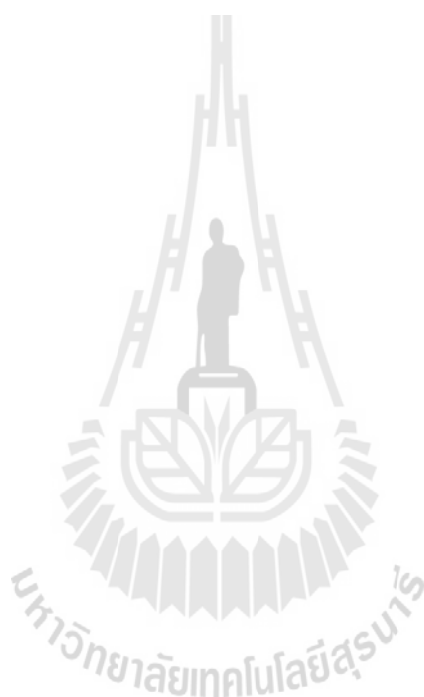
การคำนวณ BOD ที่ได้จากเครื่อง Oxitop®-OC110

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD ในบ่อปลา ที่ได้จากเครื่อง Oxitop®-OC110

t (d)	y (x)	dt	dy	dy/dt (y)	(dy/dt) ² , (y) ²	y ² , (x ²)	y(dy/dt), (xy)
0	0						
1	53.45	2	64.7	32.350	1046.523	2856.903	1729.108
2	64.7	2	14.05	7.025	49.351	4186.090	454.518
3	67.5	2	14.1	7.050	49.703	4556.250	475.875
4	78.8	2	16.9	8.450	71.403	6209.440	665.860
5	84.4	2	7	3.500	12.250	7123.360	295.400
6	85.8	2	1.4	0.700	0.490	7361.640	60.060
7	85.8	2	1.4	0.700	0.490	7361.640	60.060
8	87.2	2	1.4	0.700	0.490	7603.840	61.040
9	87.2	2	2.8	1.400	1.960	7603.840	122.080
10	90	2	2.8	1.400	1.960	8100.000	126.000
11	90	2	2.85	1.425	2.031	8100.000	128.250
12	92.85	2	2.85	1.425	2.031	8621.123	132.311
13	92.85	2	0	0.000	0.000	8621.123	0.000
14	92.85	2	0	0.000	0.000	8621.123	0.000
15	92.85	2	2.8	1.400	1.960	8621.123	129.990
16	95.65	2	4.25	2.125	4.516	9148.923	203.256
17	97.1	2	1.45	0.725	0.526	9428.410	70.397
18	97.1	2	0	0.000	0.000	9428.410	0.000
19	97.1	2	1.25	0.625	0.391	9428.410	60.688
20	98.35						
sums	1633.2			71	1246.071	142981.645	4774.893

นำค่าที่ได้จากเครื่อง Oxitop[®]-OC110 เพื่อคำนวณค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย BOD

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \\
 k &= \frac{19(4774.893) - 1633.2(71)}{19(142981.645) - (1633.2)^2} \\
 &= 0.51 \text{ d}^{-1}
 \end{aligned}$$





ภาคผนวก ง

อัตราการระเหยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณอัตราการระเหยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1. อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (L_w)
 2. อัตราการคายระเหย (E_T), m/yr
 3. อัตราฝนตก 1.307 เมตรต่อปี (P_R)
(ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดนครราชสีมา, 2550)
 4. ความต้องการการระเหย 0.1-0.2 (L_R) (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547)
 5. ประสิทธิภาพของระบบให้น้ำแก่พืช แบบปล่อยไหลตามพื้นดิน 0.65-0.75
(เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547)
- ง.1 การคำนวณอัตราการคายระเหยที่อัตราการรับน้ำ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (116.9 m/yr)
- $$L_w = (E_T - P_R)(1 + L_R)100/E$$
- $$116.9 \text{ m/yr} = (E_T - 1.307 \text{ m/yr})(1 + 0.1) 100/0.65$$
- $$E_T = 1.878 \text{ m/yr}$$
- ปริมาณที่หายไป (%) = $(1.878/116.9) \times 100$
~ 1.61%
- ง.2 การคำนวณอัตราการคายระเหยที่อัตราการรับน้ำ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (233.6 m/yr)
- $$L_w = (E_T - P_R)(1 + L_R)100/E$$
- $$233.6 \text{ m/yr} = (E_T - 1.307 \text{ m/yr})(1 + 0.1) 100/0.65$$
- $$E_T = 2.569 \text{ m/yr}$$
- ปริมาณที่หายไป (%) = $(2.569/233.6) \times 100$
~ 1.10%
- ง.3 การคำนวณอัตราการคายระเหยที่อัตราการรับน้ำ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (476.2 m/yr)
- $$L_w = (E_T - P_R)(1 + L_R)100/E$$
- $$476.2 \text{ m/yr} = (E_T - 1.307 \text{ m/yr})(1 + 0.1) 100/0.65$$
- $$E_T = 3.949 \text{ m/yr}$$
- ปริมาณที่หายไป (%) = $(3.949/476.2) \times 100$
~ 0.85%



ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ. ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ จ.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	60.6667	9	14.88288	4.96096				
	SF	65.3333	9	13.85641	4.6188				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-4.66667	25.69047	8.56349	-24.41411	15.08077	-0.545	8	0.601



ตารางที่ จ.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean			
Pair 1		FWS	71.8182	11	12.2378	3.68983			
		SF	66.8182	11	11.41769	3.44256			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	5	10.85357	3.27247	-2.29153	12.29153	1.528	10	0.158



ตารางที่ จ.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean			
Pair 1		FWS	58.6	15	16.3611	4.22442			
		SF	58.8667	15	13.91231	3.59214			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-0.26667	15.33188	3.95868	-8.75718	8.22385	-0.067	14	0.947



ตารางที่ จ.2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน

RAS-FWS	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	1191.906	2	595.953	2.718	0.081
	Within Groups	7017.236	32	219.289		
	Total	8209.143	34			
RAS-SF	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	465.602	2	232.801	1.342	0.276
	Within Groups	5549.37	32	173.418		
	Total	6014.971	34			

ตารางที่ จ.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean			
Pair 1	FWS		64	9	9.3675	3.1225			
	SF		58.5556	9	10.03881	3.34627			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	5.44444	10.13794	3.37931	-2.34826	13.23715	1.611	8	0.146



ตารางที่ จ.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean			
Pair 1	FWS		69.9091	11	7.46263	2.25007			
	SF		64.2727	11	9.55082	2.87968			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	5.63636	8.51202	2.56647	-0.08209	11.35482	2.196	10	0.053



ตารางที่ จ.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	68.4	15	5.53947	1.43028				
	SF	64.6	15	8.3049	2.14432				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	3.8	10.42798	2.69249	-1.97483	9.57483	1.411	14	0.18



ตารางที่ จ.4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน

RAS-FWS	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	184.177	2	92.088	1.745	0.191
	Within Groups	1688.509	32	52.766		
	Total	1872.686	34			
RAS-SF	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	233.882	2	116.941	1.394	0.263
	Within Groups	2684.004	32	83.875		
	Total	2917.886	34			

ตารางที่ จ.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	84.1111	9	6.15314	2.05105				
	SF	67.1111	9	11.19648	3.73216				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	1.70E+01	9.51315	3.17105	9.68755	24.31245	5.361	8	0.001



ตารางที่ จ.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการระบายน้ำทางคณิตศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	83.3636	11	6.90323	2.0814				
		SF	73.4545	11	6.51711	1.96498				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower				Upper
	Pair 1	FWS - SF	9.90909	7.59545	2.29012	4.8064	15.01179	4.327	10	0.001



ตารางที่ จ.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	69.3333	15	12.61896	3.2582				
		SF	59.8667	15	9.87686	2.55019				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower				Upper
	Pair 1	FWS - SF	9.46667	15.11322	3.90222	1.09724	17.83609	2.426	14	0.029



ตารางที่ จ.6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน

RAS-FWS	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	1771.918	2	885.959	9.423	0.001
	Within Groups	3008.768	32	94.024		
	Total	4780.686	34			
RAS-SF	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	1186.651	2	593.325	6.797	0.003
	Within Groups	2793.349	32	87.292		
	Total	3980	34			

ตารางที่ จ.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
ค่าอัตราการรับน้ำทางอุตสาหกรรม 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	FWS	52.7778	9	9.79512	3.26504			
		SF	67.7778	9	10.28078	3.42693			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-1.50E+01	18.15902	6.05301	-28.95826	-1.04174	-2.478	8	0.038



ตารางที่ จ.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	61.5455	11	9.39536	2.83281				
		SF	73.1818	11	10.75935	3.24407				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	-1.16E+01	14.98181	4.51718	-21.70128	-1.57145	-2.576	10	0.028



ตารางที่ จ.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP
 ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	FWS	60.1333	15	9.62041	2.48398			
		SF	74.6	15	6.44537	1.66419			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-1.45E+01	14.14146	3.65131	-22.29795	-6.63539	-3.962	14	0.001



ตารางที่ จ.8 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของประสิทธิภาพในการบำบัด TP
 ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ RAS-FWS และ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน

RAS-FWS	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	435.527	2	217.763	2.365	0.11
	Within Groups	2946.016	32	92.063		
	Total	3381.543	34			
RAS-SF	ANOVA					
	eff					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	271.608	2	135.804	1.681	0.202
	Within Groups	2584.792	32	80.775		
	Total	2856.4	34			



ภาคผนวก ฉ

การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกอุกผสม

จ. ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ จ.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

		Paired Samples Statistics							
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	9.3667	9	2.83646	0.94549				
	RAS	8.5333	9	1.88925	0.62975				
		Paired Samples Test							
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	0.83333	1.58541	0.52847	-0.38532	2.05199	1.577	8	0.153

ตารางที่ ๑.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics										
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
Pair 1	CAS	8.5118	11	0.41523	0.1252					
	RAS	8.4555	11	0.15475	0.04666					
Paired Samples Test										
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS	0.05636	0.29901	0.09015	-0.14451	0.25724	0.625	10	0.546	



ตารางที่ ๑.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า DO ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics											
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean						
Pair 1	CAS	8.2293	15	0.36449	0.09411						
	RAS	8.214	15	0.31622	0.08165						
Paired Samples Test											
		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)			
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
					Lower				Upper		
Pair 1	CAS - RAS	0.01533	0.37044	0.09565	-0.18981	0.22048	0.16	14	0.875		



ตารางที่ ๓.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics										
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	CAS	27.7611	9	2.27593	0.75864				
		RAS	27.4578	9	2.32579	0.77526				
Paired Samples Test										
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS	0.30333	0.60019	0.20006	-0.15801	0.76468	1.516	8	0.168	



ตารางที่ ๓.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางชุดศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	CAS		27.5455	11	0.63461	0.19134			
		RAS		27.4918	11	0.57503	0.17338			
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS		0.05364	0.16783	0.0506	-0.05911	0.16638	1.06	10	0.314



ตารางที่ ๒.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	27.8333	15	0.42873	0.1107				
	RAS	27.5387	15	1.77874	0.45927				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	0.29467	1.60644	0.41478	-0.59495	1.18428	0.71	14	0.489



ตารางที่ ๓.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า pH ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	7.6444	9	0.64203	0.21401				
	RAS	7.8044	9	0.47448	0.15816				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-0.16	0.49074	0.16358	-0.53722	0.21722	-0.978	8	0.357



ตารางที่ ๓.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า pH ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics										
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
Pair 1	CAS	7.7082	11	0.13681	0.04125					
	RAS	8.1709	11	0.31043	0.0936					
Paired Samples Test										
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS	-0.46273	0.30332	0.09145	-0.6665	-0.25896	-5.06	10	0	



ตารางที่ ๓.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า pH ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	7.9973	15	0.30635	0.0791				
	RAS	7.9873	15	0.21651	0.0559				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	0.01	0.25793	0.0666	-0.13284	0.15284	0.15	14	0.883



ตารางที่ ๓.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าแสงส่องผ่านในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	26.8889	9	3.0288	1.0096				
	RAS	27.1633	9	3.35693	1.11898				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-0.27444	3.44862	1.14954	-2.92529	2.3764	-0.239	8	0.817



ตารางที่ ๓.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าแสงส่องผ่านในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

ที่วัดการรั่วรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	CAS	32.9091	11	1.6855	0.5082				
		RAS	31.2955	11	0.7143	0.21537				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	CAS - RAS	1.61364	1.25182	0.37744	0.77265	2.45462	4.275	10	0.002



ตารางที่ ๓.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าแสงส่องผ่านในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics										
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
Pair 1	CAS	32.6667	15	3.06283	0.79082					
	RAS	32.0733	15	2.3689	0.61165					
Paired Samples Test										
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS	0.59333	1.1614	0.29987	-0.04983	1.2365	1.979	14	0.068	



ตารางที่ ๓.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความชุ่มในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	9.4444	9	0.80596	0.26865				
	RAS	9.2844	9	1.85124	0.61708				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	0.16	1.30076	0.43359	-0.83985	1.15985	0.369	8	0.722



ตารางที่ ๓.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความชุ่มในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

ที่อัตราการระเหยน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	Paired Samples Statistics										
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
	Pair 1	CAS		8.0009	11	1.87086	0.56408				
		RAS		8.16	11	2.06061	0.6213				
	Paired Samples Test										
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
						Lower	Upper				
	Pair 1	CAS - RAS	-0.15909	0.71044	0.21421	-0.63637	0.31819	-0.743	10	0.475	



ตารางที่ ๓.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความชุ่มในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	8.6713	15	2.12892	0.54969				
	RAS	9.134	15	1.65823	0.42815				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-0.46267	0.84373	0.21785	-0.92991	0.00457	-2.124	14	0.052



ตารางที่ ๓.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	3.41E+02	9	46.98833	15.66278				
	RAS	3.72E+02	9	26.15698	8.71899				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-3.09E+01	55.71735	18.57245	-73.68926	11.96704	-1.662	8	0.135



ตารางที่ ๓.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	1.19E+02	11	7.40884	2.23385				
	RAS	1.38E+02	11	9.19325	2.77187				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-1.98E+01	14.53233	4.38166	-29.58113	-10.05523	-4.523	10	0.001



ตารางที่ ๓.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	79.4	15	8.91868	2.30279				
	RAS	1.38E+02	15	34.55493	8.92205				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-5.88E+01	28.46377	7.34931	-74.64604	-43.12062	-8.012	14	0



ตารางที่ ๗.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า COD ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	89	9	32.4037	10.80123				
	RAS	82.3111	9	29.82065	9.94022				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	6.68889	18.65934	6.21978	-7.65395	21.03173	1.075	8	0.314



ตารางที่ ๗.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า COD ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics										
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
Pair 1	CAS	1.35E+02	11	28.62262	8.63005					
	RAS	1.68E+02	11	20.3006	6.12086					
Paired Samples Test										
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
					Lower	Upper				
Pair 1	CAS - RAS	-3.32E+01	21.49747	6.48173	-47.64311	-18.75871	-5.122	10	0	



ตารางที่ ๗.7 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า COD ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	95.9333	15	39.6511	10.23787				
	RAS	85.5367	15	23.60026	6.09356				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	1.04E+01	41.07531	10.6056	-12.35008	33.14341	0.98	14	0.344



ตารางที่ ๘.8 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า NH_4 ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	1.1356	9	0.19417	0.06472				
	RAS	1.1989	9	0.18272	0.06091				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-0.06333	0.25446	0.08482	-0.25893	0.13226	-0.747	8	0.477



ตารางที่ ๘.8 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า NH_4 ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N		Std. Deviation	Std. Error Mean			
Pair 1	CAS	1.4216	11		0.31345	0.09451			
	RAS	1.6318	11		0.33552	0.10116			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	-0.21018	0.46923	0.14148	-0.52542	0.10505	-1.486	10	0.168



ตารางที่ ๘.8 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่า NH_4 ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาแบบ CAS และ RAS (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	CAS	1.26	15	0.25377	0.06552				
	RAS	1.0367	15	0.16452	0.04248				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	CAS - RAS	0.22333	0.18806	0.04856	0.11919	0.32748	4.599	14	0



ตารางที่ ๙.9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกอุกผสมแบบ RAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน

ค่า DO	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	0.685	2	0.343	0.363	0.698
	Within Groups	30.194	32	0.944		
	Total	30.879	34			
ค่าอุณหภูมิ	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	0.039	2	0.019	0.007	0.993
	Within Groups	90.876	32	2.84		
	Total	90.915	34			
pH	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	1.181	2	0.591	5.893	0.007
	Within Groups	3.208	32	0.1		
	Total	4.389	34			

ตารางที่ ๙.9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกอุกผสมแบบ RAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน (ต่อ)

ค่าแสดงผ่าน	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	94.137	2	47.069	5.167	0.011
	Within Groups	291.49	32	9.109		
	Total	385.627	34			
ค่าความตื้น	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	6.91	2	3.455	1.043	0.364
	Within Groups	106.048	32	3.314		
	Total	112.959	34			
สภาพต่างของน้ำ	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	364770.51	2	182385.25	253.365	0
	Within Groups	23035.267	32	719.852		
	Total	387805.78	34			

ตารางที่ ๙.9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA ของคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลาอุกผสมแบบ RAS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน (ต่อ)

COD	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	52662.045	2	26331.023	44.27	0
	Within Groups	19032.924	32	594.779		
	Total	71694.97	34			
NH ₄	ANOVA					
	concentration					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Between Groups	2.301	2	1.151	20.783	0
	Within Groups	1.772	32	0.055		
	Total	4.073	34			



ภาคผนวก ช

การเปรียบเทียบผลผลิตของปลาดุกลูกผสม

ข. ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักของปลาอุกถูกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	1.07E+02	24	8.55721	1.74673				
		SF	97.6562	24	7.3908	1.50864				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	9.4366	9.27632	1.89352	5.51962	13.35371	4.984	23	0



ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักของปลาคุณลักษณะในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	FWS	99.5954	24	2.79398	0.57032			
		SF	99.3333	24	7.02468	1.43391			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	0.26208	7.37022	1.50444	-2.85009	3.37425	0.174	23	0.863



ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักของปลาคุณลักษณะในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	98.3437	24	4.33247	0.88436				
	SF	98.3358	24	4.73168	0.96585				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	0.00792	6.43318	1.31317	-2.70858	2.72441	0.006	23	0.995



ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความยาวของปลาคุกกุผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
คู่ตัวอย่างที่นำทางศาสตร์ 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	FWS	1.00E+02	24	8.00017	1.63303			
		SF	1.02E+02	24	7.94362	1.62148			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-1.3987	2.1389	0.4366	-2.30193	-0.49557	-3.204	23	0.004



ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความยาวของปลาคุกกุผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	1.00E+02	24	4.20739	0.85883				
	SF	1.00E+02	24	4.24651	0.86681				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-0.39542	5.71761	1.1671	-2.80975	2.01892	-0.339	23	0.738



ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าความยาวของปลาคุกกุผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Pair 1	FWS	96.4829	24	6.64253	1.3559			
		SF	95.8771	24	8.26246	1.68657			
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	0.60583	10.71758	2.18772	-3.9198	5.13147	0.277	23	0.784



ตารางที่ ข.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาอุกถูกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	1.00E+02	24	8.00017	1.63303				
		SF	1.02E+02	24	7.94362	1.62148				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	-1.3987	2.1389	0.4366	-2.30193	-0.49557	-3.204	23	0.004



ตารางที่ ข.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคุณกุ่มผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	1.00E+02	24	4.20739	0.85883				
		SF	1.00E+02	24	4.24651	0.86681				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	-0.39542	5.71761	1.1671	-2.80975	2.01892	-0.339	23	0.738



ตารางที่ ๓.3 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวันของปลาคุกกูผสม
 ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	96.4829	24	6.64253	1.3559				
		SF	95.8771	24	8.26246	1.68657				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	0.60583	10.71758	2.18772	-3.9198	5.13147	0.277	23	0.784



ตารางที่ ข.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคุณลูกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS		1.09E+02	14	19.64968	5.2516			
		SF		92	14	19.65863	5.25399			
	Paired Samples Test									
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower				Upper
	Pair 1	FWS - SF	1.66E+01	25.33989	6.77237	1.94061	31.20224	2.447	13	0.029



ตารางที่ ข.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคุณลูกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	99.3046	24	11.43883	2.33494				
		SF	99.1317	24	11.02235	2.24993				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	0.17292	16.38021	3.3436	-6.74384	7.08967	0.052	23	0.959



ตารางที่ ๗.4 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มของปลาคุณลูกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางทศตศตวรรษ 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics										
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean					
	Pair 1	FWS		95.5133	24	9.60129	1.95985				
		SF		95.1925	24	10.95126	2.23542				
	Paired Samples Test										
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference					
						Lower	Upper				
	Pair 1	FWS - SF	0.32083	15.25442	3.1138	-6.12054	6.76221	0.103	23	0.919	



ตารางที่ ข.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาตุ๊กตูกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	1.03E+02	14	26.46919	7.07419				
		SF	94.5079	14	29.22754	7.81139				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	8.84214	35.4528	9.47516	-11.62769	29.31198	0.933	13	0.368



ตารางที่ ข.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคุกกุผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางศาสตร์ 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	99.2838	24	22.31416	4.55486				
		SF	98.6933	24	20.37991	4.16003				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	0.59042	25.09907	5.12333	-10.00799	11.18882	0.115	23	0.909



ตารางที่ ข.5 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาคุกกุผสม
 ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำทางไฮดรอลิก 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	97.5292	24	12.08193	2.46621				
		SF	97.815	24	13.79056	2.81499				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS - SF	-0.28583	19.54395	3.98939	-8.53852	7.96685	-0.072	23	0.944



ตารางที่ ข.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาอุกอุกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

อัตราการระเหยน้ำทางผิวดิน 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS		1.02E+02	14	18.38093	4.91251			
		SF		95.3643	14	22.33225	5.96854			
	Paired Samples Test									
			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
	Pair 1	FWS-SF	7.04714	26.73962	7.14646	-8.39186	22.48614	0.986	13	0.342



ตารางที่ ข.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาอุกอุกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

ที่อัตราการรับน้ำหนักสดต่อตัว 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS	99.5042	24	15.85896	3.2372				
		SF	99.3467	24	13.79311	2.81551				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower				Upper
	Pair 1	FWS-SF	0.1575	17.3941	3.55056	-7.18738	7.50238	0.044	23	0.965



ตารางที่ ข.6 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ของค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาอุกอุกผสม
ในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	98.6225	24	8.78872	1.79399				
	SF	98.7796	24	10.27465	2.09731				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS-SF	-0.15708	14.35805	2.93082	-6.21996	5.90579	-0.054	23	0.958



ภาคผนวก ซ

การเปรียบเทียบสุขภาพของปลาอุกอุกผสม

ข. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 16.0

ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซีโมโกลบินของปลาอุกถูกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	FWS -	1.26E+02	22	22.38712	4.77295				
		SF	1.13E+02	22	19.97046	4.25772				
	Paired Samples Test									
			Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower				Upper
	Pair 1	FWS - SF	1.30E+01	9.97277	2.1262	8.62287	17.46622	6.135	21	0



ตารางที่ ๗.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ฮีโมโกลบินของปลาตุ๊กผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics											
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean						
Pair 1	FWS -	1.00E+02	24	12.59644	2.57124						
	SF	96.68	24	17.64766	3.60231						
Paired Samples Test											
		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)			
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
					Lower				Upper		
Pair 1	FWS - SF	3.32833	7.96821	1.6265	-0.03635	6.69301	2.046	23	0.052		



ตารางที่ ๗.1 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ฮีโมโกลบินของปลาคุกกุผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS -	1.27E+02	23	41.70739	8.69659				
	SF	1.51E+02	23	23.71505	4.94493				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-2.38E+01	37.13967	7.74416	-39.94083	-7.82004	-3.084	22	0.005

ที่อัตราการรับน้ำทางหลอดเลือด 1.28 m³ m⁻² d⁻¹



ตารางที่ ๗.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซี่มาโตกรีตของปลาอุกถูกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	1.15E+02	14	19.62282	5.24442				
	SF	1.09E+02	14	22.81314	6.09707				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	5.71429	22.22759	5.94057	-7.11954	18.54812	0.962	13	0.354



ตารางที่ ๗.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซึ่มาโคริตของปลาคุกกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS -	1.16E+02	24	14.43307	2.94614				
	SF	1.14E+02	24	19.96893	4.07614				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	1.15333	10.29541	2.10154	-3.19404	5.5007	0.549	23	0.588



ตารางที่ ๗.2 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired Test ซึ่มาวิเคราะห์ของปลาอุกผสมในบ่อเลี้ยงปลาแบบ RAS-FWS และ RAS-SF (ต่อ)

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	FWS	1.20E+02	23	37.12165	7.7404				
	SF	1.39E+02	23	20.63491	4.30268				
Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	FWS - SF	-1.91E+01	31.94513	6.66102	-32.9715	-5.34328	-2.876	22	0.009



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark in the center of the page. It features a stylized figure of a person standing within a large, upward-pointing triangle. Below the triangle is a circular emblem containing a book and a lamp. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ฅ

การคำนวณค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์
และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ ฅ.1 ค่ำคงที่อัตรการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS ที่อัตรการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	c_i (mg/l)	X (mg/l)	ce/c_i	t (d)	K_t (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(c_i-ce)$	d (m)	$K_t * d$	A (m^2)
FWS	43	32	0.750	1	0.125	1.492	0.084	2.380	0.20	0.025	15.237
	58	14	0.243	1	0.614	1.492	0.412	3.775	0.20	0.123	4.916
	51	35	0.688	1	0.163	1.492	0.109	2.773	0.20	0.033	13.631
	78	56	0.718	1	0.144	1.492	0.096	3.091	0.20	0.029	17.184
	64	44	0.688	1	0.163	1.492	0.109	2.996	0.20	0.033	14.728
	80	40	0.500	1	0.301	1.492	0.202	3.689	0.20	0.060	9.803
	128	24	0.188	1	0.727	1.492	0.125	4.644	0.20	0.145	5.111
	80	52	0.650	1	0.187	1.492	0.203	3.332	0.20	0.037	14.249
เฉลี่ย	73	37	0.553	1	0.303	1.492	0.168	3.335	0.20	0.061	11.857

ตารางที่ ๓.2 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	c_i (mg/l)	X (mg/l)	ce/c_i	t (d)	K_t (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(c_i-ce)$	d (m)	$K_t * d$	A (m^2)
SF	36	12	0.333	0.62	0.770	1.492	0.516	3.178	0.45	0.346	1.47
	29	22	0.764	0.62	0.189	1.492	0.126	1.917	0.45	0.085	3.61
	96	17	0.177	0.62	1.213	1.492	0.813	4.369	0.45	0.546	1.28
	75	24	0.320	0.62	0.798	1.492	0.535	3.932	0.45	0.359	1.75
	80	40	0.250	0.62	0.971	1.492	0.651	4.094	0.45	0.437	1.50
	72	36	0.222	0.62	1.054	1.492	0.706	4.025	0.45	0.474	1.36
	56	28	0.500	0.62	0.486	1.492	0.325	3.332	0.45	0.218	2.44
	72	36	0.611	0.62	0.345	1.492	0.231	3.332	0.45	0.155	3.43
	88	44	0.136	0.62	1.396	1.492	0.935	4.331	0.45	0.628	1.10
เฉลี่ย	67	29	0.368	0.62	0.802	1.492	0.538	3.612	0.45	0.361	1.99

ตารางที่ ๓.3 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS
 ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	c_i (mg/l)	X (mg/l)	c_e/c_i	t (d)	K_1 (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(c_i - c_e)$	d (m)	$K_1 * d$	A (m^2)
FWS	145	46.5	0.322	0.61	0.807	1.492	0.541	4.585	0.20	0.161	9.09
	105	59.4	0.566	0.61	0.405	1.492	0.272	3.819	0.20	0.081	15.08
	121	30.5	0.252	0.61	0.981	1.492	0.657	4.505	0.20	0.196	7.35
	115	35.0	0.304	0.61	0.847	1.492	0.568	4.382	0.20	0.169	8.28
	126	36.5	0.290	0.61	0.882	1.492	0.591	4.494	0.20	0.176	8.15
	190	79.0	0.415	0.61	0.626	1.492	0.420	4.713	0.20	0.125	12.04
เฉลี่ย	134	48	0.358	0.61	0.758	1.492	0.508	4.416	0.20	0.152	10.00



ตารางที่ ๓.4 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF
 ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $0.64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	c_i (mg/l)	X (mg/l)	c_e/c_i	t (d)	K_t (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(c_i - c_e)$	d (m)	$K_t * d$	A (m^2)
SF	128	32	0.250	0.30	2.007	1.49	1.345	4.564	0.45	0.903	1.617
	168	58	0.347	0.30	1.532	1.49	1.027	4.699	0.45	0.689	2.181
	113	40	0.354	0.30	1.503	1.49	1.007	4.290	0.45	0.677	2.029
	103	38	0.364	0.30	1.463	1.49	0.980	4.182	0.45	0.658	2.033
	175	30	0.171	0.30	2.553	1.49	1.711	4.977	0.45	1.149	1.386
	223	58	0.261	0.30	1.946	1.49	1.304	5.104	0.45	0.876	1.865
เฉลี่ย	152	43	0.291	0.30	1.834	1.49	1.229	4.636	0.45	0.825	1.852



ตารางที่ ๕.5 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-FWS ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	ci (mg/l)	X (mg/l)	ce/ci	t (d)	K_1 (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(ci-ce)$	d (m)	$K_1 * d$	A (m^2)
FWS	77	26	0.333	0.32	1.491	1.492	0.999	3.936	0.20	0.298	8.447
	71	10	0.139	0.32	2.679	1.492	1.795	4.119	0.20	0.536	4.919
	66	9	0.129	0.32	2.782	1.492	1.864	4.052	0.20	0.556	4.661
	55	17	0.300	0.32	1.634	1.492	1.095	3.651	0.20	0.327	7.149
	73	35	0.479	0.32	0.998	1.492	0.669	3.638	0.20	0.200	11.667
	69	31	0.449	0.32	1.086	1.492	0.728	3.638	0.20	0.217	10.719
	78	42	0.538	0.32	0.840	1.492	0.563	3.584	0.20	0.168	13.649
	141	43	0.304	0.32	1.616	1.492	1.083	4.586	0.20	0.323	9.082
	88	50	0.565	0.32	0.774	1.492	0.519	3.640	0.20	0.155	15.041
	80	43	0.538	0.32	0.840	1.492	0.563	3.611	0.20	0.168	13.754
	58	28	0.482	0.32	0.990	1.492	0.663	3.395	0.20	0.198	10.973
	55	22	0.400	0.32	1.244	1.492	0.833	3.497	0.20	0.249	8.997
66	19	0.281	0.32	1.722	1.492	1.154	3.856	0.20	0.344	7.168	
เฉลี่ย	75	29	0.380	0.32	1.438	1.492	0.964	3.785	0.20	0.288	9.710

ตารางที่ ๓.6 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการประเมินพื้นที่ในการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของระบบ RAS-SF

ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ $1.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ระบบ	c_i (mg/l)	X (mg/l)	ce/c_i	t (d)	K_1 (d^{-1})	$\theta^{(26.87-20)}$	K_{20}	$\ln(c_i-ce)$	d (m)	$K_1 * d$	A (m^2)
SF	44	20	0.455	0.14	2.446	1.49	1.639	3.170	0.45	1.101	1.843
	72	16	0.222	0.14	4.666	1.49	3.127	4.025	0.45	2.100	1.227
	81	21	0.253	0.14	4.262	1.49	2.856	4.103	0.45	1.918	1.369
	68	22	0.316	0.14	3.572	1.49	2.394	3.839	0.45	1.607	1.529
	98	31	0.316	0.14	3.570	1.49	2.393	4.205	0.45	1.607	1.675
	120	60	0.500	0.14	2.150	1.49	1.441	4.094	0.45	0.968	2.708
	114	45	0.392	0.14	2.908	1.49	1.949	4.241	0.45	1.308	2.074
	177	55	0.312	0.14	3.615	1.49	2.422	4.803	0.45	1.627	1.890
	117	37	0.316	0.14	3.576	1.49	2.396	4.384	0.45	1.609	1.744
	106	34	0.321	0.14	3.527	1.49	2.364	4.277	0.45	1.587	1.724
	160	58	0.359	0.14	3.178	1.49	2.130	4.633	0.45	1.430	2.073
เฉลี่ย	105	36	0.342	0.14	3.406	1.49	2.283	4.161	0.45	1.533	1.805



ภาคผนวก ๑

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Comparison of Surface and Subsurface Flow Constructed Wetlands for Water Reclamation Of *Hybrid Catfish* Culture Under High Hydraulic Loading Rates

Sasivimon Sudsaen^{1,a}, Jareeya Yimrattanabovorn^{2,b}

^{1,2} School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

^a sor_envi11@hotmail.com, ^b chareeya@sut.ac.th

Keywords: constructed wetlands, reclamation, *Hybrid Catfish*, aquaculture

Abstract. The main objective of the present study was to investigate the possibility of water reclamation by using wetlands for *Hybrid Catfish* culture under high hydraulic loading rates for saving water resources. Two water systems, control aquaculture system (CAS) and reclamation aquaculture system (RAS) were constructed at Suranaree University of Technology, Nakhon ratchasima Province, Thailand. CAS consists of two *Hybrid Catfish* culture ponds and RAS consists of four *Hybrid Catfish* culture ponds, two culture ponds for water reclamation by using Free Water Surface (FWS) constructed wetlands and another two culture ponds for subsurface (SF) constructed wetlands. The wetland systems were supplied the wastewater from *Hybrid Catfish* culture ponds with hydraulic loading rates (HLR) of 0.32, 0.64 and 1.28 m³/m²-d respectively. The COD, TSS, TP and TKN removal efficiencies of FWS and SF were measured. The *Hybrid Catfish* in RAS and CAS were measured the production and blood analysis. The results showed the COD and TSS removal efficiencies of FWS and SF were similar in the range of 58.60-71.82% and 58.56-69.91%, respectively. The TKN removal efficiency of FWS is higher than SF whereas the TP removal efficiency of SF is higher than FWS. The water qualities in culture ponds of RAS were in the range of standard for aquaculture but COD and NH₄⁺ were higher than standard. These might be because of the feeding and waste of fish. However, the COD and NH₄⁺ of the culture tank were nearly the same in the two systems. The results of production and blood analysis were no significant differences between the CAS and RAS. The areas of constructed wetland to *Hybrid Catfish* culture in this study at hydraulic loading rates 0.64 and 1.28 m³/m²-d were lower. It was concluded that wetlands under high hydraulic loading rates could be used for water reclamation of *Hybrid Catfish* culture.

Introduction

Aquaculture is an important industry and requires large amount of water resource, land area and discharges contain considerable quantities of organic matter, nitrogen and phosphorus and can further degrade the water quality in receiving water adversely impacting the environmental. The oxidation pond is used as wastewater system for aquaculture. These is a natural treatment system, biodegradable, Photosynthesis and fermentation. However, these method treatment need long hydraulic retention time (HRT) and large area [1]. Constructed wetlands have been used to treat acid mine drainage, storm water runoff, municipal wastewater, industrial wastewater and agricultural [2]. Constructed wetlands system is characterized by the advantages of moderate capital costs low energy and maintenance requirements, and benefits of increased wildlife habitat [3]. This used lower area site for wastewater treatment than oxidation pond system [4]. Constructed wetland

can remove significant amounts of suspended solids, organic matter, nitrogen, phosphorus, trace elements and microorganisms contained in wastewater [2]. Previous studies [5,6,7,8,9,10,11] have demonstrated that constructed wetlands can efficiently remove the major pollutants of aquaculture. Researchers used a constructed wetland in recirculating aquaculture system for shrimp culture. They succeeded in the performance of constructed wetlands and survival rate in culture system with 90% water recycling[12]. The main objective of the present study was to investigate the possibility of water reclamation by using constructed wetland for *Hybrid Catfish* culture under high hydraulic loading rates for saving water of the culture tank and determine area requirement of constructed wetland.

Material and Methods

Hybrid Catfish culture systems

As shown in Fig. 1, two water systems, CAS and RAS, were constructed at Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. CAS consisted of two *Hybrid Catfish* culture ponds, and RAS consisted of four *Hybrid Catfish* culture ponds, two culture ponds for water reclamation by using Free Water Surface (FWS) constructed wetlands, and other two culture ponds for subsurface (SF) constructed wetlands. The culture pond was 0.5 m of diameter and 0.5 m of water depth and consisting of 37 *Hybrid Catfish* per pond. The dimension of constructed wetland tank was 0.5 x 1.0 x 0.5 m (W x L x H), and umbrella plant (*Cyperus involucra* Rottb.) were cultivated in constructed wetland.

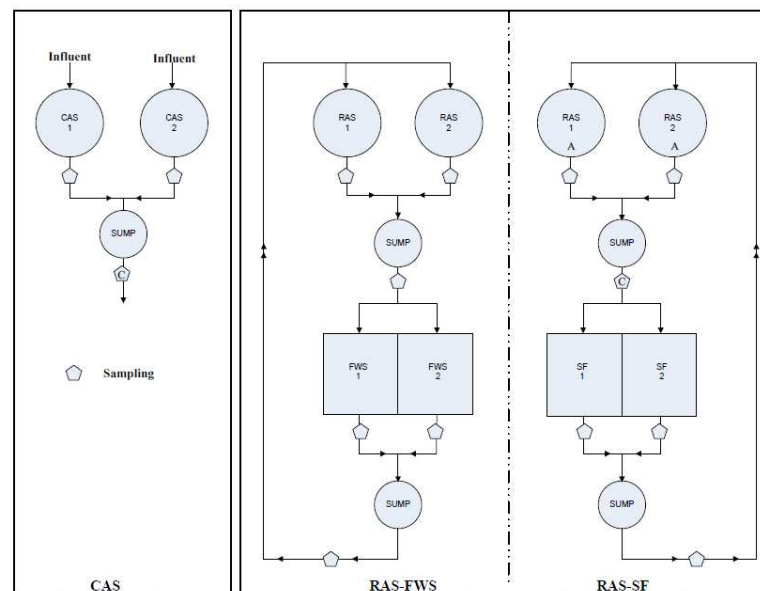


Fig.1 Schematic diagram of the reclamation aquaculture system (RAS) and the control culture system (CAS)

Sampling and analysis

Inlet and outlet of constructed wetlands were sampled and analyzed chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), total phosphorus (TP) and total Kjeldahl nitrogen (TKN). The water in each culture pond was analyzed for temperature, pH, dissolved oxygen (DO), transpiration depth, alkalinity, COD and ammonia (NH_4^+) of water quality. All the analytical measurements were carried out according to Standard Methods [13]. The *Hybrid catfish* 12 fish from each pond were sampled and measured for production and blood analysis. The results were tested statistically by Paired test and ANOVA, at significance level of 0.05 for each data.

Constructed wetland area estimates

It is well recognized that pollutant removal in constructed wetland can be described using first-order kinetic model. This model is given below, when omitting the background pollutant concentration [2];

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-Kt) \quad (1)$$

Where C_0 = influent pollutant concentration (mg/l), C_e = effluent pollutant concentration (mg/l), t = nominal hydraulic retention time (day), k = first-order removal rate constant (day^{-1}). Eq.1. can be rearranged to provide an estimate of constructed wetland area needed of wastewater treatment aquaculture construction:

$$A = \frac{Q(\ln C_i - \ln C_e)}{k \epsilon h_w} \quad (2)$$

Where Q = flow rate of wastewater (m^3/d), A = the total wetland area (m^2), ϵ = porosity of media in wetland pond and h_w = water depth of wetland (m)

Results and Discussion

Removal efficiency of FWS and SF constructed wetlands

The COD, TSS, TP and TKN removal efficiencies of FWS and SF were shown in Fig.2. The results showed that the FWS had removal efficiencies of COD and TSS similar with the SF. The results of COD and TSS removal efficiencies of the FWS were found in the range of 58.60-71.82 % and 64.00-69.91% respectively. The SF were found in the range of 58.87-66.82% and 58.56-64.6 % respectively. The stactical test of the three hydraulic loading rates by ANOVA showed no significant differences ($p > 0.05$). The FWS has TKN removal efficiency higher than the SF because FWS had decomposition process by nitrification and denitrification [14], whereas the SF had TP removal efficiency is better than the FWS. The main mechanisms of removal TP include sedimentation adsorption and filtration that media of SF more than FWS [15]. The removal efficiencies of TKN and TP of FWS were in the range of 84.11-69.31% and 52.78-61.55% respectively. The results of SF were in the range of 59.87-73.45% and 67.78-74.60% respectively.

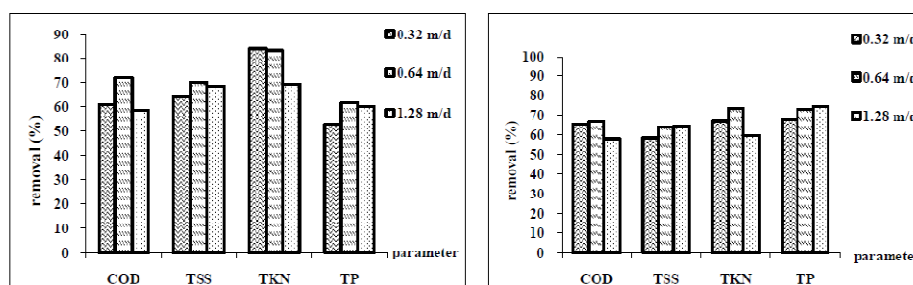


Fig.2 Removal efficiency of FWS and SF

Water quality effluent of the wetland

As shown in Table 1, treatment results of water quality by the RAS-FWS and RAS-SF wetland were in the range of standard [16,17]. The RAS-FWS and RAS-SF could be treat wastewater reclamation for aquaculture.

Table 1 Treatment results of water quality by the RAS-FWS and RAS-SF wetland

Parameter	concentration (mg/l)						standard (mg/l)
	0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=9)		0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=11)		1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=15)		
	FWS	SF	FWS	SF	FWS	SF	
COD	40 ± 18.58	16 ± 8.3	33 ± 9.2	38 ± 8.4	25 ± 14.1	34 ± 14.47	< 50
TSS	17 ± 9.07	13 ± 6.98	10 ± 4.65	12 ± 6.07	21 ± 8.5	30 ± 12.8	< 225
TP	0.188±0.07	0.140±0.007	0.011±0.004	0.010±0.005	0.011±0.001	0.007±0.002	< 0.5
NH ₄ ⁺	0.42 ± 0.07	0.56 ± 0.1	0.42 ± 0.09	0.52 ± 0.13	0.28 ± 0.11	0.28 ± 0.10	0.02 – 1
NO ₂ ⁻	0.006±0.003	0.005±0.003	0.016±0.004	0.02±0.006	0.007±0.002	0.011±0.003	< 0.1
NO ₃ ⁻	0.300±0.027	0.236±0.031	0.180±0.07	0.174±0.03	0.181±0.021	0.176±0.017	0 – 3

Water quality in culture tank

As shown in Table 2, the water qualities of culture pond of RAS and CAS were in the range of standard for aquaculture [16], but COD and NH₄⁺ were higher than standard. There might be because of the feeding and waste of fish. However the COD and NH₄⁺ of the culture tank were nearly the same in the two systems. The concentration of Alkalinity, COD and NH₄⁺ were significantly (p<0.05) but DO, pH, transpiration depth and turbidity were no significant differences (p>0.05) between water quality of RAS and CAS.

Table 2 Water quality in the culture pond of the RAS and CAS

HLR (m ³ / m ² -d)	System	DO (mg/l)	Temp. (°C)	pH	Trans. Depth (cm)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	COD (mg/l)	NH ₄ (mg/l)
Std.*		>5	27 – 29	7.5-8.5	30-60	5-10	10-400	<50	0.02-1
0.32	CAS	9.37	27.76	7.64	26.89	9.44	341.06	89.00	1.14
	RAS-FWS	8.19	27.50	7.84	27.95	9.30	375.61	90.18	1.35
	RAS-SF	8.88	27.41	7.77	26.37	9.27	369.22	74.41	1.05
0.64	CAS	8.51	27.54	7.71	32.91	8.00	118.59	134.64	1.42
	RAS-FWS	8.41	27.45	8.13	31.55	8.50	131.09	164.73	1.95
	RAS-SF	8.50	27.60	8.22	31.05	8.56	145.73	171.09	1.30
1.28	CAS	8.23	27.83	8.00	32.67	8.67	79.40	95.93	1.26
	RAS-FWS	8.26	27.95	7.92	31.07	9.08	130.60	59.27	1.12
	RAS-SF	8.17	27.18	8.06	30.33	10.04	146.47	112.07	0.94

*Standard of water quality for aquaculture

Production and blood analysis of *Hybrid Catfish*

As shown in the Table 3, the results of weight, length, average daily weight gain (ADG), percentage weight gain (WG), specific growth rate (SGR) and feed conversion ratio (FCR) of *Hybrid Catfish* in ponds shown no significant difference between the RAS and CAS ($p > 0.05$) as shown in Fig.3. At the end of the study on 45 day of each hydraulic loading rate, the survival rates of *Hybrid Catfish* in the RAS were 98.75-100%. The Hematocrit (Hct) and Hemoglobin (Hb) results of *Hybrid Catfish* in CAS and RAS were in the range of literatures [18,19,20,21,22] shown in the Table 4 and there were no significant differences ($p > 0.05$) among the three hydraulic loading rates, as shown in Fig.4. The results of water quality in culture tank in this study were in the range of standard for aquaculture. These relationships are productivity and health of *Hybrid Catfish*.



Table 3 The results of production of *Hybrid Catfish* in CAS and RAS

Production	H.I.R 0.32 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=12)			H.I.R 0.64 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=12)			H.I.R 1.28 m ³ m ⁻² d ⁻¹ (n=12)		
	CAS	RAS-FWS	RAS-SF	CAS	RAS-FWS	RAS-SF	CAS	RAS-FWS	RAS-SF
Weigh (g)	23.30±2.41	24.27±2.70	22.75±1.72	39.00±2.01	38.84±1.09	38.74±2.74	23.34±1.15	21.97±0.97	21.97±1.06
Length (cm)	13.98±1.33	14.03±1.12	14.14±1.18	16.89±0.66	16.86±0.71	16.93±0.72	16.15±1.38	15.93±1.10	15.83±1.36
ADG (g/d)	0.25 ± 0.06	0.27 ± 0.05	0.23 ± 0.05	0.48 ± 0.53	0.48 ± 0.55	0.48 ± 0.53	0.26 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.25 ± 0.03
Weight gain (%)	100 ± 37.65	102 ± 26.12	93 ± 28.85	141 ± 34.84	140 ± 31.39	139 ± 28.67	106 ± 13.68	104 ± 12.87	104 ± 14.69
SGR (%/d)	1.50 ± 0.42	1.55 ± 0.28	1.44 ± 0.34	1.85 ± 0.31	1.84 ± 0.29	1.84 ± 0.26	1.60 ± 0.15	1.58 ± 0.14	1.58 ± 0.16
FCR	0.72 ± 0.20	0.63 ± 0.12	0.75 ± 0.17	0.54 ± 0.06	0.55 ± 0.08	0.55 ± 0.09	0.45 ± 0.05	0.46 ± 0.05	0.46 ± 0.06
Survival rate (%)	100 ± 0.00	100 ± 0.00	99.25±1.06	100 ± 0.00	100 ± 0.00	98.75±1.77	100 ± 0.00	100 ± 0.00	100 ± 0.00



0.64	CAS	9.53 ± 1.20	28.88 ± 5.43
	RAS-FWS	11.02 ± 1.39	33.38 ± 3.50
	RAS-SF	10.65 ± 1.94	33.04 ± 5.77
1.28	CAS	6.28 ± 1.56	17.70 ± 5.79
	RAS-FWS	6.69 ± 2.20	21.22 ± 6.57
	RAS-SF	8.00 ± 1.25	24.79 ± 3.68

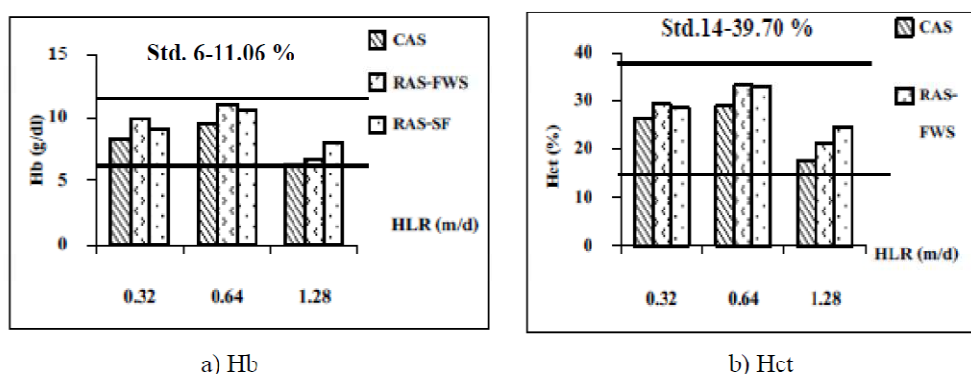


Fig. 4 The blood analysis (Hb and Hct) of CAS and RAS .

Removal rate constant

Average first-order removal rate constant in the RAS-FWS and RAS-SF during hydraulic loading rates of 0.32, 0.64 and 1.28 m³/m² d was determined by substituting mean influent and effluent concentration of the pollutant into Eq.1. and the solving for k_T . The values from this study and comparative U.S.EPA were summarized in Table 5. For RAS-FWS 0.30, 0.758 and 1.438 d⁻¹; for RAS-SF 0.802, 1.834 and 3.406 d⁻¹ respectively. RAS-SF K_T values were higher than those of RAS-FWS. The hydraulic loading that might affect removal rate constant with increased hydraulic loading rates, removal rate constant with the increase. The results of removal rate constant at hydraulic loading rates of 0.64 and 1.28 m³/m²-d, where are higher than k_T of U.S.EPA.[15]

Table 5 k_T values in RAS-FWS and RAS-SF

HLR (m ³ /m ² -d)	K_T (d ⁻¹)	
	RAS-FWS	RAS-SF
0.32	0.303	0.802
0.64	0.758	1.834
1.28	1.438	3.406
U.S.EPA	0.747	1.647

*Calculated at temperature 26.87 °C

Constructed wetland area estimation

Eq.2. showed that wetland area required for a recirculating aquaculture system depends on the removal rate constant, flow rate, wetland and culture tank depths, influent and effluent concentration. Among these factors, removal constant is the most critical as a design parameter, since removal rate constant was dependent on hydraulic loading rates and hydraulic loading rates

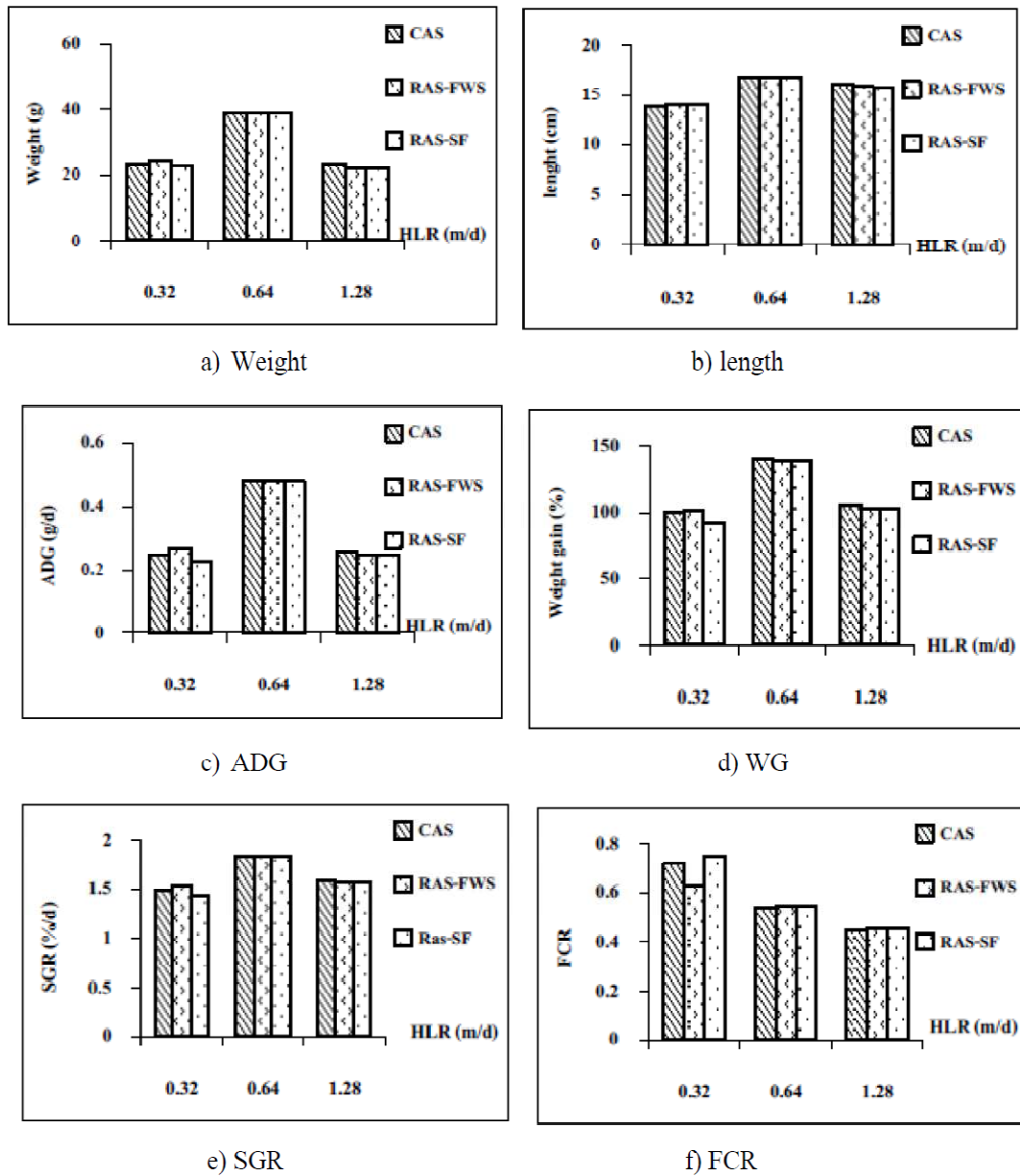


Fig.3 The *Hybrid Catfish* productions of CAS and RAS

Table 4 The results of hematocrit (Hct) and hemoglobin (Hb) of *Hybrid Catfish* in CAS and RAS

HLR (m ³ /m ² -d)	Constructed wetland	Hb (g/dl)	Hct (%)
Literatures		6 – 11.09	14 – 39.70
0.32	CAS	8.37 ± 1.82	26.58±4.94
	RAS-FWS	9.95 ± 1.77	29.33±4.33
	RAS-SF	9.17 ± 1.75	28.25±5.43

was related to constructed wetlands. The constructed wetland area estimate was shown in Table 6. RAS-FWS at hydraulic loading rates of 0.32, 0.64 and 1.28 m³/m²-d were 11.86, 10.00 and 9.71 m². For RAS-SF, they were 2.00, 1.85 and 1.81 m² respectively. RAS-SF used lower area site than RAS-FWS. This results with increased hydraulic loading rates, but area for constructed wetland showed decreased rates. In this study area site at 0.64 and 1.28 m³/m²-d was lower than that of U.S.EPA.[15]

Table 6 Constructed wetland area estimate for RAS-FWS and RAS-SF

HLR (m ³ /m ² -d)	results	Area (m ²)	
		RAS-FWS	RAS-SF
0.32	This study	11.86	2.00
	U.S.EPA	6.25	1.26
0.64	This study	10.00	1.85
	U.S.EPA	12.49	2.52
1.28	This study	9.710	1.81
	U.S.EPA	24.89	5.04

Conclusion

It was concluded that constructed wetlands system could treat wastewater from *Hybrid Catfish* cultures under high hydraulic loading rates and reclamation for *Hybrid Catfish* cultures. The FWS was good in TKN removal efficiency whereas the SF was a good in TP removal efficiency. And the constructed wetlands could be operated under high hydraulic loading rates to reclaim water for *Hybrid Catfish* cultures.

In general, RAS-FWS and RAS-SF could be helpful to treat the aquaculture, can effectively remove the major pollutants from the culture tank and provide high water quality and good culture environment and this wetland unit required no more mechanical facilities and energy input except the sump pump and water level controller. These results showed that they needed a smaller area site to treat wastewater from *Hybrid Catfish* cultures than the oxidation pond.

Acknowledgements

This study was supported by Suranaree University of Technology and The Thailand Research Fund for Window II 2009, MRG-WII525E070.

References

- [1] U.S. EPA. Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment. Ohio: United States Environmental Protection Agency. (1988).
- [2] R.II. Kadlec and R.L. Knight. Treatment Wetlands. Lewis Publishers, New York. (1996)
- [3] Information on http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_water.cfm
- [4] International Water Association. London, IWA Publishing (2000).
- [5] T. Koottatep, C. Polprasert, N. T. K. Oanh, N. Surinkul, A. Montangero and M. Strauss. AIT, Thailand. (2002)
- [6] S.C. Ayaz. Desalination. Vol.226(2008), p.249-255.
- [7] D.P.L. Rousseau, E. Lesage, A. Story, P.A. Vanrolleghem and N.D. Pauw. Desalination. Vol.218(2008), p.181-189.
- [8] Y-F. Lin, S-R. Jing and D-R. Lee. Envi. Pol., vol. 123 (2003), p. 107-113.
- [9] S. Sirianuntapiboon, M. Kongchum and W. Jitmaikasem. Aquac., Vol.1(2006), p.027-037.

- [10] W.H. Zachirt II, A.T. Hanson, J.A. Saucedo and K.M. Fitzsimmons. *Aquac. Eng.* vol.39 (2008), p.16-23.
- [11] P.D. Sindilariu, C. Schulz and R. Reiter. *Aquac.* Vol.270(2007), p.92-104.
- [12] Y-F. Lin, S-R. Jing, D-Y. Lee and T-W. Wang. *Aquaculture.* Vol.209(2002), p.169-184.
- [13] APHA, AWWA and WEF Standard methods for the examination of water and wastewaters (20th ed.). Washington D.C.: American Public Health Association (1998).
- [14] C. Schulz, J. Gelbrecht and B. Rennert. *J Appl. Ichthyol.* Vol.20(2004), p. 64-70.
- [15] Y-F. Lin, S-R. Jing, D-Y. Lee, and T-W. Wang. *Aquaculture.* Vol.209(2002), p.169-184.
- [16] J.W. Meade. *Aquaculture management.* New York: Van Nostrand Reinhold. (1989).
- [17] C.S. Tucker, and J.A. Hargreaves. *Dev aquacul fish sci.* vol.34(2004). New York: Elsevier.
- [18] F. Ahmadifar, Azari, Takami, A. Gh. and M. Sudagar. *Nutrition.* vol.8 (2009), p. 227-232.
- [19] G.K. Oluyemi, E.A Adeparusi and J. Olanrewaju. *Animal Sci.* vol. 2(2008), p. 17-21.
- [20] K. Supamattaya, J. Ruangsri, R. Ruggamol, A. Songpradit, S. Bhuvanath and W. Promkhunthong. *Sci. Technol.* vol. 27(2005), p. 321-332.
- [21] D.M. Sabri, M.A.E-H. El-Danasoury, I.A.E-M. Eissa, and H.M. Khouraiba. *Int. J. Agric. Biol.* Vol.11(2009), p.228-230.
- [22] M.A.A. Metwally and I.M. Fouad. *Word J. of fish and marine Sci.* vol. 1(2009), p.115-120.



Certificate of Participation

This is to certify that

Basiumon Sudsaen

has attended as

Presenter

in

2011 International Conference on Civil Engineering and Building Materials (2011 CEBM)

organized by

Kunming University of Science and Technology

on

29th-31st July 2011

at the

Century Dynasty Hotel, Kunming, China

Rongxin Guo

Professor Rong-Xin Guo, Chairman of 2011 CEBM



SHT
International Association of
Scientific and High Technology



TYLIN INTERNATIONAL CHINA
林同校国际中国

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศศิวิมล สุดแสน เกิดเมื่อวันที่ 11 กันยายน 2527 ที่จังหวัดยโสธร สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยในขณะที่ศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนและวิจัยสำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และทุนวิจัยมหาบัณฑิตจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2552 เพื่อทำวิจัยเรื่อง “การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลางในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาคุณกุ่มภายใต้สภาวะอัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์สูง”

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความวิชาการเรื่อง “Comparison of Surface and Subsurface Flow Constructed Wetlands for Water Reclamation of *Hybrid Catfish* Culture Under High Hydraulic Loading Rates” ในงานประชุมวิชาการ *2011 International Workshop on Environmental Engineering and Technology (IWEET 2011)* ในระหว่างวันที่ 29-31 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 ณ เมืองคุนหมิง ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน