

การบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

นาย กฤตธี วงศ์สถิตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-533-058-2

**TREATMENT OF SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER USING
CONSTRUCTED WETLANDS**

Mr. Krittee Wongsathit

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2001

ISBN 974-533-058-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

TREATMENT OF SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER USING CONSTRUCTED
WETLANDS

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ)
ประธานกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ดร.ธรรมรัตน์ คุณตะเทพ)
กรรมการ

.....
(ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)
กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤตธี วงศ์สถิตย์ : การบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

(TREATMENT OF SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER USING CONSTRUCTED WETLANDS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ, 79 หน้า. ISBN 974-533-058-2

การศึกษาในครั้งนี้มีจุดประสงค์ที่จะทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) ที่ใช้พืช 2 ชนิดคือ กกกลม และชุกฤต เป็นพืชโผล่พ้นน้ำ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆคือ 3, 7, 11 และ 15 วัน โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพืชทั้งสอง รวมถึงการกำจัดสารอาหารคือ N และ P ซึ่งมีความเข้มข้นสูงในน้ำเสียดังกล่าว

จากการศึกษาพบว่า เนื่องจากน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่เข้าสู่ระบบมีค่าความสกปรกสูงมาก ระบบที่ใช้พืชทั้งสองจึงมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียโดยรวมใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ระบบมีความสามารถในการกำจัด COD ประมาณ 97% และพืชทั้งสองมีความสามารถในการกำจัดสารอาหารไม่แตกต่างกัน คือ มีความสามารถในการกำจัด N เท่ากับ 90% ส่วนความสามารถในการกำจัด P เท่ากับ 92 % ปัจจัยสำคัญในการกำจัด N คือ การดูดซึมของพืช โดยเมื่อทำการวิเคราะห์จากการตัดพืชที่ระยะเวลา 8 สัปดาห์พบว่าการสะสมในพืชเท่ากับ 58% และอายุของพืชมีผลต่อความสามารถในการดูดซึม N ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตัดพืชในช่วงเวลาที่เหมาะสม ส่วนการดูดซึม P ของพืชมีน้อยกว่าการดูดซึม N เพราะจากการวิเคราะห์หาปริมาณ P ในดินพืชพบว่า มีการสะสมในพืชเท่ากับ 28%

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมามีค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองนั้นแตกต่างกับค่าที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมามาก เนื่องจากน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์มีปริมาณของแข็งอินทรีย์ปนเปื้อนสูง เป็นผลให้สิ่งมีชีวิตต้องใช้เวลาในการย่อยสลายที่ยาวนาน

KRITTEE WONGSATHIT : TREATMENT OF SLAUGHTERHOUSE
WASTEWATER USING CONSTRUCTED WETLANDS THESIS ADVISOR :
ASSIST. PROF. CHONGCHIN POLPRASERT, Ph.D. 79 PP. ISBN 974-533-058-2

TREATMENT/SLAUGHTERHOUSE/WASTEWATER/CONSTRUCTED/WETLANDS

This study was conducted to investigate the efficiency of the free water surface constructed wetlands for treatment of slaughterhouse wastewater, using two types of emergent plants, namely cattail and bulrush. The effects of hydraulic retention time (HRT) were observed to evaluate the performance of these systems for the COD and nutrients removal.

Because of a very strong concentration of wastewater influent used in this study, the two systems were found to have the same performance. The COD removal efficiency was about 97%. Similarly, the nutrient removal in both systems was not different. The removal efficiencies were 90 and 92% for N and P, respectively. The important factor of nitrogen removal was plant uptake, which was analyzed from the amount of plant cut after a period of 8 weeks. The plant uptakes were 58% for N and 28% for P. The plant age was found to have an influence on the plant uptake performance; thus the appropriate period of plant harvesting was necessary.

The mathematical models used in this study were compared with those in the literature. From the model analyses, the constant values in this study were different from those of the literature because the wastewater contained a high concentration of organic solids, thereby requiring a longer period of time for the microorganisms to degrade.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือและการสนับสนุนของหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกเรื่อง รวมถึง ดร. ธรรมรัตน์ กุตตะเทพ และ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคุณมานพ จรโลกกรวด ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คุณนิรันดร์ คงฤทธิ์, คุณชนกพร หนูหอม, คุณวรุทัย เดชตานนท์, คุณสุภกิติห์ สมศรี, คุณพัชรินทร์ ราโช, คุณศศิธร มณฑิพย์, คุณพิจิตรา ชโยปถัมภ์, คุณปรกรณ์ พวงกระจาย และ คุณอุบล สุริพล ตลอดจนเพื่อนๆบัณฑิตศึกษา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ทำให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยเหลือในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าสำเร็จลงได้ด้วยดี

สุดท้าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้ความสนับสนุนในด้านการศึกษา และให้เกียรติในการตัดสินใจในทุกเรื่อง ตลอดจนเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดเสมอมา

กฤตธี วงศ์สถิตย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	3
2.2 พีชโผล่พื้นน้ำ.....	4
2.3 สารอาหาร.....	6
2.3.1 ไนโตรเจน.....	8
2.3.2 ฟอสฟอรัส.....	8
2.4 การสูญเสียจากการระเหย.....	9
2.5 การถ่ายเทออกซิเจน.....	11
2.6 ดิน.....	13
2.7 สิ่งมีชีวิต.....	13
2.8 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ.....	15
2.8.1 ระยะเวลาเก็บกัก.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8.2	อัตราภาระอินทรีย์.....	16
2.8.3	การออกแบบแบบจำลองการกำจัด BOD.....	16
2.8.4	การออกแบบแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจน.....	19
2.8.5	การออกแบบแบบจำลองการกำจัดฟอสฟอรัส.....	20
2.8.6	การศึกษาสารติดตามสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว.....	20
2.9	การจัดการระบบ.....	21
2.9.1	การจัดการพืช.....	21
2.9.2	การควบคุมกลิ่น.....	22
2.10	น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์.....	23
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1	การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	26
3.2	การสร้างแบบจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	27
3.3	การเตรียมพืช.....	30
3.4	การเตรียมน้ำเสีย.....	30
3.5	การดำเนินการทดลอง.....	30
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	32
4.1	การศึกษาสารติดตาม.....	32
4.2	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง.....	34
4.3	ประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34
4.3.1	ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS.....	36
4.3.2	ประสิทธิภาพการกำจัด N และ P.....	38
4.3.3	ประสิทธิภาพการกำจัดตัวแปรอื่น ๆ.....	39
4.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	40
4.4.1	แบบจำลองการกำจัด BOD.....	40
4.4.2	แบบจำลองการกำจัด N.....	43
4.4.3	แบบจำลองการกำจัด P.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การเจริญเติบโตของพืชโผล่พ้นน้ำ.....	45
4.6 อัตราการผลิต.....	46
4.7 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	48
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การศึกษาสารติดตาม.....	58
ภาคผนวก ข ประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	62
ภาคผนวก ค แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะของพีชโคล์พ่นน้ำที่ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....6
2.2	ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และอัตราการรับสารอาหารในพีชโคล์พ่นน้ำ... 11
2.3	สรุปเกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว..... 15
2.4	สรุปกระบวนการและการเปลี่ยนรูปขององค์ประกอบในน้ำเสีย สำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....17
2.5	ค่าการกระจายของการไหล..... 21
2.6	ลักษณะน้ำเสียของโรงฆ่าสัตว์แต่ละชนิด.....23
2.7	น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์แบบรวม.....23
3.1	ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....25
3.2	การออกแบบแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการดำเนินการวิจัย.....30
4.1	สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาติดตาม..... 32
4.2	ลักษณะของน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่ใช้ในการศึกษา.....34
4.3	สรุปค่าการออกแบบอัตราการไหลของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 34
4.4	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากระบบบำบัด.....35
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบเปรียบเทียบกับค่า OLR.....36
4.6	ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS.....36
4.7	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS ของระบบ.....37
4.8	ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัด N และ P.....38
4.9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด N และ P ของระบบ.....39
4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตัวแปรอื่น ๆ.....40
4.11	การพิจารณาระดับนัยสำคัญของแบบจำลองการกำจัด BOD.....42
4.12	สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองแบบจำลองการกำจัด BOD.....42
4.13	เปรียบเทียบค่าจากการทดลองในแต่ละแบบจำลองการกำจัด N.....44
4.14	การพิจารณาระดับนัยสำคัญของแบบจำลองการกำจัด P.....45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15	สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองแบบจำลองการกำจัด P.....45
4.16	อัตราผลผลิตพืชและสารอินทรีย์ในดินที่ได้จากการทดลอง..... 48
4.17	ผลการวิเคราะห์หาค่า N และ P ในผลผลิตพืชที่ตัดออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.... 50
4.18	เปรียบเทียบร้อยละของ TN ที่ออกจากระบบโดยกระบวนการกำจัดต่าง ๆ.....51
4.19	เปรียบเทียบร้อยละของ TP ที่ออกจากระบบโดยกระบวนการกำจัดต่าง ๆ.....51
5.1	สรุปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ของระบบที่ใช้พืชทั้งสองชนิด....53
1ก	ผลการทดลองและการคำนวณของรูปฤาษี.....59
2ก	ผลการทดลองและการคำนวณของกกกลม.....61
1ข	อุณหภูมิน้ำเสียในบ่อทดลอง.....64
2ข	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ใช้กกกลมที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ ในช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่.....65
3ข	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ใช้รูปฤาษีที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ ในช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่.....66
4ข	ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ของกกกลม.....67
5ข	ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ของรูปฤาษี.....67
6ข	ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ.....68
7ข	ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากระบบ.....68
8ข	ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในแง่ของความเข้มข้นของตัวแปรต่างๆ.....69
9ข	ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในแง่อัตราการบรรทุก..... 70
10ข	น้ำหนักของพืชที่ตัดออก.....71
11ข	สัดส่วนของ MLVSS ในชั้นดิน.....71
1ค	ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....73
2ค	ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด BOD ของกกกลม.....74
3ค	ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด BOD ของรูปฤาษี..... 74
4ค	แบบจำลองการกำจัด BOD.....75
5ค	ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด P ของกกกลม..... 76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6ค ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด P ของรูปฤาษี.....	76
7ค แบบจำลองการกำจัด P.....	77
8ค ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มในแบบจำลองการกำจัด N ของกกลม.....	78
9ค ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มในแบบจำลองการกำจัด N ของรูปฤาษี.....	78

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว.....5
2.2	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ดิน.....5
2.3	พืชไผ่พื้นน้ำ.....7
2.4	วัฏจักรไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....10
2.5	กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำ.....12
2.6	เปรียบเทียบลักษณะของชั้นดินในช่วงเริ่มปลูกพืชและช่วงที่พืชโตแล้ว.....14
2.7	กิจกรรมของโรงฆ่าสัตว์.....25
3.1	บ่อดูดอง.....26
3.2	ภาพตัดขวางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....27
3.3	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง.....28
3.4	ทางออกน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว.....28
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CI กับเวลาของการศึกษาสารติดตามสำหรับกกกลม.....31
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CI กับเวลาของการศึกษาสารติดตามสำหรับรูปถ่าย.....32
4.3	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์.....40
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง OLR กับอัตราผลผลิตพืช.....46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biological Oxygen Demand
COD	=	Chemical Oxygen Demand
d	=	Dispersion Number
ET	=	Evapotranspiration
FWS	=	Free Water Surface System
ha	=	Hectare
HRT	=	Hydraulic Retention Time
H ₂ S	=	Hydrogen Sulfide
NH ₄ -N	=	Ammonia Nitrogen
NO ₃ ⁻ - N	=	Nitrate Nitrogen
OLR	=	Organic Loading Rate
SFS	=	Subsurface Flow System
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TN	=	Total Nitrogen
TP	=	Total Phosphorus
TSS	=	Total Suspended Solids
VSB	=	Vegetated Submerged Beds System

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

แนวคิดในการนำพืชไหล่น้ำมาใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้เริ่มต้นเมื่อช่วงต้น ค.ศ.1970 โดยมีการศึกษาในเยอรมันตะวันตก เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม (Seidel, 1976; Seidel et al, 1978) หลังจากนั้นก็ได้มีการทำการศึกษาแพร่หลายเข้าสู่ประเทศเนเธอร์แลนด์ (Kok, 1974; De Jong, 1976) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการใช้ *Eichhornia Crassipes* บำบัดน้ำโสโครก (Wolverton and McDonald, 1975) นอกจากการนำพืชไหล่น้ำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังมีการนำพืชลอยน้ำ เช่น แหน และผักตบชวา มาใช้บำบัดน้ำเสียอีกด้วย แต่ต่อมามีการค้นพบว่า พืชไหล่น้ำมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าพืชลอยน้ำ กล่าวคือ การใช้พืชไหล่น้ำทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากกว่าพืชลอยน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อระบบ (Seidel, 1976; De Jong, 1976)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีศักยภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง หรือการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Grey, 1989) และระบบมีศักยภาพเป็นที่น่าเชื่อถือและง่ายต่อการควบคุม ตลอดจนมีความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย (Reed, 1980) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติ ประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ พืชไหล่น้ำหลักที่มีอยู่ในระบบได้แก่ ธูปฤาษี (Typha), กก (Scirpus) และอ้อ (Phragmites) จากการศึกษาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์พบว่า สามารถลดความเข้มข้นของ Biochemical Oxygen Demand (BOD) ได้ 50-90%, ของแข็งแขวนลอย 60-90%, ไนโตรเจน 30-95% และฟอสฟอรัส 10-90% สำหรับน้ำเสียชุมชน (Reed, 1980) และจากการศึกษาในระดับห้องทดลองของ Kessomboon (1990) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูงมากในการบำบัดน้ำเสียจากคอกหมู โดยเฉพาะในส่วนของ การกำจัดเชื้อโรค และจากผลของการศึกษาดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้มีความสนใจในการนำน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ ซึ่งเป็นกิจกรรมสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับมนุษย์ เพราะเป็นแหล่งผลิตอาหารจำพวกเนื้อสัตว์ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค มาทำการบำบัดโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ลักษณะของน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์สามารถจำแนกโดยรวมได้เป็น 2 แบบคือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสัตว์ รวมทั้งชิ้นส่วนของสัตว์ และส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ เลือดสัตว์ รวมถึง

น้ำที่ใช้ในการชำระทำความสะอาดโรงเรือน และเนื้อสัตว์ ซึ่งมีสารทำความสะอาดและสารฆ่าเชื้อโรคปนเปื้อนอยู่ด้วย

ดังนั้น เมื่อทำการพิจารณาทั้งจากลักษณะของน้ำเสีย งบประมาณในการออกแบบและดำเนินระบบ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่มีความน่าสนใจและเหมาะสมในหลายด้าน รวมถึงยังไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อย่างจริงจัง และระบบนี้ยังมีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทยซึ่งมีปัจจัยที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.2.2 ศึกษาจลศาสตร์การบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยมุ่งเน้นการกำจัด COD และ BOD รวมทั้งสารอาหาร คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำจากลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), Nitrate Nitrogen (NO_3^- -N), Total Phosphorus (TP), Coliform Bacteria และ Oil & Grease

1.3.2 วิเคราะห์ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ของพืช 2 ชนิดในแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ อันได้แก่ กกกลม และรูปฤาษี โดยพิจารณาจากลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อดูประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.3.3 วิเคราะห์หาอัตราภาระอินทรีย์ (Organic Loading Rates) และระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสม สำหรับการดูดซึมของพืชแต่ละชนิด เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการไหลและปริมาตรของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สำหรับวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ

1.3.4 วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหาร (Nutrient Removal) คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.3.5 วิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) สำหรับการกำจัดสารอาหารของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำ คือ พื้นที่ซึ่งมีชั้นน้ำอยู่เหนือหรือใต้ระดับผิวดิน โดยต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำและมีการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพืช พื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาตินั้นมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียและฟอกสารพิษที่มีอยู่ในน้ำเสีย แต่ก็มีข้อจำกัดขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการควบคุมการไหล และความสามารถในการเข้าไปรบกวนของส่วนประกอบในน้ำเสียต่อที่อยู่อาศัยของสัตว์และระบบนิเวศน์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) คือ ระบบที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยภายในระบบประกอบด้วยอาหารที่อิ่มตัว, พืชโคล่พื้นน้ำและพืชใต้น้ำ, สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก และน้ำ โดยเลียนแบบจากพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติซึ่งมนุษย์ใช้ประโยชน์ และเป็นการแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในระบบตามธรรมชาติ เพื่อให้พื้นที่ชุ่มน้ำมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น

พืชที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำ มีความสำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) กิ่ง, ก้าน และใบของพืชมีประโยชน์ในการเพิ่มพื้นที่การเกาะติดของประชากรสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก
- 2) พืชพวกนี้มีความสามารถในการถ่ายเทแก๊สในบรรยากาศ รวมทั้งออกซิเจนลงสู่
ราก

จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาพัฒนาเพื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่มีความคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการเดินระบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 แบบ คือ

- 1) แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free water surface system, FWS)
- 2) แบบไหลใต้ดิน (Vegetated submerged beds system, VSB หรือ Subsurface flow systems, SFS)

ระบบทั้งสองมีความแตกต่างกันในด้านรูปแบบของการไหล, ตัวกลาง และชนิดของพืชโคล่พื้นน้ำที่ใช้ โดยพืชโคล่พื้นน้ำที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในระบบได้แก่ ธูปฤาษี, กก, และอ้อ

ภาพที่ 2.1 แสดงพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว เป็นระบบที่ประกอบด้วยรางขนาดยาว ซึ่งมีสภาพพื้นรางที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ และวัสดุที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ น้ำเสียจะไหลผ่านพื้นผิว ทำให้น้ำเสียสามารถสัมผัสกับอากาศได้โดยตรงก่อนซึมลงสู่พื้น ระดับน้ำมีความลึกไม่มากนัก อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.6 เมตร WPCF (1990) กำหนดค่าการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดังนี้ ความสูงของน้ำต่ำกว่า 0.40 เมตร ค่าภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติเท่ากับ 0.4 ถึง 4.0 เซนติเมตรต่อวัน และ 0.7 ถึง 5.0 เซนติเมตรต่อวัน สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว กล่าวกันว่า ระบบนี้เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับประเทศที่อยู่ในเขตร้อน เนื่องจากมีพื้นที่ขนาดใหญ่ และใช้เงินลงทุนต่ำ

ภาพที่ 2.2 แสดงพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ดิน เป็นระบบที่น้ำเสียไหลในชั้นใต้ของพื้นดิน ทำให้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Root Zone หรือ Rock-Reed filters เพราะจะมีการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและรากพืชโดยตรง ระบบนี้ประกอบด้วยรางซึ่งมีพื้นที่น้ำเสียไม่สามารถซึมผ่านได้ และชั้นตัวกลางเช่น ดิน กรวด หิน หรือวัสดุอื่นๆที่พืชสามารถขึ้นได้ ในระบบนี้รากพืชมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการแลกเปลี่ยนออกซิเจน และสภาพนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ควรออกแบบให้ชั้นดินมีความสูงไม่เกิน 0.6 เมตร

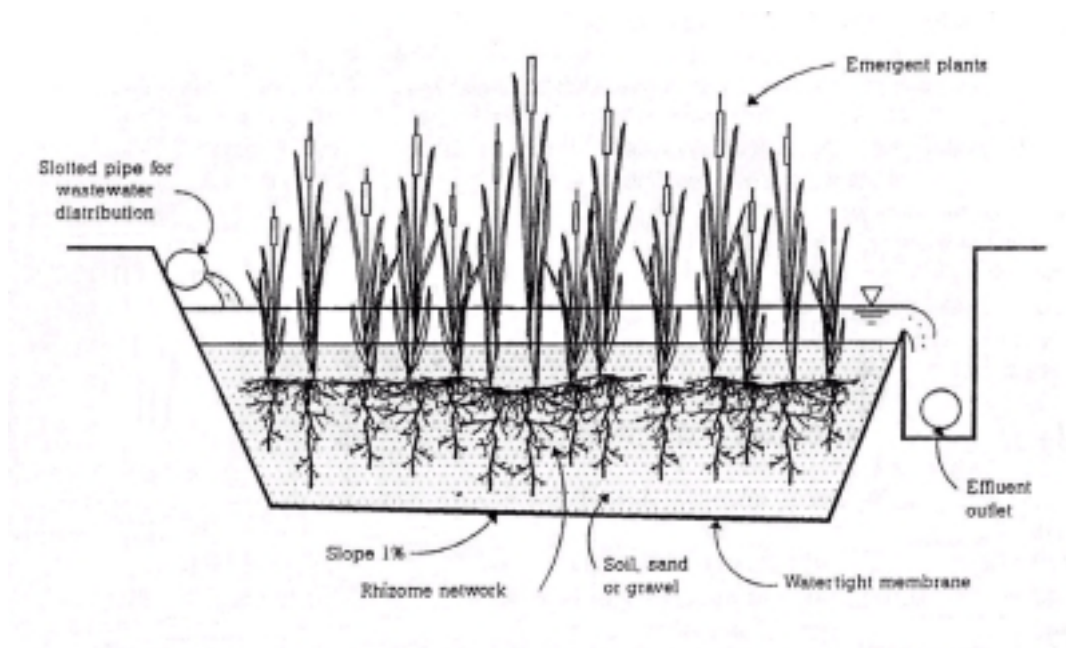
WPCF (1990) กำหนดค่าการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินดังนี้ ความสูงของน้ำต่ำกว่า 0.40 เมตร ค่าภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินเท่ากับ 2.0 ถึง 20 เซนติเมตรต่อวัน

2.2 พืชโผล่พื้นน้ำ

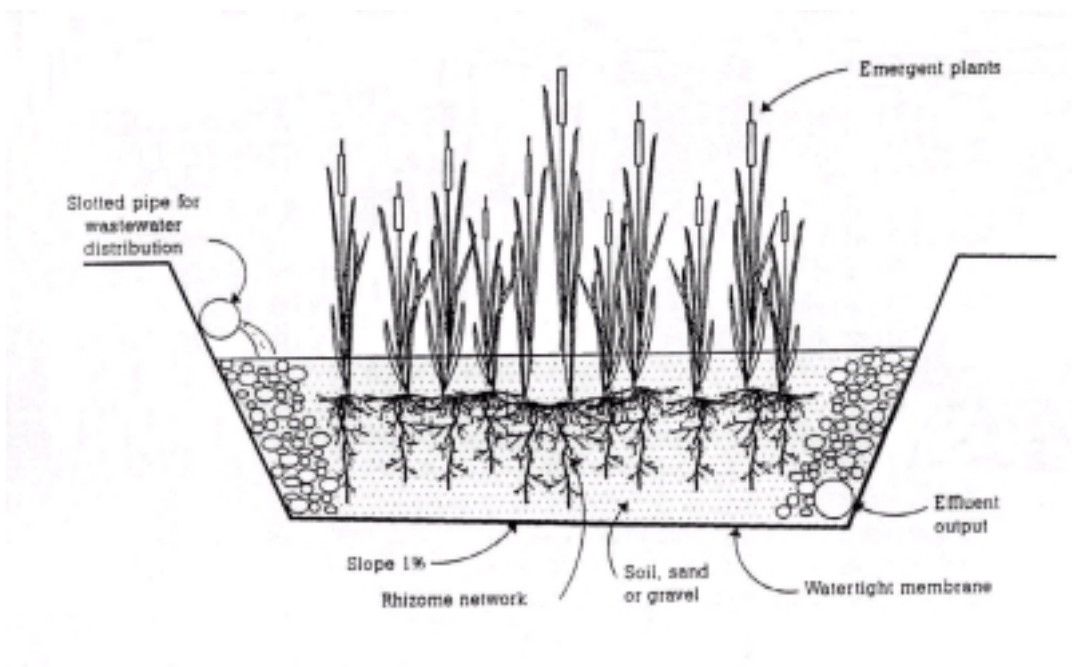
พืชโผล่พื้นน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น ธูปฤาษี กก อ้อ และหญ้าแฝก เป็นต้น ซึ่งพืชเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะตัวคือ เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชื้นแฉะ ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม เติบโตง่ายและแข็งแรง สามารถหามาปลูกได้ง่ายในทุกพื้นที่

ภาพที่ 2.3 แสดงพืชโผล่พื้นน้ำ (Emergent Plant) 2 ชนิดที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ กกกลม *Cyperus corymbosus* และธูปฤาษี *Typha angustifolia* โดยพืชโผล่พื้นน้ำแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

กกกลม *C. corymbosus* เป็นไม้ล้มลุกที่พบได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะในที่ชื้นแฉะตามหนองบึง รางระบายน้ำ มีใบเดี่ยวลักษณะคล้ายใบหญ้า ออกเป็นกระจุกที่โคนต้น ลำต้นมีลักษณะกลม สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 5-7 ทนความเค็มได้น้อยกว่า 0.5 ppt เจริญเติบโตด้วย rhizome มีการแตกกิ่ง สามารถขึ้นได้ดีในที่น้ำท่วมขัง ระดับน้ำที่สามารถอยู่ได้ดีคือ ไม่เกิน 0.50 เมตร ข้อดีของกกกลมคือ นำลำต้นไปใช้ทำเครื่องจักสานต่างๆ เช่น เสื่อ หมวก และกระเป๋า เป็นต้น นอกจากนี้



ภาพที่ 2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว



ภาพที่ 2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ดิน

นี้ ดอกและยอด ยังสามารถนำไปใช้ทำเยื่อกระดาษได้

รูปถ่าย *T. angustifolis* เป็นพืชที่มีลักษณะใบแคบยาว แผ่นใบด้านบนโค้งเล็กน้อยเพราะมีเซลล์หุ้มตัวคล้ายฟองน้ำหนาอยู่กลางใบ ส่วนด้านล่างแบน ดอกมีจำนวนมาก ติดกันแน่น ลักษณะคล้ายรูป พบได้ทั่วไป ช่วง pH ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตคือ 4-7 ทนความเค็มได้อยู่ในระดับ 15-30 ppt เจริญเติบโตได้เร็ว มีส่วนที่คล้ายราก (rhizome) ยาว ระดับความลึกของรากยาวประมาณ 0.30 เมตร สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความลึกน้ำไม่เกิน 0.30 เมตร ไม่นิยมใช้รูปถ่ายในแบบไหลใต้ดิน (SFS) เนื่องจากรากแทงได้ไม่ลึกนัก (Reed et al, 1995)

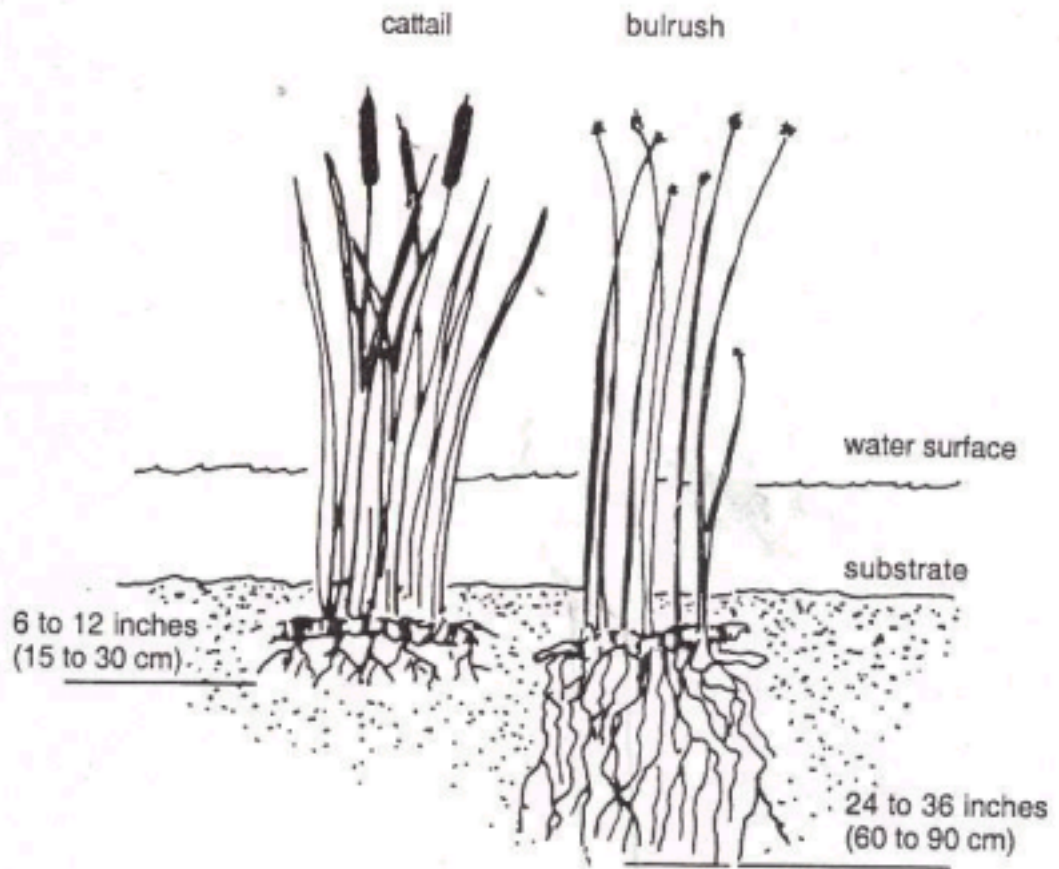
ข้อดีของรูปถ่าย คือเป็นพืชที่มีปริมาณของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตค่อนข้างสูง กากที่เหลือจากการสกัดเอาโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตออกแล้ว สามารถย่อยสลายได้ด้วยแบคทีเรียแบบแอนแอโรบิกจะได้ก๊าซมีเทน ซึ่งนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยังนำส่วนต่างๆ เช่น ลำต้น นำไปใช้เป็นเยื่อกระดาษได้ ดอก นำไปประดิษฐ์เป็นดอกไม้ประดิษฐ์ ส่วนปุยของดอกแก่ นำไปใช้ในการกรองไขมันได้อีกด้วย

2.3 สารอาหาร

ในการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย ต้องพิจารณาถึงการกำจัดสารอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์ เพราะประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบ ข้อจำกัดของการดูดซับสารอาหารของพืชได้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของพืชไหลใต้น้ำที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Stephenson et al, 1980)

พืช	ชื่อวิทยาศาสตร์	อุณหภูมิ		ช่วง pH ที่เหมาะสม	ค่าความเค็มสูงสุด (ppt)
		เหมาะสม	การเพาะเชื้อ		
กกกลม	<i>Scirpus spp.</i>	16-27	-	4-9	20
รูปถ่าย	<i>Typha latifolia</i>	10-30	12-24	4-10	30
อ้อ	<i>Phragmites australis</i>	12-23	10-30	2-8	45
แห้วทรงกระเทียม	<i>Carex spp.</i>	14-32	-	5-7.5	-



ภาพที่ 2.3 พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plants)

แก่ อัตราการเติบโตเฉลี่ย และความเข้มข้นของสารอาหาร ในเยื่อของพืช (Plant Tissue) สารอาหารสำคัญต่อระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ให้ความสำคัญในการวิจัย ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

2.3.1 ไนโตรเจน

ไนโตรเจน (Nitrogen) ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในดินตะกอนในรูปของสารไนโตรเจนอินทรีย์ รองลงมาคือในพืช และสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่สามารถนำไปใช้ได้ดินตะกอน การกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น ต้องเกิดกลไกหลัก 3 อย่างคือ

- Nitrification/Denitrification
- การระเหยของแอมโมเนีย (Volatilization of Ammonia)
- การดูดซึมของพืช (Uptake of plants)

Bevor et al (1995) ได้รายงานว่าการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียนั้น โดยทั่วไปแล้วสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดได้สูงถึงร้อยละ 79 เมื่อน้ำเสียมีอัตราการไนโตรเจน (Nitrogen Loading Rates) ไม่เกิน $1,600 \text{ g-N/m}^2\text{-y}$ สำหรับกลไกในการกำจัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำที่นาน แต่กลไกสำคัญคือ การเกิดปฏิกิริยา Nitrification และ Denitrification โดยสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชุ่มน้ำ ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะลดลงหากเกิดสภาวะจำกัดของ

- ระยะเวลาเก็บกักน้อย หรืออัตราการน้ำ (Hydraulic Loading Rates) สูง
- อุณหภูมิต่ำ
- ค่าความเป็นกรดต่ำ หรือสูงเกินไป
- การเกิดสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen)
- ค่าอัลคาไลน์ดี (Alkalinity) ไม่เพียงพอที่จะสะเทินกรดจากปฏิกิริยา Nitrification

ภาพที่ 2.4 แสดงถึงวัฏจักรไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าไนโตรเจนที่มีอยู่ในสารอินทรีย์จะเคลื่อนตัวผ่านกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ, เคมี และชีวภาพเนื่องจากเกิดสภาวะการนำของปฏิกิริยาอินทรีย์นั่นเอง ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในส่วนของการกำจัดไนโตรเจนต่อไป

2.3.2 ฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำจะมาจากน้ำที่ไหลเข้า และการพัดพาของบรรยากาศ ส่วนใหญ่จะพบฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ ของแข็ง และฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูป

ของแข็ง ทั้งนี้อัตราการฟอสฟอรัส (Phosphorus Loading Rates) จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก่อนเข้าระบบและอัตราการระเหยน้ำโดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60-90 ซึ่งปัจจัยที่มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวคือ การเพิ่มระยะเวลาเก็บน้ำโดยลดอัตราการระเหยน้ำ

จากการศึกษาของ Adrock et al (1995) พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ร้อยละ 68 และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดได้มากกว่าร้อยละ 97

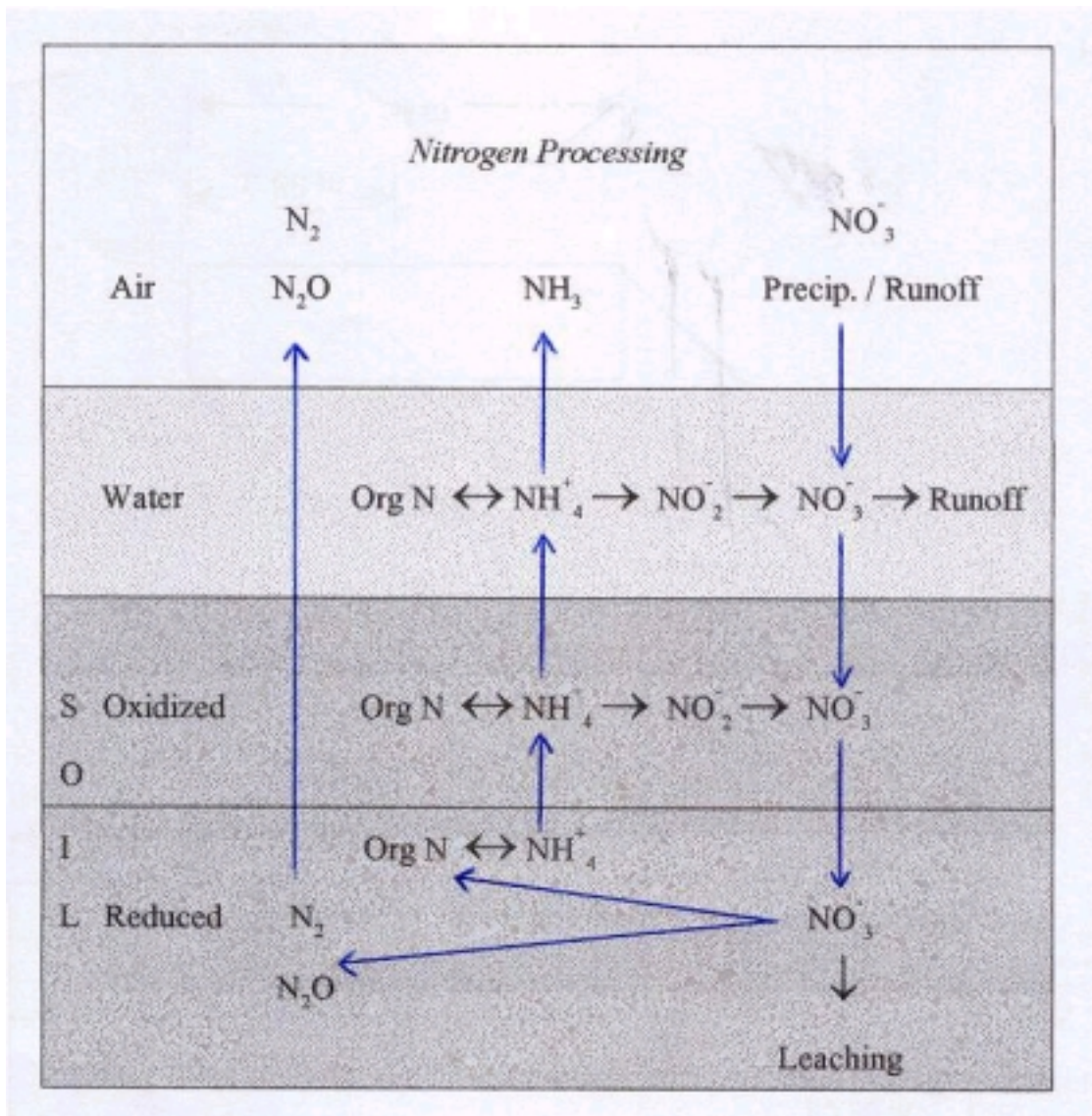
พืชโผล่พื้นน้ำแต่ละชนิดมีความสามารถในการรับสารอาหารได้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยจะสังเกตเห็นว่าธูปฤๅษีมีอัตราการรับสารอาหารต่อพื้นที่มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาในแง่สัดส่วนของสารอาหารในเนื้อเยื่อแล้วพบว่า น้อยกว่าในกก และอ้อ

กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำ แสดงในภาพที่ 2.5 โดยจะเห็นได้ว่าวงจรของฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำมีส่วนประกอบสำคัญหลายอย่างได้แก่ น้ำ พืช สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก อนุภาคต่างๆในระบบ และดิน ฟอสฟอรัสตามธรรมชาติที่เข้าสู่ระบบมาจากน้ำที่เข้าสู่ระบบ และการพัดพาในอากาศ ทั้งในรูปเป็ยกและแห้ง ส่วนฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบก็จะปนไปกับน้ำออก และซึมลงไปสะสมในชั้นดิน ฟอสฟอรัสบางส่วนก็ระเหยไปในอากาศ

กลไกของการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สำคัญที่สุดคือ การซึมลงไปสะสมในชั้นดิน ส่วนในแง่ของการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ของพืช และกิจกรรมการนำไปใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิตเช่น ปลา หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำถือเป็นส่วนน้อย

2.4 การสูญเสียจากการระเหย

ผลรวมของการสูญเสียน้ำจากการใช้ประโยชน์ของพืช และการระเหยของแปลงพื้นที่ชุ่มน้ำ เรียกว่า การระเหยผ่านใบ (Evapotranspiration, ET) การสูญเสียจากการระเหยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เกิดจากผลรวมของการระเหยจากผิวน้ำและการสูญเสียน้ำของพืชโผล่พื้นน้ำ การสูญเสียจากการระเหยขึ้นอยู่กับปัจจัยควบคุมต่างๆ เช่น แสงแดด, ลม, ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิ และวัสดุปกคลุม (Hammer and Kadlec, 1983) ในช่วงเดือนที่มีอากาศร้อนจะมีอัตราการสูญเสยจากการระเหยในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สูงขึ้น เป็นผลให้แนวโน้มของความเข้มข้นน้ำเสียที่อยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สูงเช่นกัน เมื่อปริมาณน้ำในระบบลดลง ระยะเวลาเก็บน้ำจะเพิ่มขึ้น ทำให้อาจเกิดสถานะแอนแอโรบิกขึ้นได้ (Reed et al, 1988; Roger et al, 1985) การวัดค่าการสูญเสยจากการระเหยจากการทดลองระดับห้องวิจัย พบว่าสามารถลดลงได้ถึง 50 % สำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเต็มระบบที่ใช้ถังขนาดเล็ก (Reed et al, 1988) Stephenson et al (1980) ได้นำเสนอรายงานการศึกษาว่า



ภาพที่ 2.4 วัฏจักรไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Faulkner and Richardson, 1989)

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส และอัตรารับสารอาหารในพืชไผ่พื้นน้ำ

พืชไผ่พื้นน้ำ	อัตรารับสารอาหาร		สัดส่วนของสารอาหารในเชื้อ		ปริมาณพืช (ton/ha)	ผลผลิต (ton/ha/y)
	N (kg/ha/y)	P (kg/ha/y)	N (g/kg)	P (g/kg)		
รูปถายี่	600-2,630	75-403	5-24	0.5-4.0	4.3-22.5	8-61
กก	125	18	8-27	1-3	-	-
อ้อ	225	35	18-21	2-3	6-35	10-60

(Reddy and Debusk, 1987)

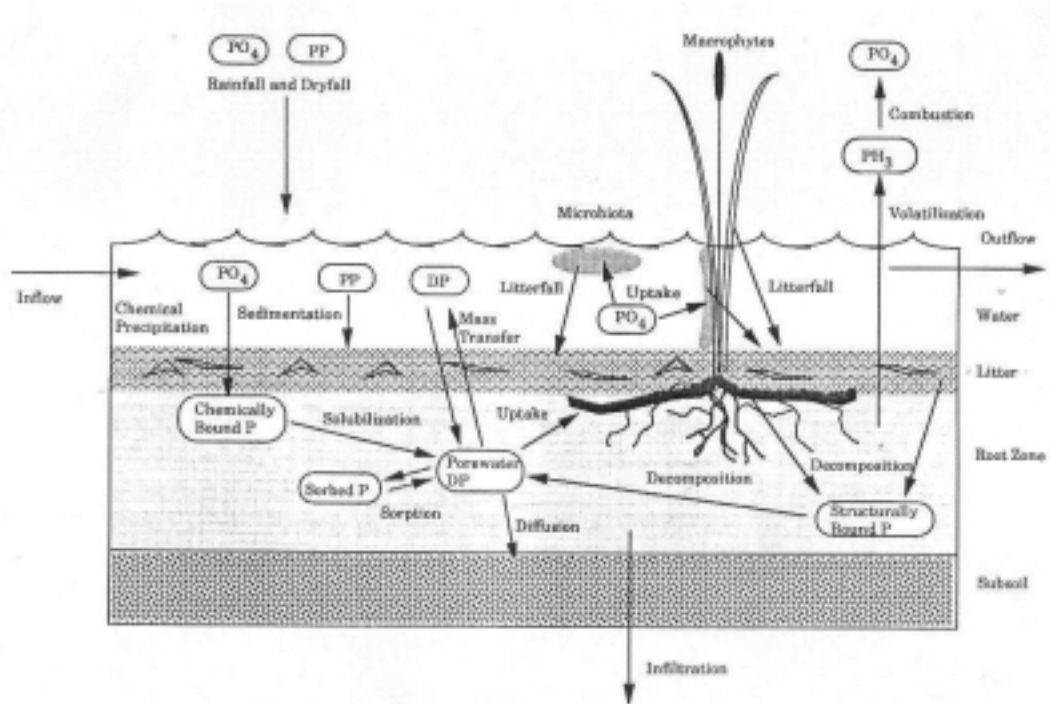
รูปถายี่ มีอัตราการระเหยต่ำ แต่มีค่าการสูญเสียจากการระเหยของใบสูง และในอินเดีย มีการศึกษาพบว่าอัตราการระเหยของรูปถายี่เป็น 1.3-1.6 เท่าของการระเหยของน้ำ ในขณะที่ไนโปแลนด์ พบว่าอัตราการระเหยของรูปถายี่เป็น 2.75-3.33 เท่าของการระเหยของน้ำเพื่อช่วยเพิ่มการสูญเสียจากการระเหยและดูแลรักษาอัตราการไหล ควรมีการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบกลับสู่ระบบอีกครั้งในช่วงฤดูหนาว (Metcalf & Eddy, 1991) ดังนั้น อัตราการระเหยจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบ

2.5 การถ่ายเทออกซิเจน

การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer) จากบรรยากาศสู่น้ำและเข้าสู่ระบบรากพืชผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเกิดขึ้นที่ใบพืช ในส่วนของดินซึ่งสัมผัสกับรากและไรโซมสามารถเกิดสภาวะแอโรบิกและแอนแอโรบิกได้ (Reed et al, 1988) เชื้อที่มีบทบาทสำคัญในการเคลื่อนที่ของออกซิเจนภายในพืชคือ *Aerenchyna*

พืชไผ่พื้นน้ำเช่น รูปถายี่ และกก สามารถดูดซับออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านทางใบ และกิ่งก้านของพืชที่อยู่เหนือน้ำ ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เข้าสู่รากต่อไป ออกซิเจนจากรากจะถ่ายออกสู่บริเวณราก (Root Zone) ทำให้เกิดสภาวะแอโรบิก ดังนั้น สภาวะแอโรบิกและสภาวะแอนแอโรบิกจึงเป็นส่วนประกอบของชั้นดินนั่นเอง Boon (1985) และ Reed (1988) ได้รายงานว่าพืชไผ่พื้นน้ำ

สามารถถ่ายเทออกซิเจนจากพื้นผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำได้ $5-45 \text{ g-O}_2/\text{m}^2\text{-d}$ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืช และระดับความเค็มของดิน (Soil Stress)



ภาพที่ 2.5 กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำ (Kadlec and Knight, 1987)

2.6 ดิน

สารอาหารส่วนใหญ่ที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ยกเว้นคาร์บอน ล้วนเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในดินรวมถึงโครงสร้างของดินก็เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยเฉพาะแบบไหลผ่านพื้นผิว เนื่องจากผลกระทบของสภาพนาทางชลศาสตร์ของชั้นดิน สภาพนาทางชลศาสตร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-3} ถึง 10^{-5} เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม ค่าการนำในระบบไหลผ่านพื้นผิวไม่ใช่ปัจจัยที่จำเป็นนัก เพราะชั้นดินนั้นเต็มไปด้วย กรวด, หิน และทราย ซึ่งมีการนำสูง (Cooper and Boon, 1987) ดินที่เหมาะสมกับการเจริญของพืชไหลผ่านน้ำส่วนใหญ่เป็นโคลน แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในวัสดุหลากหลายชนิด ช่องว่างของดินเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลใต้ผิว สำหรับแบบไหลพื้นผิว Miller and Black (1985) ได้แนะนำว่าตัวแปรที่สำคัญคือ ความสามารถในการซึมผ่านของดิน ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-7} เมตรต่อวินาที

ชั้นดินทั้งที่ผิวดินและชั้นใต้ผิวดินซึ่งมีค่าซึมผ่านต่ำ (< 0.5 เมตรต่อชั่วโมง) เป็นสภาพที่เหมาะสมกับพื้นที่ชุ่มน้ำ (Metcalf & Eddy, 1991) การตกตะกอนของของแข็ง และการก่อดวงของเมือกจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่จะเกิดอยู่ที่ช่องว่างของดิน ดังนั้นค่าสูญเสียการไหลซึมสู่ชั้นดินจะลดลง

ตามระยะเวลา ชั้นดินเหนียวหรือชั้นดินที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้สำหรับพื้นที่ที่ดินมีค่าการไหลซึมสูง

ภาพที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของชั้นดินในช่วงที่เริ่มปลูกพืช และในช่วงที่พืชโตแล้ว จากรูปแสดงให้เห็นว่าช่วงที่เริ่มมีการปลูกพืชใหม่ๆ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ ชั้นแอโรบิก และชั้นแอนแอโรบิกเล็กน้อย ส่วนในชั้นดินก็จะมีสถานะอึดตัวไปด้วยน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปพืชเริ่มเติบโตขึ้นและชั้นดินก็จะเริ่มมีการสะสมของสารอินทรีย์มากขึ้น ตลอดจนมีการทับถมของซากพืชที่ตายแล้วที่ผิวดิน ทำให้เกิดเป็นชั้นขวางกั้นระหว่างออกซิเจนในอากาศ และตะกอนในพื้นที่ชุ่มน้ำ สภาพของชั้นดินจึงก็เปลี่ยนแปลงไป โดยจะเกิดสถานะแอนแอโรบิกขึ้น คือที่ผิวดินจะเกิดสถานะแอนแอโรบิกเล็กน้อย ส่วนที่ระดับลึกลงไปจะเกิดสถานะแอนแอโรบิกมากขึ้น

2.7 สิ่งมีชีวิต

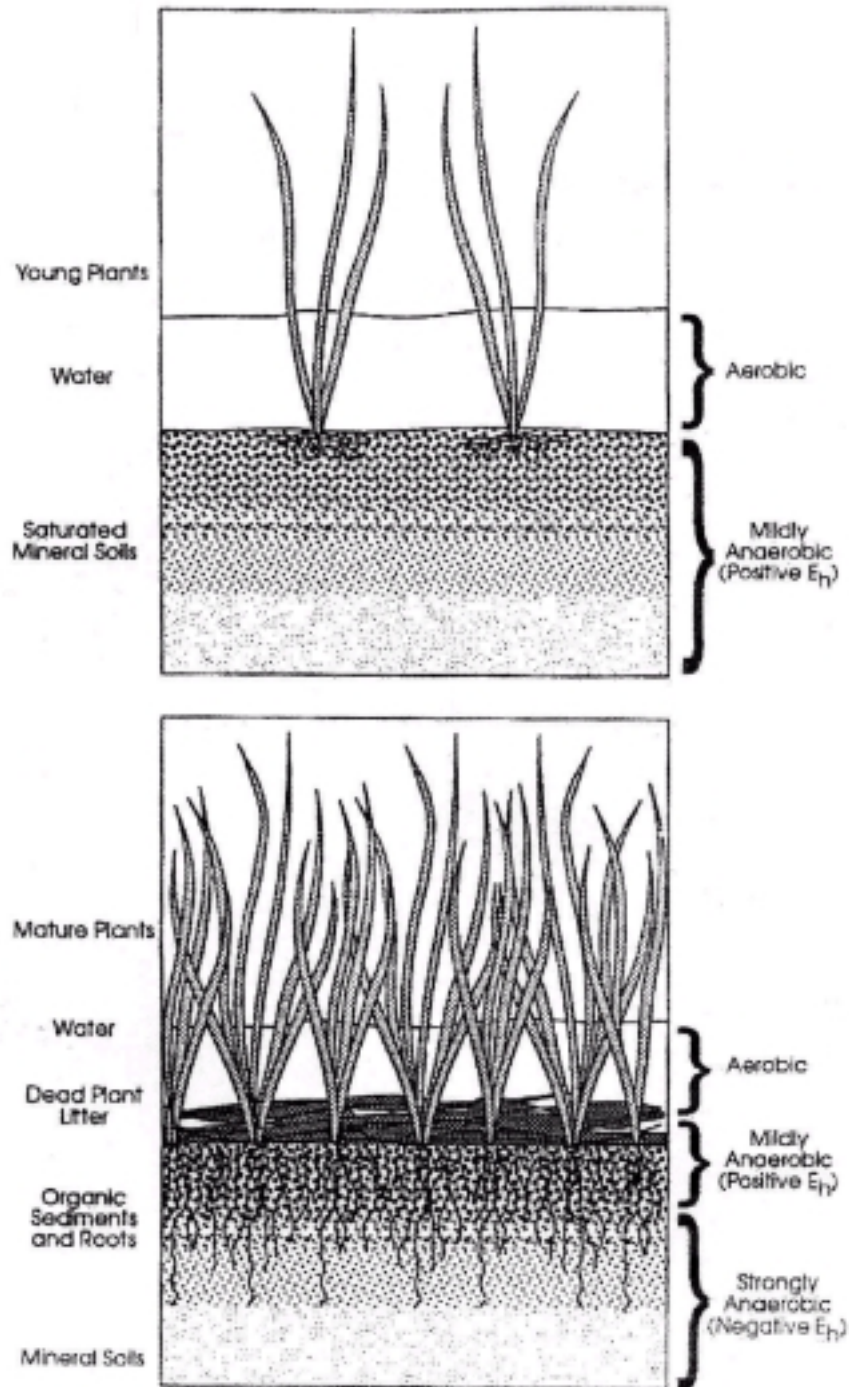
พื้นที่ชุ่มน้ำเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตมากมาย ทั้งขนาดใหญ่ อย่างเช่น หนู ตลอดจนถึงสัตว์ที่อาศัยอยู่ในที่ชื้นแฉะต่างๆ และสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กอย่าง แบคทีเรีย ฟังไจ และโปรโตซัว เพราะพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีสถานะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก กลุ่มของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มีความสำคัญกับระบบ คือ แบคทีเรีย และฟังไจเนื่องจากมันจะทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลาย ถ่ายเท และหมุนเวียนส่วนประกอบทางเคมีของสารอาหารซึ่งมีอยู่ในน้ำเสีย

2.8 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบระบบ

ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวได้มีการศึกษามากมาย โดยสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ามีการออกแบบที่หลากหลายซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละการศึกษา ทั้งในด้านสถานที่ตั้ง สภาพภูมิอากาศ ตลอดจนถึงลักษณะของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นในการตั้งเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลอง

2.8.1 ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ

ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (Hydraulic Retention Times: HRT) เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ต้องมีการออกแบบระยะเวลาที่กักเก็บน้ำให้เพียงพอต่อการเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาหรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ การออกแบบระยะเวลาที่กักเก็บน้ำที่ยาวนานเกินไปจะไม่เหมาะสมกับระบบ เนื่องจากสภาพน้ำนิ่งจะทำให้เกิดสถานะแอนแอโรบิกขึ้นได้ อันเป็นผลให้อัตราปฏิกิริยาการย่อยสลายมีค่าน้อยลง



ภาพที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะของชั้นดินในช่วงเริ่มปลูกพืชและช่วงที่พืชโตแล้ว

ตารางที่ 2.3 สรุปเกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

ตัวแปร	หน่วย	Crites (1994)	Metcalf & Eddy (1991)	WPCF (1990)	Reed et al (1988)
ระยะเวลากักเก็บน้ำ	Day	5-14	4-15	5-10	-
อัตราการระ BOD ₅	kg/ha/d	≤80	≤67	100-110	<112
ความสูงน้ำ	m	0.1-0.5	0.1-0.6	0.5	0.1-0.45
อัตราการระน้ำ	mm/d	7-60	14-47	25-50	-
พื้นที่ที่ต้องการ	ha/m ³ /d	0.002-0.014	0.002-0.007	0.003-0.004	-
อัตราส่วน ขาว ต่อ กว้าง	-	2:1 to 10:1	≥ 10:1	2:1	>10:1
ระยะเวลาเก็บเกี่ยว	ปีต่อครั้ง	3-5	-	1-5	-
การควบคุมยุง	-	ต้องการ	-	ต้องการ	ต้องการ

2.8.2 อัตราภาระอินทรีย์

อัตราภาระอินทรีย์ (Organic Loading Rates: OLR) ส่วนมากจะแสดงในหน่วยของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา (อาทิ kg/ha-day) ส่วนใหญ่ในรูปของ BOD ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะไม่ส่งผลโดยตรงกับการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สำหรับการบำบัดสารอาหารและมลพิษที่ปราศจาก BOD แต่มันก็เป็นตัวตรวจสอบที่ชัดเจนของสถานะแอโรบิกในระบบ ซึ่งมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย ตลอดจนการควบคุมยุงและกลิ่นอัตราภาระอินทรีย์สูงสุดสามารถทำการประมาณค่าได้โดยอยู่บนพื้นฐานต่อไปนี้ (Reed et al, 1988)

- อัตราการเคลื่อนย้ายออกซิเจนสำหรับพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งสมมติว่ามีค่าประมาณ 20 g/(m²-d)

- ความต้องการออกซิเจนซึ่งมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของภาระอินทรีย์

จากองค์ประกอบต่างๆของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสรุปกระบวนการและการเปลี่ยนรูปขององค์ประกอบในน้ำเสียได้ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นเปรียบเทียบทั้งในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลพื้นผิว และแบบไหลใต้ดิน โดยทั้งสองแบบมีกระบวนการและการเปลี่ยนรูปที่คล้ายกันในบางองค์ประกอบ และแตกต่างกันบ้างโดยเฉพาะในแง่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ

2.8.3 การออกแบบแบบจำลองการกำจัด BOD

การกำจัด BOD สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว สามารถอธิบายได้โดย แบบจำลองอันดับที่ 1 ของการไหลแบบท่อ (plug-flow) ดังสมการข้างล่าง

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad (2.1)$$

โดยที่ C_e = BOD₅ ออก, mg/L

C_0 = BOD₅ เข้า, mg/L

K_T = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, d⁻¹

t = ระยะเวลาที่กักเก็บ, d

จากการปรับปรุงแบบจำลองดังกล่าวโดย Reed et al, (1988) และทำการรวมตัวแปรอื่นเข้าไว้ เพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะสำคัญของพื้นที่ชุ่มน้ำสำหรับการกำจัด BOD ดังสมการ

$$\frac{C_e}{C_0} = F \exp\left[-\frac{0.7K_T (A_v)^{1.75} LW(d_m n + d_w)}{Q}\right] \quad (2.2)$$

โดยที่ F = เศษส่วนของ BOD₅ ที่ไม่สามารถกำจัดได้

0.7 = ค่าคงที่

A_v = พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก, m²/m³

d_m = ความลึกของชั้นดิน, m

d_w = ความลึกของน้ำจากผิวดิน, m

L = ความยาวของระบบ (ขนานกับเส้นการไหล), m

W = ความกว้างของระบบ, m

n = อัตราส่วนช่องว่างในชั้นดิน

Q = ภาวะชลศาสตร์เฉลี่ยในระบบ, m³/d, $(Q_{in} + Q_{out})/2$

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

เมื่อ K_{20} คือ ค่าคงที่ที่ 20°C และ θ คือ ตัวคูณค่าตรวจแก้อุณหภูมิ

ระยะเวลาที่กักเก็บ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 สรุปกระบวนการและการเปลี่ยนรูปขององค์ประกอบในน้ำเสียสำหรับระบบ
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Critics and Tchobanoglous, 1998)

องค์ประกอบ	ระบบไหลพื้นผิว, FWS	ระบบไหลใต้ดิน, SFS
สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ ทางชีวภาพ (Biodegradable Organic)	<ul style="list-style-type: none"> - การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพโดยสถานะแอโรบิก - การบ่ม (Facultative) - แอนแอโรบิกแบคทีเรียบนพืชและบนผิวสัมผัสตะกอนสะสม - การดูดซึม, การกรอง และการตกตะกอนของอนุภาค BOD <ul style="list-style-type: none"> - การตกตะกอน และการกรอง 	<ul style="list-style-type: none"> - การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพโดยแอนแอโรบิกแบคทีเรียบนพืช และบนผิวสัมผัสตะกอนสะสม
ของแข็งแขวนลอย (SS) ไนโตรเจน (N)	<ul style="list-style-type: none"> - ไนตริฟิเคชัน / ดีไนตริฟิเคชัน - การดูดซึมของพืช - การระเหย - การตกตะกอน 	<ul style="list-style-type: none"> - การกรอง และการตกตะกอน
ฟอสฟอรัส (P)	<ul style="list-style-type: none"> - การดูดซึมของพืช - การดูดซึมของพืช และที่ผิวสัมผัสของตะกอนสะสม 	<ul style="list-style-type: none"> - การกรอง - การตกตะกอน - การดูดซึมของพืช
โลหะหนัก (HM)	<ul style="list-style-type: none"> - การตกตะกอน - การระเหย - การดูดซึม 	<ul style="list-style-type: none"> - การดูดซึมของรากพืชและที่ผิวของตะกอนสะสม - การตกตะกอน
สารอินทรีย์ (Trace Organic)	<ul style="list-style-type: none"> - การย่อยสลายทางชีวภาพ - การลดลงตามธรรมชาติ - การล่า 	<ul style="list-style-type: none"> - การดูดซึม - การย่อยสลายทางชีวภาพ
เชื้อโรค (Pathogen)	<ul style="list-style-type: none"> - UV - การตกตะกอน - การปล่อย antibiotics ของรากพืช 	<ul style="list-style-type: none"> - การลดลงตามธรรมชาติ - การล่า - การตกตะกอน - การปล่อย antibiotics ของรากพืช

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{LW(d_m n + d_w)}{Q} = \frac{A(d_m n + d_w)}{Q} \quad (2.4)$$

เมื่อ A = พื้นที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำ, m^2

เมื่อนำสมการ (2-3) รวมกับ (2-4) ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{C_e}{C_0} = F \exp[-0.7K_T (A_V)^{1.75} t] \quad (2.5)$$

สมการ (2.2) สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังนี้

$$A = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e + \ln F)}{(A_V)^{1.75} K_T (d_m n + d_w)} \quad (2.6)$$

สมการนี้ทำให้สามารถประมาณค่าพื้นที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลพื้นผิว โดยมีค่าที่แนะนำสำหรับตัวแปรต่างๆ (Reed et al, 1988) ดังนี้

$$\begin{aligned} A_V &= 15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3 & F &= 0.52 & n &= 0.75 \\ K_{20} &= 0.0057 \text{ d}^{-1} & \theta &= 1.1 \end{aligned}$$

2.8.4 การออกแบบแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจน

จากการศึกษาพบว่า มีแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 2 แบบ โดย WPCF (1990) และ Knight et al (1993) โดยได้มาจากการวิเคราะห์ความถดถอยทางสถิติที่ได้จากการเก็บข้อมูล

สมการของ WPCF (1990)

$$A = \frac{0.01Q}{(0.645C_e - 0.125C_0 + 1.129)} \quad (2.7)$$

สมการของ Knight et al (1993)

$$C = 0.28L_w + 0.33C_0 \quad (2.8)$$

โดยที่ A = พื้นที่ผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำ, ha

C_0 = TN ไหลเข้า, mg N/L

C_e = TN ไหลออก, mg N/L

Q = อัตราการไหล, m³/d

L_w = อัตราการระบรทุกน้ำ, in/d

2.8.5 การออกแบบแบบจำลองการกำจัดฟอสฟอรัส

จากการศึกษาของ Kadlec and Knight (1996) พบว่า การกำจัด P เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยสามารถประมาณค่าการกำจัด P ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ดังสมการ 2.9

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp\left(\frac{K_A}{L_w}\right) \quad (2.9)$$

โดยที่ C_0 = TN ไหลเข้า, mg N/L

C_e = TN ไหลออก, mg N/L

K_A = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ต่อพื้นที่ = 1.07 in/d (27.4 mm/d)

L_w = อัตราการระบรทุกน้ำ, mm/d

2.8.6 การศึกษาสารติดตามสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลผ่านพื้นผิว

การศึกษาถึงลักษณะการกระจายของการไหลของแบบจำลองใช้วิธีการศึกษาสารติดตาม โดยใช้เกลือ (NaCl) เป็นสารติดตาม โดยในการคำนวณค่าการกระจาย ดังสมการของ Levenspiel (1992)

ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ย (Mean Retention Time); $T_{mean} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} \quad (2.10)$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน;
$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{mean}^2 \quad (2.11)$$

ดังนั้น
$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2} = 2d + 8d^2 \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.5 ค่า D/uL_1 อธิบายถึงสภาวะของการไหลโดยที่ หากค่า D/uL_1 สูง แสดงว่ารูปแบบการไหลเกิดการกระจายตัวมาก หากค่า D/uL_1 ต่ำการไหลเกิดการกระจายตัวต่ำ นั่นคือ เกิดสภาวะการไหลแบบ plug-flow นั่นเอง

ค่าการกระจายของการไหล (Dispersion Number, d) สามารถอธิบายได้ในรูปดังนี้

$$d = \frac{D}{uL_1} \quad (2.13)$$

โดยที่ t_i = ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ

C_i = ความเข้มข้นของ C_i ที่ออกจากระบบที่เวลาหนึ่ง

Δt = ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ

D = สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน

u = อัตราเร็วการไหล

L_1 = ระยะทางของไหลจากทางเข้าถึงทางออก

ตารางที่ 2.5 ค่าการกระจายของการไหล

D/uL_1	คำอธิบาย
0	เกิดสภาวะ plug-flow (เกิดการกระจายตัวน้อยมาก หรือ ไม่มีเลย)
0.002	เกิดการกระจายตัวเล็กน้อย
0.025	เกิดการกระจายตัวปานกลาง
0.2	เกิดการกระจายตัวมาก
∞	เกิดสภาวะการกวน (เกิดการกระจายตัวมากๆ)

2.9 การจัดการระบบ

จุดมุ่งหมายหลักของการจัดการระบบสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำรวมไปถึง การจัดการพืช, การควบคุมขุมและกลิ่น จุดมุ่งหมายของการจัดการระบบคือ

- ปรับปรุงให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ
- ลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและบำรุงรักษาระบบ
- ลดผลกระทบต่อสุขภาพและปัญหาความน่ารำคาญ

2.9.1 การจัดการพืช

ต้องดูแลพืชให้มีการเจริญเติบโตที่อย่างสม่ำเสมอ เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยควรให้ความหนาแน่นของพืช 5-10 #/m² และต้องมีการตัดแต่งพืชอย่างสม่ำเสมอเพื่อหลีกเลี่ยงการเน่าเปื่อย และการปล่อยสารอาหารออกมาของพืช ความลึกของน้ำเหนือผิวดินเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการอยู่รอดของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลผ่านพื้นผิวในช่วงปีแรกของการปลูก ซึ่งความลึกของน้ำที่เหมาะสมมีค่าไม่เท่ากันสำหรับพืชแต่ละชนิด

2.9.2 การควบคุมกลิ่น

ปัญหาเรื่องกลิ่นเป็นเรื่องปกติที่เกิดขึ้นในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งแก๊สที่ทำให้เกิดกลิ่น เช่น H₂S เมื่อเกิดสถานะแอนแอโรบิกในระบบ และมีระยะเวลาเก็บกักน้ำมากเกินไปจะเกิดปัญหากลิ่นขึ้น ดังนั้นต้องควบคุมระบบเพื่อหลีกเลี่ยงที่จะเกิดสถานะแอนแอโรบิก

2.10 น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์

กิจกรรมโรงฆ่าสัตว์ส่วนมากมีการเกิดน้ำเสียจาก 3 แหล่งด้วยกัน คือ คอกกักกันสัตว์ชั่วคราวก่อนฆ่า โรงฆ่า และโรงชำแหละ น้ำเสียจากแหล่งต่างๆข้างต้นเมื่อมารวมกันแล้วมีค่าความสกปรกเกิดขึ้นสูง และมีปริมาณน้ำเสียไหลทิ้งเป็นจำนวนมาก เพราะมีการใช้น้ำในการชำระล้างในทุกขั้นตอน โดยเฉพาะจากโรงฆ่าซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากเลือดสัตว์ เลือดสัตว์นี้มีปริมาณสารอาหารค่อนข้างสูง

โรงฆ่าสัตว์เทศบาลนครนครราชสีมา เป็นโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก มีปริมาณการฆ่าต่ำ และฆ่าสัตว์ไม่หลากหลาย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการฆ่าหมู มีอัตราการฆ่าประมาณ 30 ตัวต่อวัน และมีการปล่อยน้ำเสียประมาณ 100 m³ ต่อวัน น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมลงสู่บ่อพักน้ำเสียภายในบริเวณโรงฆ่าสัตว์ โดยผ่านตะแกรงเพื่อดักของแข็ง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องในสัตว์ออกก่อน จากนั้นจึงไหลลงสู่บ่อพักน้ำเสียต่อไป

กระบวนการต่างๆในโรงฆ่าสัตว์ส่วนใหญ่เป็นการฆ่า ของเสียที่ออกมาจากโรงฆ่าสัตว์จะมี สีแดงปนน้ำตาลเข้ม, มีค่า BOD สูง, และประกอบไปด้วยสารแขวนลอยต่างๆมากมาย น้ำเสียจาก โรงฆ่าสัตว์มีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกับน้ำเสียชุมชน ปริมาณมลสารต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียโรงฆ่า สัตว์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6 และ 2.7 โรงฆ่าสัตว์มีกิจกรรมหลักดังแสดงในภาพที่ 2.7 คือ เมื่อขน ส่งสัตว์มาสู่โรงฆ่าสัตว์แล้วก็นำสู่คอกกักสัตว์ชั่วคราวซึ่งในระหว่างนี้จะมีการฉีดน้ำเพื่อทำความ สะอาดตัวสัตว์ และเพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นกับสัตว์ด้วย ต่อจากนั้นก็นำสัตว์เข้าสู่โรงฆ่าก่อน ที่จะทำการชำแหละต่อไป จะเห็นได้ว่าในทุกๆขั้นตอนจะมีการใช้น้ำเสมอทำให้เกิดน้ำเสียจำนวนมาก และมีค่าความสกปรกสูงโดยเฉพาะในขั้นตอนการชำแหละ ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จะเป็นเลือด สัตว์ และน้ำล้างทำความสะอาด ดังนั้นจึงต้องมีระบบรวบรวมและบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมก่อน ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

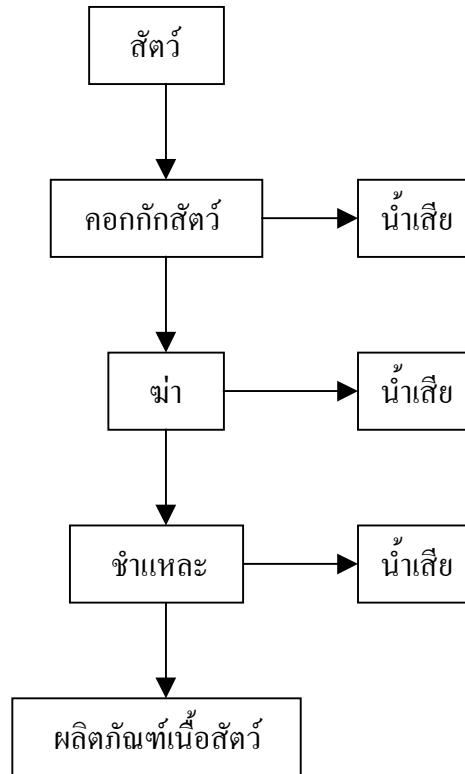
ตารางที่ 2.6 ลักษณะน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์แต่ละชนิด (Oanh, 1991)

แหล่งน้ำเสีย	COD, mg/L	SS, mg/L
ลานฆ่าวัว	2,280	1,160
กระบวนการแลเนื้อวัว	3,250	1,080
การลอกขนหมู	1,490	310
การชำแหละหมู	9,990	160
กระบวนการแลเนื้อหมู	2,970	1,250

ตารางที่ 2.7 น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์แบบรวม (Oanh, 1991)

ตัวแปร	หมู	วัว
อัตราการไหล, L/Head	880	1,840
COD _t , mg/L	710-1,310	1,090-1,770
COD _f , mg/L	270-700	400-750
BOD _t , mg/L	340-670	470-870
BOD _f , mg/L	80-310	290-380
SS, mg/L	210-350	280-550
VSS, mg/L	70-80	70-80
TKN, mg/L	53-99	58-105
NH ₃ -N, mg/L	25-42	27-53
TP, mg/L	17-30	22-32
Oil & Grease, mg/L	60-94	90-129
pH	6.9-7.5	7.2-7.6

หมายเหตุ : t = total และ f = filtrate



ภาพที่ 2.7 กิจกรรมของโรงฆ่าต้นต้ว

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ในการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ ต้องคำนึงถึงตัวแปรหลายๆหลายอย่าง ที่นำมาใช้ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของระบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

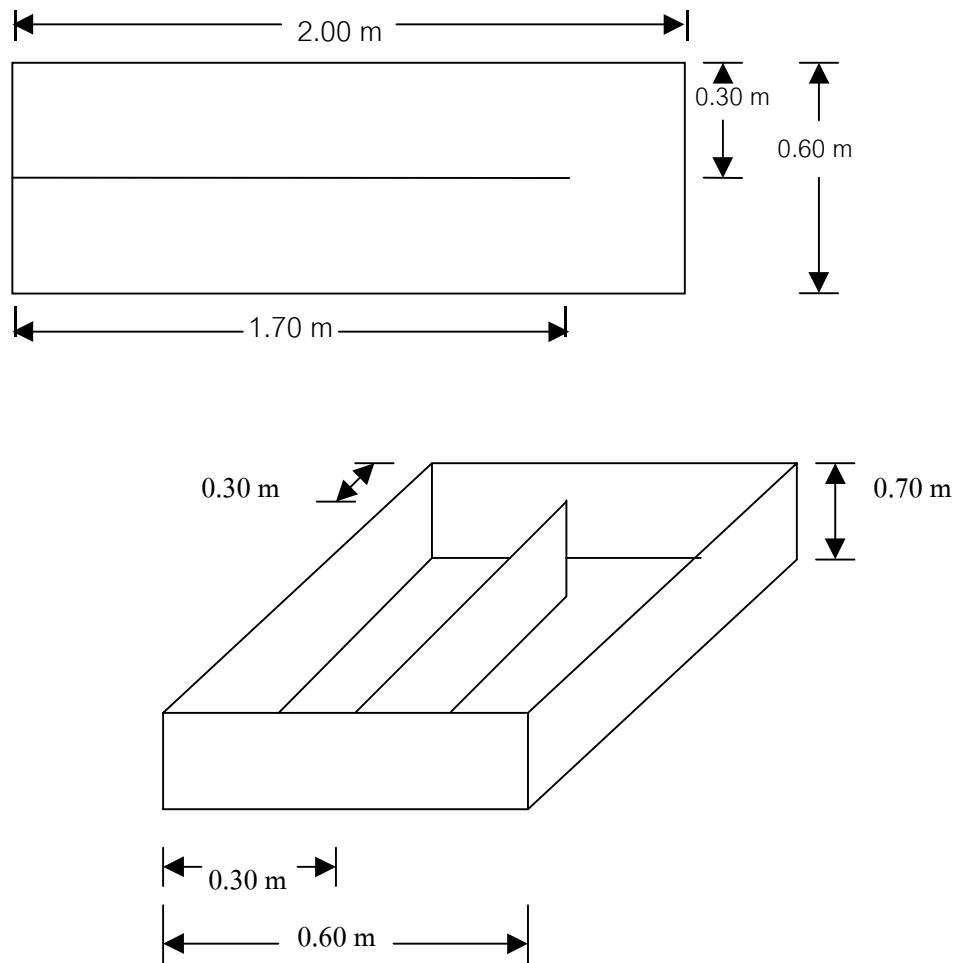
ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างนั้น ใช้ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำเสียโดยวิธีจ้วงตัก (Grab Sampling) แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆตามวิธีการใน “Standard Methods” (APHA et al, 1995) โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

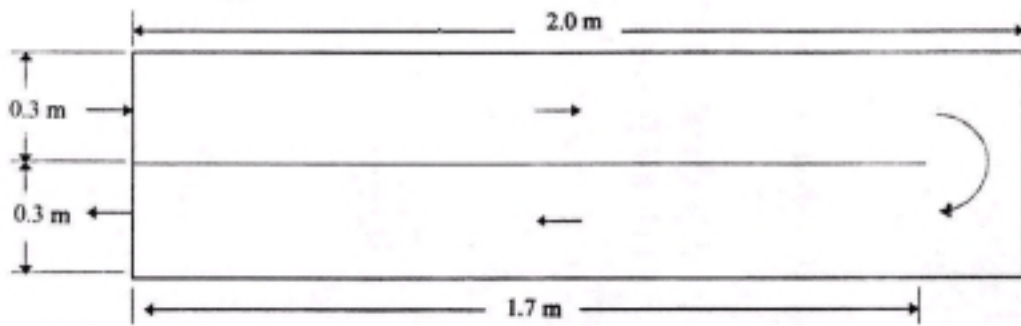
ตัวแปร	วิธีการ
BOD	Azide Modification
COD	Open Dichromate Reflux
TSS	Filtered and dried at 103°C
TKN	Macro Kjeldahl
NO ₃ -N	Sodium Salicylate Method
TP	Vanadomolybdophosphoric acid Method
Coliform bacteria	Membrane Filter
Oil and Grease	Soxhlet Method

3.2 การสร้างแบบจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

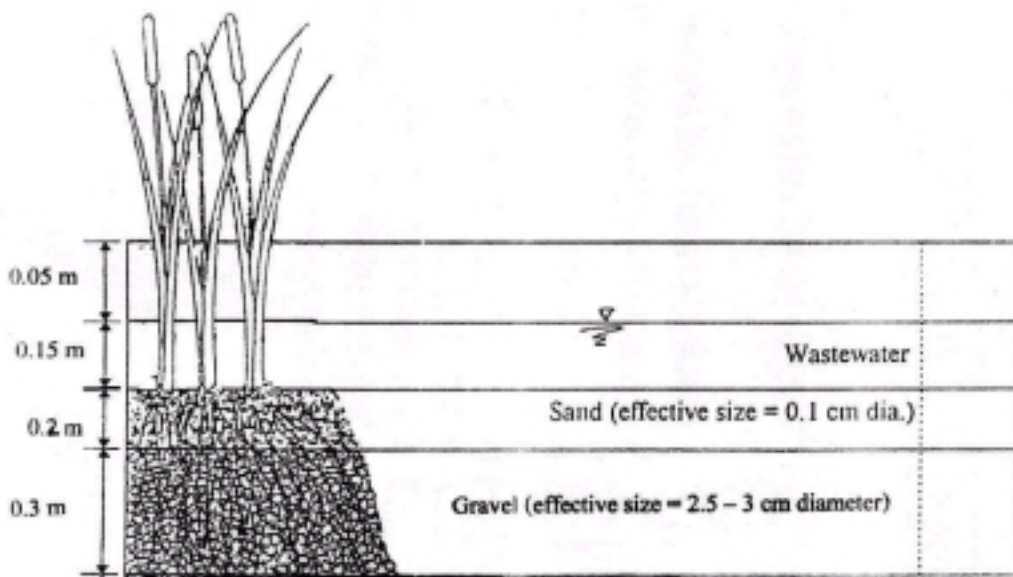
การสร้างบ่อทดลองขนาด กว้าง 0.60 เมตร ยาว 2.00 เมตร และลึก 0.70 เมตร และมีแผ่นกั้นที่กึ่งกลางของบ่อยาว 1.70 เมตร จำนวน 8 บ่อโดยใช้สังกะสีแผ่นเรียบเป็นวัสดุในการสร้างบ่อทดลอง ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 บ่อทดลอง



TOP VIEW



FRONT VIEW

ภาพที่ 3.2 ภาพตัดขวางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



ภาพที่ 3.3 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.4 ทางออกน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว

โดยได้แสดงรายละเอียดความลึกของชั้นดินรวมทั้งความลึกของน้ำเสียที่ได้ทำการออกแบบดังภาพที่ 3.2 และจากนั้นจึงดำเนินการก่อสร้างบ่อดูดองดังภาพที่ 3.3 และ 3.4 โดยแสดงถึงบ่อดูดองในช่วงที่ได้ก่อสร้างและทำการปลูกพืช และรอให้พืชพักตัวเพื่อพร้อมทำการทดลองต่อไป

ในการสร้างบ่อดูดองดังกล่าว มีการทำการศึกษาดูตาม (Tracer Study) เพื่อทดสอบระยะเวลาเก็บกักที่แท้จริงของแบบจำลอง โดยมีหลักการ คือ ทำการปล่อยสารละลายเกลือ (NaCl) ลงสู่บ่อดูดอง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลค่าหนึ่ง จากนั้นทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มมีการปล่อยสารละลายลงสู่บ่อดูดอง แล้ววัดความเข้มข้นของสารละลายที่ออกมา เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

3.3 การเตรียมพืช

พืชที่ใช้ในแต่ละแปลงทดลอง คือ กกกลม *C. corymbosus* และธูปฤาษี *T. angustifolius* โดยทำการคัดเลือกพืชที่มีขนาดใกล้เคียงกัน นำมาปลูกลงในบ่อดูดองชนิดละ 4 บ่อ โดยมีระยะปลูกระหว่างต้นห่างกัน 0.15 เมตร ทั้งช่วงให้พืชมีระยะพักตัวประมาณ 3 สัปดาห์ก่อนทำการทดลอง

3.4 การเตรียมน้ำเสีย

นำน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลนครนครราชสีมา มาใช้วิเคราะห์ความสกปรกของน้ำ ได้แก่ BOD, COD, TSS, TKN, NO_3^- -N, TP, Coliform Bacteria และ Oil & Grease โดยนำน้ำเสียจากบ่อดักน้ำเสียซึ่งผ่านตะแกรงมาแล้วเบื้องต้นมาแล้วปล่อยลงสู่บ่อดูดอง

3.5 การดำเนินการทดลอง

หลังจากที่พืชเริ่มตั้งตัวได้ประมาณ 3 สัปดาห์จึงเริ่มทำการปล่อยน้ำเสียลงแบบจำลองทั้ง 8 บ่อซึ่งมีขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 2.00 เมตร และลึก 0.70 เมตร โดยมีแผ่นกั้นที่กึ่งกลางของบ่อดูดอง เพื่อปลูกพืชชนิดละ 4 บ่อ กำหนดให้ระดับน้ำสูง 0.15 เมตร ความลึกชั้นดิน 0.50 เมตร โดยทำการปล่อยน้ำเสียลงบ่อดูดองแบบต่อเนื่องจนระบบถึงสภาวะคงตัว โดยควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 3, 7, 11 และ 15 วัน สำหรับพืชแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าการออกแบบแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย โดยสามารถคำนวณค่าอัตราการไหลได้จากสมการที่ 3.1 และได้กำหนดขนาดของแบบจำลองที่ใช้ รวมถึงอัตราการบรรทุกน้ำที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกักเก็บน้ำต่างๆ

คำนวณระยะเวลาเก็บกักได้จากสมการต่อไปนี้ (Reed et al, 1995)

$$Q = \frac{LW(d_m n + d_w)}{t} \quad (3.1)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) = $(Q_{in} + Q_{out})/2$

L = ความยาวของบ่อทดลอง (เมตร)

W = ความกว้างของบ่อทดลอง (เมตร)

d_m = ความลึกของชั้นดินในบ่อทดลอง (เมตร)

d_w = ความลึกของระดับน้ำในบ่อทดลอง (เมตร)

n = ค่าคงที่ช่องว่างภายในบ่อ

t = ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (วัน)

ตารางที่ 3.2 การออกแบบแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการดำเนินการวิจัย

รายละเอียด	ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (วัน)			
	3	7	11	15
อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)	0.090	0.039	0.025	0.018
ระดับความลึกของน้ำ (เมตร)	0.15	0.15	0.15	0.15
ระดับความลึกของชั้นดิน (เมตร)	0.5	0.5	0.5	0.5
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	13.2 : 1	13.2 : 1	13.2 : 1	13.2 : 1
อัตราการระบรทุกน้ำ (มิลลิเมตรต่อวัน)	75	32.5	20.8	15

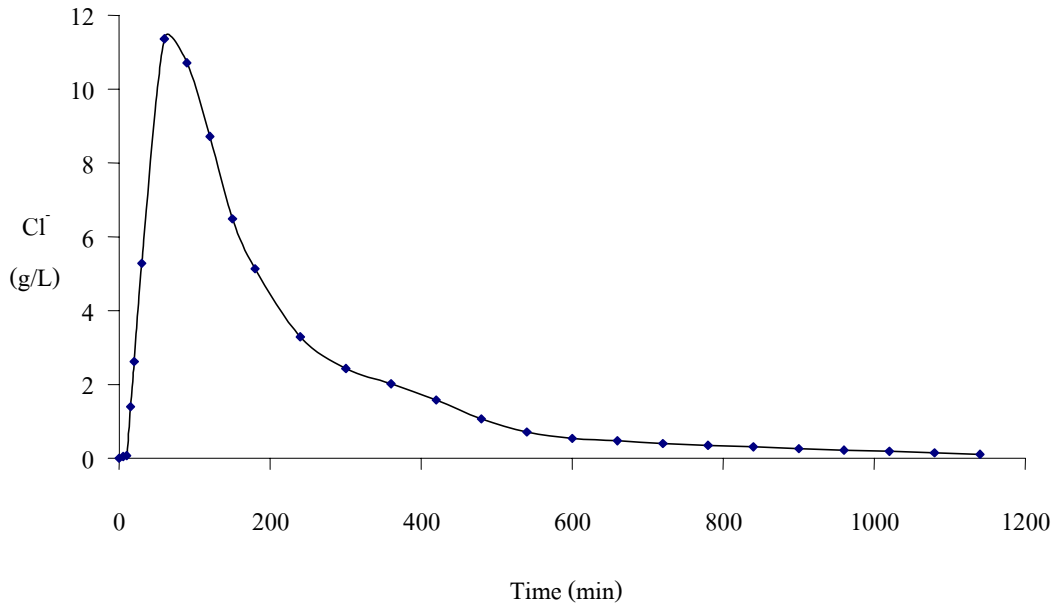
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

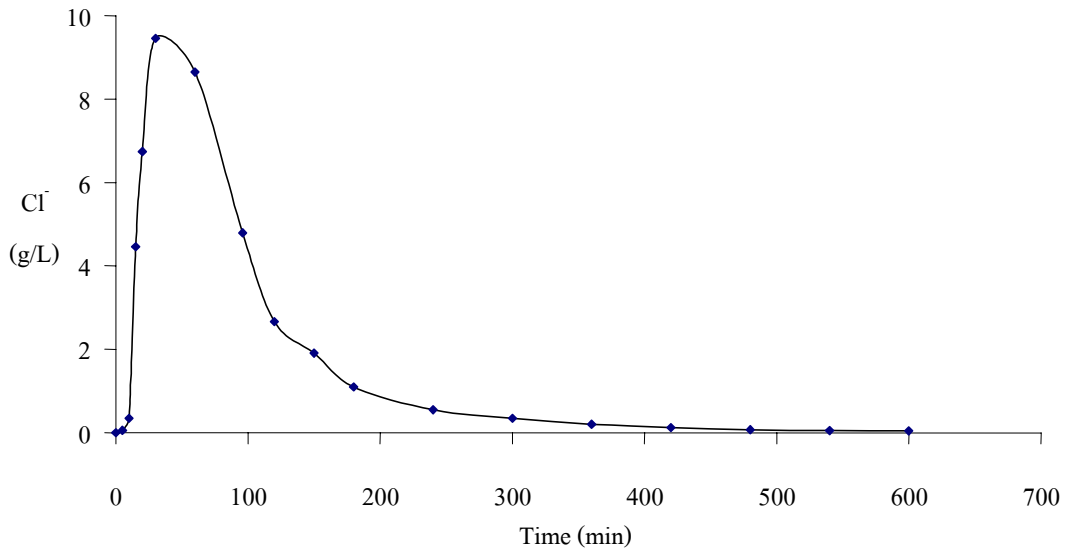
4.1 การศึกษาสารติดตาม

ในการศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ใช้วิธีการแบบ Slug Feed โดยจะทำการวัดค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบในแต่ละช่วงเวลา และนำมาคำนวณหาค่าต่างๆ โดยใช้สมการที่ 2.11 ถึง 2.13 โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ NaCl เท่ากับ 50 g/L ทำการทดลองที่อัตราการไหล 2.67 m³/d และ 6.22 m³/d สำหรับกกกลมและรูปถ่ายียี่ ตามลำดับ โดยนำค่าที่ได้มาแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟดังภาพที่ 4.1 และ 4.2

สามารถคำนวณหาค่า T_{mean} และ ค่าตัวประกอบการกระจาย (Dispersion Number, d) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และข้อมูลในการศึกษาสารติดตามแสดงในภาคผนวก ก



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cl⁻ กับเวลาของการศึกษาสารติดตามสำหรับกกกลม



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CI กับเวลาของการศึกษาสารติดตามสำหรับรูปถาวยี่

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาสารติดตาม

พืช	T_{mean} (hrs)	ค่าตัวประกอบการกระจาย, d		
		การศึกษา	Bhurtel (1997)	Koottatep (1999)
กกกลม	3.88	0.22	-	-
รูปถาวยี่	1.72	0.20	0.15-0.20	0.11-0.13

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า d มีค่าน้อย เนื่องจากการรบกวนการไหลจากต้นพืชคือ กกกลม และรูปถาวยี่ โดยค่า d ของระบบที่ใช้พืชทั้งสองเป็นพืชไหลพื้นน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการที่เกิดค่า d น้อยแสดงให้เห็นว่า ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ออกแบบในการทดลอง ทำให้เกิดสภาวะการไหลแบบท่อ (Plug Flow) ดังนั้น ระบบที่ออกแบบจึงมีความเหมาะสมที่จะนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.10 มาใช้อธิบายการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้อย่างเหมาะสม และพบว่าค่า $T_{\text{ทฤษฎี}} > T_{\text{mean}}$ ที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากเกิดการไหลลัดวงจรในระหว่างการทดลอง ทำให้การไหลของคลอไรด์ในชั้นดินมีค่าน้อยกว่าในชั้นน้ำ

ภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอรีนกับเวลา โดยมีลักษณะแนวโน้มของเส้นกราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของสารติดตามที่เหลือน้อยจะค่อยๆสะสมในบ่อทดลองจนไหลออกมาที่ทางออก และเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจะค่อยๆลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กกกลมและรูปถ่าย เป็นพืชโคล่พื้นน้ำ

4.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองได้มาจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลนครนครราชสีมา ซึ่งผ่านตะแกรงดักส่วนที่เป็นของแข็งออกเบื้องต้นแล้ว ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียนี้พบว่า น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นน้ำเสียที่มีกลิ่นเหม็นรบกวนมากเนื่องจากมีค่าความสกปรกสูง และมีปริมาณสารอาหารเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยสังเกตได้จากตัวแปรหลักๆ คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่าน้ำเสียนี้ออกฤทธิ์ในไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 128.8-205.87 mg/L และ 17.6-66.26 mg/L ตามลำดับ และจัดได้ว่ามีค่าความสกปรกสูง โดยสังเกตได้จากตัวแปรคือ COD และ BOD ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 640-2,896 mg/L และ 372-1,525 mg/L ตามลำดับ ส่วนตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ TSS, NO₃-N, Coliform Bacteria และ Oil & Grease ก็มีค่าสูงเช่นกัน ดังนั้นน้ำเสียนี้นี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม หากไม่มีการจัดการที่ดีพอจะส่งผลให้เกิดมลภาวะโดยเฉพาะกับแหล่งน้ำ

4.3 ประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในการทดลองได้ทำการปล่อยน้ำเสียลงสู่บ่อทดลองที่อัตราการไหล 4 ลิตร/วินาที ได้จากการกำหนดระยะเวลาเก็บกักไว้ โดยกำหนดให้อยู่ในสถานะเดียวกันทั้งกกกลมและรูปถ่าย โดยค่าอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อทำการทดลองปล่อยน้ำเสียลงสู่บ่อทดลองจนถึงที่สถานะคงที่ (Steady-State Conditions) แล้วจึงนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบมาวัดค่าตัวแปรต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างกันระบบมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในลักษณะเป็นแนวโน้มเดียวกันคือ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำนานที่สุดระบบมีความสามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยที่สุด ระบบมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้น้อยที่สุด ทั้งในบ่อทดลองที่ใช้กกกลม และรูปถ่าย โดยพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ และพบว่า รูปถ่ายสามารถบำบัดสารอาหารที่มีอยู่ใน

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปร	ความเข้มข้น (mg/L)	
	ช่วง	เฉลี่ย
COD	640-2,898	1,418±578
BOD	372-1,525	617±296
TSS	353-417	382±24
TP	17.6-62.26	37.3±17
TKN	128.8-205.87	161±33
NO ₃ ⁻ -N	0.835-2.138	1.44±0.56
Coliform Bacteria *	4.2×10 ⁸ -6.5×10 ⁸	5.25×10 ⁸ ±0.76×10 ⁸
Oil & Grease	238-350	317±32

*หน่วย No. / 100 mL

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าการออกแบบอัตราการไหลของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

อัตราการไหล (L/d)	OLR (kg-BOD/ha-d)	HRT (days)
90	462.7	3
39	200.5	7
25	128.5	11
18	92.6	15

น้ำเสียได้ดีกว่ากกลมเล็กน้อย แต่เมื่อนำค่าน้ำทิ้งของระบบไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมแล้วพบว่า น้ำทิ้งที่ออกจากระบบไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.5 แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ โดยแสดงในรูปร้อยละของการกำจัด เปรียบเทียบกับค่า Organic Loading Rates (OLR) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง มีความสามารถสูงในการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ในทุกตัวแปร และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพืชทั้งสองชนิดพบว่า มีความสามารถใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากระบบบำบัด

พืช	OLR (kg-BOD/ha-d)	ความเข้มข้น (mg/L)							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม	462.7	182	50	28	18.8	94.4	1.27	10.75	171
	200.5	166	47	20	12.2	72.9	0.99	3.35	169
	128.5	157	44	18.7	9.2	61.9	0.91	3.27	160
	92.6	105	38	18	5	33.7	0.34	0.47	70
ธูปฤาษี	462.7	175	37	32.7	12.6	52	0.50	5.50	153
	200.5	141	31	28.4	8.3	48.4	0.48	4.05	150
	128.5	136	29	14.7	5.7	36.5	0.38	0.50	129
	92.6	124	26	10	2.8	24	0.24	0.48	83

*Coliform Bacteria หน่วย 10⁷No. / 100 mL

4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS ของกกกลมและธูปฤาษีในแต่ละ OLR ที่เข้าสู่ระบบมีค่าใกล้เคียงกันจนสามารถอธิบายได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกัน แสดงการทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบทางสถิติ t (t-test) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่า Significant > 0.95 หมายถึง กลุ่มตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความน่าเชื่อถือที่ 95% ดังนั้น สามารถนำค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ TSS มาเป็นตัวแทนได้

สามารถสรุปค่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS ได้คือ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กกกลมและธูปฤาษีเป็นพืชโผล่พื้นน้ำมีความสามารถในการกำจัดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบเปรียบเทียบกับค่า OLR

พืช	OLR (kg-BOD/ha-d)	ร้อยละของการกำจัด							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม	462.7	96	97.5	97.7	84	82	74	93.7	83
	200.5	96.7	97.8	98.5	91	88	81	98.2	85
	128.5	96.9	98.1	98.7	93	89	83	98.3	86
	92.6	97.9	98.4	98.8	96	95	94	99.8	94
รูปถ่าย	462.7	95.4	97.8	96.9	88	88	87	96.1	82
	200.5	96.5	98.1	97.4	92	89	88	97.3	83
	128.5	97	98.4	98.7	95	93	92	99.7	87
	92.6	97.4	98.8	99.1	98	96	95	99.7	92

*Coliform Bacteria

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS

Parameter	พืชโพล์พื้นน้ำ	t	df	Significant (2-tailed)
COD	กกกลม	0	3	1
	รูปถ่าย	0	3	1
TSS	กกกลม	0	3	1
	รูปถ่าย	0	3	1

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TSS ของระบบ

ตัวแปร	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
	กกกลม	รูปถ่าย
COD	96.9±0.78	96.6±0.86
TSS	98.4±0.5	98±1.04

สังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาเก็บกักที่ยาวนานระบบจะมีความสามารถในการกำจัด COD และ TSS ได้ดีกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้อยๆ เนื่องจากกระบวนการสำคัญในการลดปริมาณ COD และ TSS คือ การตกตะกอนของอนุภาคของแข็ง และการเกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัด N และ P

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด N และ P ของกกกลมและรูปฤาษี มีแนวทางเดียวกับผลการกำจัด COD และ TSS ที่ได้นำเสนอข้างต้นคือ ประสิทธิภาพการกำจัด N และ P ของกกกลมและรูปฤาษีไม่แตกต่างกันในแต่ละค่าของ OLR ที่เข้าสู่ระบบ ดังแสดงการทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบทางสถิติ t (t-test) ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัด N และ P

Parameter	พืชโพล์พื้นน้ำ	t	df	Significant (2-tailed)
TKN	กกกลม	0.066	3	0.952
	รูปฤาษี	0.068	3	0.950
TP	กกกลม	-0.049	3	0.964
	รูปฤาษี	0.059	3	0.957

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่า Significant > 0.95 หมายถึง กลุ่มตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความน่าเชื่อถือที่ 95% ดังนั้น สามารถนำค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด N และ P มาเป็นตัวแทนได้

สามารถสรุปค่าประสิทธิภาพการกำจัด N และ P ได้คือ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กกกลมและรูปฤาษีเป็นพืชโพล์พื้นน้ำ มีความสามารถใกล้เคียงกัน โดยระบบที่ใช้รูปฤาษีมีประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกับระบบที่ใช้กกกลม ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ประสิทธิภาพในการกำจัด N ขึ้นอยู่กับความสามารถในการลดปริมาณของ $\text{NH}_4\text{-N}$ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งกลไกหลักในการลดปริมาณ $\text{NH}_4\text{-N}$ มีหลายประการ เช่น ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน, การดูดซับของชั้นหินและทราย รวมถึงการใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิต และการดูดซึมของตัวพืชโพล์พื้นน้ำ จากกลไกเหล่านี้ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานกว่าจะสามารถกำจัด

ปริมาณ $\text{NH}_4\text{-N}$ ได้มากกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยๆ เพราะจะสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปของ $\text{NH}_4\text{-N}$ ไปเป็น $\text{NO}_3\text{-N}$ หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเปลี่ยน $\text{NO}_3\text{-N}$ เป็นก๊าซ N_2 ได้ อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด N และ P ของระบบ

ตัวแปร	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
	กกกลม	รูปถ่าย
TKN	88.3±5.3	91.4±3.3
TP	91.1±5.0	93.1±4.4

ปัจจัยในการกำจัด N ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การดูดซึมของพืชใล่ล่พื้นน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการตัด (Harvesting) เนื่องจากพืชที่โตเต็มที่ย่อมมีความสามารถในการดูดซึมสารอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่ง N ได้น้อยกว่าพืชที่กำลังเจริญเติบโต ดังนั้นในการทดลองจึงได้กำหนดระยะเวลาที่จะทำการตัดในช่วงเวลาเดียวกันคือ ทุก 2 เดือน

ในแง่ของการกำจัด P พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด P จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งต้องอาศัยกลไกสำคัญหลักๆคือ การดูดซับของหินและทราย, การตกตะกอนรวมทั้งการดูดซึมของพืช ซึ่งพบว่ารูปถ่ายและกกกลมมีความสามารถในการดูดซึม P ไปใช้ประโยชน์ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรมีการออกแบบชั้นดินที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด P

4.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตัวแปรอื่นๆ

ประสิทธิภาพในการกำจัดตัวแปรที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ BOD, Coliform Bacteria และ Oil & Grease นั้นแนวโน้มในการกำจัดเหมือนกับตัวแปรอื่นๆคือ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำนานจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยๆ โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้พืชใล่ล่พื้นน้ำทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยสามารถสรุปได้ว่าพืชทั้งสองมีความสามารถไม่ต่างกันในการกำจัดตัวแปรอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าระบบมีความสามารถในการกำจัดเชื้อโรคสูง แต่ก็ยังไม่มากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำเสีย ส่วนความสามารถในการกำจัดน้ำมันและไขมันก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ เนื่องจากมีปัจจัยที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ยาว

นาน ทำให้เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำเสียด้วย และเกิดการติดค้างอยู่ที่ โคนของลำต้นพืชทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตัวแปรอื่นๆ

ตัวแปร	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
	กกกลม	รูปฤาษี
BOD	97.9±0.5	98.3±0.4
NO ₃ ⁻ -N	83±8.6	90.5±3.3
Coliform Bacteria	97.5±2.6	98.2±1.8
Oil & Grease	87±4.8	86±4.6

สามารถสรุปผลการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการกำจัดของพืชทั้งสองชนิดได้ดังแสดงในภาพที่ 4.3

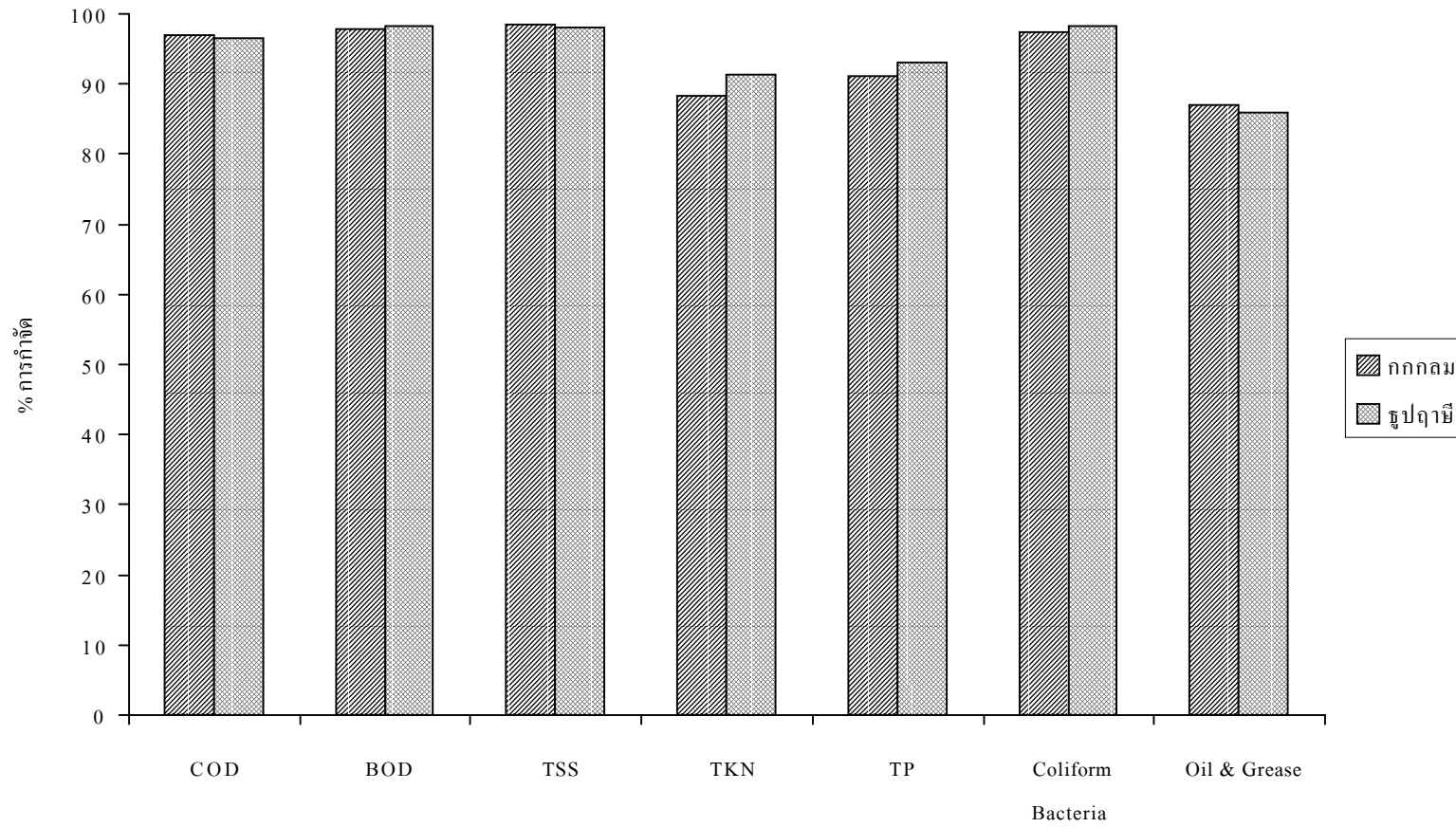
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์ โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ คือ BOD และแบบจำลองการกำจัด สารอาหาร คือ N และ P ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ถึง 2.10 รายละเอียดเกี่ยวกับการทดสอบทางสถิติ แสดงในภาคผนวก ข.

4.4.1 แบบจำลองการกำจัด BOD

จากการศึกษาของ Reed et al (1995) ได้เสนอแบบจำลองการกำจัด BOD ดังแสดง ในสมการที่ 2.2 โดยนำผลการทดลองที่ได้มาทำการศึกษา โดยใช้ทฤษฎีสมการถดถอยเชิงเส้นมา อธิบาย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.11

$$\frac{C_e}{C_0} = F \exp \left[- \frac{0.7 K_T (A_V)^{1.75} L W (d_m n + d_w)}{Q} \right] \quad (2.2)$$



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบทางสถิติของผลการทดลองที่เกิดจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสอง มีค่าระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05 หมายความว่า สามารถยอมรับว่าสมการถดถอยเชิงเส้นของทั้งสองระบบมีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 4.11 การพิจารณาระดับนัยสำคัญ

พืชโผล่พื้นน้ำ	P-Value	การยอมรับที่ระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05
กกกลม	0.030	ยอมรับ
ชูปฤายี่	0.020	ยอมรับ

หลังจากการทดสอบจนได้รับการยอมรับแล้วสามารถหาค่าสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งอธิบายเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการศึกษาของ Reed et al (1995) โดยการคำนวณค่า K_{20} และ F นั้นแสดงในภาคผนวก ค

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_{20} และ F ที่ได้จากการทดลองกับค่าของ Reed et al (1995) แล้วพบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่ามาก เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติตลอดจนค่าความสกปรกที่แตกต่างกันโดยที่จากการศึกษาของ Reed et al (1995) ได้ใช้น้ำเสียชุมชนมาทำการทดลองส่วนในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ซึ่งมีปริมาณ

ตารางที่ 4.12 สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการทดลอง

พืชโผล่พื้นน้ำ	สมการถดถอยเชิงเส้น	K_{20} (d^{-1})	F
กกกลม	$\ln C_t/C_0 = -(1.059 \times 10^{-2})t - 2.431$	0.000052	0.088
ชูปฤายี่	$\ln C_t/C_0 = -(1.346 \times 10^{-2})t - 2.756$	0.000066	0.0635
	Reed et al (1995)	0.0057	0.52

ของแข็งอินทรีย์ (Organic Solid) สูง ทำให้ระบบต้องใช้เวลาในการย่อยสลายที่ยาวนาน ดังนั้นค่าทั้งสองที่ได้จึงแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับน้ำเสียนั้นๆ

ค่า K_{20} เป็นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำเสียที่อยู่ในบ่อทดลอง และในการทดลองสามารถวัดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้เท่ากับ $29^{\circ}C$ รายละเอียดการวัดค่าอุณหภูมิแสดงในภาคผนวก ข.

ค่า F แสดงถึงค่าเศษส่วนของ BOD ที่สามารถกำจัดได้ โดยจะเห็นได้ว่าค่า F ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อย เนื่องจากน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าความสกปรกสูง ดังนั้นจึงมีค่า BOD สูงไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับค่า BOD ที่สามารถกำจัดได้แล้ว ค่า F จึงมีค่าน้อย

4.4.2 แบบจำลองการกำจัด N

จากการศึกษาโดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสาม คือ สมการที่ 2.7 ถึง 2.8 กับค่าที่ได้จากการทดลองทั้งในระบบที่ใช้กกลม และรูปถ่ายึ โดยใช้หลักทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการทดลอง

สมการของ WPCF (1990)

$$A = \frac{0.01Q}{(0.645C_e - 0.125C_0 + 1.129)} \quad (2.7)$$

สมการของ Knight et al (1993)

$$C = 0.28L_w + 0.33C_0 \quad (2.8)$$

การหาความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย โดยทำการตั้งสมมติฐานดังนี้

$$\begin{aligned} H_0 ; Y = X & \quad \text{หรือ} \quad C_{\text{ทดลอง}} \text{ ไม่แตกต่างกับ } C_{\text{ทำนาย}} \\ H_1 ; Y \neq X & \quad \text{หรือ} \quad C_{\text{ทดลอง}} \text{ แตกต่างกับ } C_{\text{ทำนาย}} \end{aligned}$$

จากการทดสอบค่า t (t-test) พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ในทั้ง 2 แบบจำลอง ดังนั้นจึงถือว่าค่าที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกับค่าที่ได้จากการทำนาย

ตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าค่า Significant > 0.05 หมายถึง การยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 คือ ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความน่าเชื่อถือที่ 95% ในทั้งสองแบบจำลอง

จากการศึกษาครั้งนี้ ไม่สามารถแสดงผลการทดลองให้ออกมาในรูปแบบจำลองการกำจัด N ได้ เนื่องจากในการศึกษาการกำจัด N ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการกำจัด โดยเฉพาะในแง่ของการดูดซึมของพืช ซึ่งต้องมีการวางแผนงานที่หลากหลาย ส่งผลทำให้เกิดขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเสนอในแง่เปรียบเทียบข้อมูล

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าจากการทดลองในแต่ละแบบจำลองการกำจัด N

แบบจำลองการกำจัด N	พืชโผล่พื้นน้ำ	t	df	Significant (2-tailed)
WPCF (1990)	กกกลม	2.855	3	0.065
	รูปฤาษี	-0.549	3	0.621
Knight et al (1993)	กกกลม	0.962	3	0.407
	รูปฤาษี	-2.210	3	0.114

ที่ได้จากการทดลอง กับการศึกษาแบบจำลองที่ผ่านมาเท่านั้น

4.4.3 แบบจำลองการกำจัด P

จากการศึกษาของ Kadlec and Knight (1996) ได้เสนอแบบจำลองการกำจัด P ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp\left(\frac{K_A}{L_w}\right) \quad (2.9)$$

โดยนำผลการทดลองที่ได้มาทำการศึกษา โดยใช้ทฤษฎีสมการถดถอยเชิงเส้นมาอธิบาย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.14

จากตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบทางสถิติของผลการทดลองที่เกิดจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสอง มีค่าระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05 หมายความว่า สามารถยอมรับว่าสมการถดถอยเชิงเส้นของทั้งสองระบบมีความน่าเชื่อถือ

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_A ซึ่งเป็นค่าคงที่อัตราของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ต่อพื้นที่ที่ได้จากการทดลองกับค่าของ Kadlec and Knight (1996) โดยการคำนวณค่า K_A แสดงในภาคผนวก ค แล้วพบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากน้ำ

ตารางที่ 4.14 การพิจารณาระดับนัยสำคัญ

พืชโพล์พื้นน้ำ	P-Value	การยอมรับที่ระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05
กกกลม	0.015	ยอมรับ
รูปฤาษี	0.016	ยอมรับ

ตารางที่ 4.15 สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการทดลอง

พืชโพล์พื้นน้ำ	สมการถดถอยเชิงเส้น	K_A (mm/d)
กกกลม	$\ln C_c/C_0 = -15.743/L_w - 0.353$	15.743
รูปฤาษี	$\ln C_c/C_0 = -18.096/L_w - 0.673$	18.096
Kadlec and Knight (1996)		27.4

เสียที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ตลอดจนการออกแบบแบบจำลองก็ต่างกัน เช่นเดียวกับในแง่ของการกำจัด BOD ดังนั้นค่าที่ได้จึงแตกต่างกัน

4.5 อัตราการเจริญเติบโตของพืชโพล์พื้นน้ำ

ในการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชโพล์พื้นน้ำโดยทำการตัดพืชที่ความสูง 5 cm. จากผิวน้ำแล้วทำการชั่งน้ำหนักพืชที่ตัดออก จากการทดลองพบว่าพืชทั้งสองชนิดคือ กกกลม และรูปฤาษี มีอัตราการเจริญเติบโตในลักษณะเดียวกันคือ ในช่วงแรกของการปลูกพืช ความหนาแน่นของพืชจะต่ำ แต่เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียลงในบ่อทดลองแล้ว พืชจะเริ่มเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ โดยลำต้นจะมีสีเขียวเข้มขึ้น และความหนาแน่นของต้นพืชก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะกกกลม จะมีความหนาแน่นสูงเนื่องจากมีลำต้นที่เล็ก

จากการสังเกตพบว่า เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่บ่อทดลองที่มีระยะเวลาเก็บน้ำน้อยหรือมีอัตราการอินทรีย์ (OLR) สูงมากๆ พืชทั้งสองชนิดจะไม่สามารถทนต่อความสกปรกได้ จึง

เกิดการตายในช่วงต้นทางของบ่อทดลองตามระยะเวลาที่เก็บและอัตรา OLR ที่ปล่อยลงสู่บ่อทดลอง

4.6 อัตราผลผลิต

เมื่อพิจารณาถึงอัตราผลผลิตของพืชทั้งสองที่ใช้ในการศึกษาพบว่า อัตราผลผลิตพืชจะสูงขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากมีอัตรา OLR ที่เหมาะสมกับการที่พืชนั้นๆจะนำไปใช้ประโยชน์ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลผลิตพืชกับระยะเวลาที่เก็บ มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารอินทรีย์ในดินกับระยะเวลาที่เก็บน้ำ เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถสะสมอยู่ในดินมากขึ้น ตามระยะเวลาที่เก็บที่มากขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ภาพที่ 4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราผลผลิต กับ OLR พบว่า มีความสัมพันธ์ผกผันกัน กล่าวคืออัตราผลผลิตของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อ OLR ลดลง เป็นเพราะว่าน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณที่สูงมาก ดังนั้นพืชจึงไม่สามารถเติบโตได้คึกเมื่อมีปริมาณ OLR เข้าสู่ระบบมากๆ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความสามารถในการดูดซึมสารอินทรีย์คือ N และ P ของพืชทั้งสองต่างกัน คือพืชสามารถดูดซึม N ได้มากกว่า P เพราะ P จะถูกสะสมอยู่ในดินมากกว่าในต้นพืช ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการตัดต้นพืชเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณ N และ P ที่พืชทั้งสองสามารถดูดซึมไปใช้ได้

ตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ N และ P ในต้นพืชที่ตัดออก เปรียบเทียบกับปริมาณที่เข้าสู่ระบบ พบว่าพืชทั้งสองมีความสามารถในการดูดซึม N ได้ในช่วง 45-70% และ 47-68% ของกกกลม และรูปฤาษี ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า พืชทั้งสองมีความสามารถใกล้เคียงกัน ส่วนความสามารถในการดูดซึม P มีค่าอยู่ในช่วง 24-38% และ 19-24% สำหรับกกกลม และรูปฤาษีตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 และ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ N และ P ที่ถูกกำจัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยวิเคราะห์หาในแต่ละกระบวนการต่างๆ เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดูดซึมไปใช้ประโยชน์โดยพืช เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการกำจัด N ส่วนในแง่ของการกำจัด P นั้น จากการศึกษาในครั้งนี้ไม่สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการดูดซับโดยชั้นหินและทราย เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำจัด P เนื่องจากเกินขอบเขตการศึกษา

4.7 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

โรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็กแห่งหนึ่ง มีโครงการที่จะก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเลือกใช้รูปถาวยี่เป็นระบบหลักในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น โดยลักษณะน้ำเสียมียารละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.16 อัตราผลผลิตพืชและสารอินทรีย์ในดินที่ได้จากการทดลอง

พืช	OLR (kg-BOD/ha-d)	อัตราผลผลิตพืช (g/m ² -d)	สารอินทรีย์ในดิน (g/g dry wt.)
กกกลม	462.7	9.1	0.13
	200.5	10.36	0.18
	128.5	12.55	0.31
	92.6	14.32	0.38
รูปถาวยี่	462.7	15.04	0.22
	200.5	17.95	0.34
	128.5	19.41	0.37
	92.6	21.98	0.41

$$\text{BOD น้ำเข้า} = 620 \text{ mg/L}$$

$$\text{BOD น้ำออกที่ต้องการ} = 30 \text{ mg/L}$$

$$\text{อัตราการไหล} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย} = 29^\circ\text{C}$$

การออกแบบ

- หาค่า K_T ที่ 29°C

$$K_{29} = K_{20} \theta^{(29-20)} = 0.000066 \times 1.1^9 = 0.00016 \text{ d}^{-1}$$

- หาค่า HRT ที่เหมาะสม

$$\text{กำหนด } F = 0.0635 \text{ และ } A_v = 15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$\begin{aligned} t &= (\ln C_0 - \ln C_e) + \ln F / 0.7 K_T A_v^{1.75} \\ &= (\ln 620 - \ln 30) + \ln 0.0635 / 0.7 (0.00016)(15.7)^{1.75} \\ &= 19.6 \text{ d} \end{aligned}$$

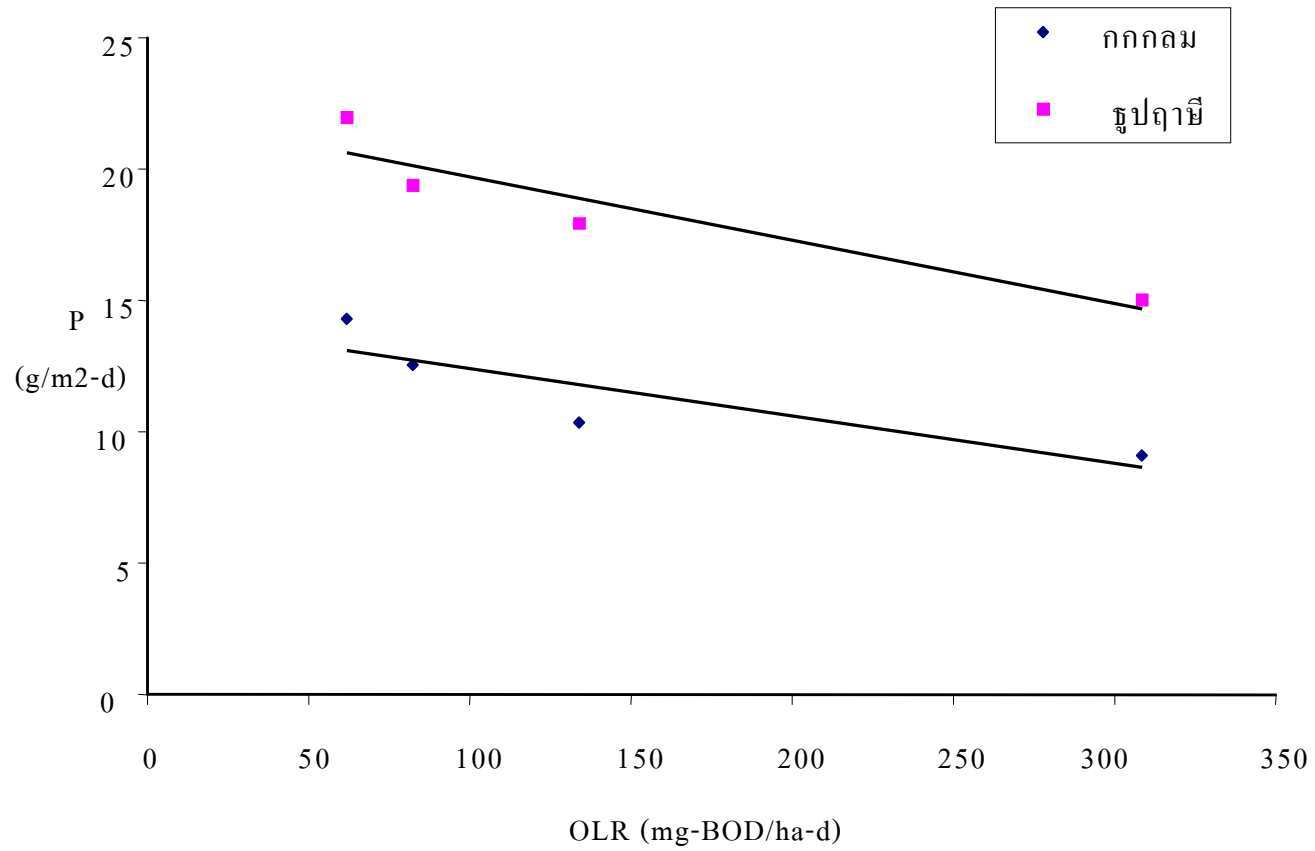
- หาพื้นที่ผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
 - กำหนด $n = 0.32$, ความลึกดิน = 0.5 m, ความลึกน้ำ = 0.15 m
 - พื้นที่ผิว = $(Q \times t) / (d_m n + d_w)$
 - = $(100 \text{ m}^3/\text{d}) \times (19.6 \text{ d}) / (0.5 \times 0.32) + 0.15 \text{ m}$
 - = $6,323 \text{ m}^2 = 0.6 \text{ ha}$

- หาค่า OLR
 - $\text{OLR} = Q \times \text{BOD} / \text{Area} = (100 \text{ m}^3 / \text{d}) \times (620 \text{ mg/L}) / 0.6 \text{ ha}$
 - = $103.3 \text{ kg-BOD} / \text{ha-d}$

- หาค่า HLR
 - $\text{HLR} = Q / L \cdot W = (100 \text{ m}^3 / \text{d}) / (0.6 \text{ ha}) = 1.67 \text{ cm} / \text{d}$

สรุปค่าการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

BOD น้ำเข้า	= 620 mg/L
BOD น้ำออกที่ต้องการ	= 30 mg/L
อัตราการไหล	= $100 \text{ m}^3/\text{d}$
อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย	= 29°C
ขนาดพื้นที่	= 0.6 ha (3.75 ไร่)
ชั้นดิน	= ความพรุน 0.32
พืชที่ใช้	= ธูปฤาษี



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง OLR กับ อัตราผลผลิตพีช (P)

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์หา N และ P ในผลผลิตพืชที่ตัดออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พืช	HRT (days)	Influent (mg/L)		อัตราผลผลิต (g/m ² -d)	N ในผลผลิตที่ตัดออก		P ในผลผลิตที่ตัดออก	
		TN	TP		ปริมาณ N (g/m ² -d)	%N เทียบกับ Inf. TN	ปริมาณ P (g/m ² -d)	%P เทียบกับ Inf. TP
กกกลม	3	161	37.3	9	0.072	45	0.009	24
	7			11	0.088	55	0.011	29
	11			13	0.104	65	0.013	35
	15			14	0.112	70	0.014	38
ธูปฤาษี	3	161	37.3	15	0.075	47	0.007	19
	7			18	0.090	56	0.009	24
	11			19	0.095	59	0.0095	25
	15			22	0.110	68	0.011	30

หมายเหตุ ปริมาณ N และ P ในผลผลิตที่ตัดออก สามารถคำนวณได้จากปริมาณของ N และ P ที่น้อยที่สุดที่มีในส่วนประกอบของเนื้อเยื่อกกกลมและธูปฤาษี ซึ่งมีช่วงค่าปริมาณ N 8-27 g/kg สำหรับกกกลม และ 5-24 g/kg สำหรับธูปฤาษี ส่วนปริมาณ P มีช่วงค่า 1-3 g/kg สำหรับกกกลม และ 0.5-4 g/kg สำหรับธูปฤาษี (Reddy and Debusk, 1987)

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบร้อยละของ TN ที่ออกจากระบบโดยกระบวนการกำจัดต่างๆ

พืช	HRT (days)	Inf. TN (mg/L)	ร้อยละ		
			Eff. TN	พืชดูดซับ	อื่นๆ
กกกลม	3	161	18	45	37
	7		12	55	33
	11		11	65	24
	15		5	70	25
รูปถ่าย	3	161	12	47	41
	7		11	56	33
	11		7	59	34
	15		4	68	28

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบร้อยละของ TP ที่ออกจากระบบโดยกระบวนการกำจัดต่างๆ

พืช	HRT (days)	Inf. TP (mg/L)	ร้อยละ		
			Eff. TN	พืชดูดซับ	อื่นๆ
กกกลม	3	37.3	16	24	60
	7		9	29	62
	11		7	35	58
	15		4	38	58
รูปถ่าย	3	37.3	12	19	69
	7		8	24	68
	11		5	25	70
	15		2	30	68

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยนำน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลนครนครราชสีมา มาปล่อยลงสู่บ่อทดลองที่ออกแบบไว้ที่อัตราการไหลต่างๆกันที่ระยะเวลาเก็บที่แตกต่างกันคือ 3, 7, 11 และ 15 วัน เพื่อทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพืชไหล่น้ำสองชนิดคือ กกกลม และชูปฤยาณี โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบ โดยมีผลสรุปดังนี้

- ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ของระบบ เมื่อนำระบบที่ใช้พืชทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกันพบว่า ระบบที่ใช้พืชทั้งสองต่างมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในเกณฑ์ที่ดีใกล้เคียงกัน และระบบที่ใช้ชูปฤยาณีจะมีความสามารถในการกำจัดสารอาหาร ไม่แตกต่างกับกกกลม ดังแสดงในตารางที่ 5.1

- ระบบมีความสามารถในการกำจัดสารอาหารคือ N และ P ได้ดีเนื่องจาก ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีปัจจัยที่เหมาะสมทั้งด้านกายภาพและชีวภาพ กล่าวคือ จุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในระบบ มีความสามารถในการย่อยสลายสารอาหารได้เป็นอย่างดี และทำให้เกิดสภาวะการไหลอย่างช้าๆเป็นผลให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคที่เพียงพอต่อการกำจัดสารอาหาร

- พืชไหล่น้ำทั้งสองมีความสามารถในการดูดซึมสารอาหารไปใช้ในเกณฑ์ที่ดี และปัจจัยที่มีผลกระทบคือ อายุของพืชกล่าวคือ หากไม่มีการตัดพืชทำให้ความสามารถในการดูดซึมสารอาหาร โดยเฉพาะ N มีค่าน้อยลง

- สามารถใช้ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดมาเป็นตัวแทนที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆได้ เนื่องจากน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีความสกปรกสูงมาก ดังนั้นความสามารถในการกำจัดตัวแปรต่างๆจึงมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละค่าอัตราการระอินทรีย์ (OLR)

- ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สมการที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือ แต่ค่าคงที่บางตัวที่ได้จะมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากในการทดลองใช้น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ซึ่งมีความสกปรกสูงมาก ในขณะที่การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้น้ำเสียชุมชนมาทำการศึกษา และมีสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5.1 สรุปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ของระบบที่ใช้พืชทั้งสองชนิด

ตัวแปร	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
	กกกลม	รูปถายี่
COD	96.9±0.8	96.6±0.9
BOD	97.9±0.5	98.3±0.4
TSS	98.4±0.5	98±1.0
TP	91.1±5.0	93.1±4.4
TKN	88.3±5.3	91.4±3.3
NO ₃ ⁻ -N	83±8.6	90.5±3.3
Coliform Bacteria	97.5±2.6	98.2±1.8
Oil & Grease	87±4.8	86±4.6

- ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นระบบหลักในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูง เนื่องจากพืชอาจไม่สามารถทนต่อความเข้มข้นที่สูงๆ ได้ ดังนั้นน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบควรผ่านการบำบัดด้วยระบบอื่นมาก่อน เช่น บ่อธรรมชาติ (Stabilization Pond) เพื่อลดความสกปรกลงก่อนเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรทำการเปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดสารอาหารของพืชทั้งสองชนิด โดยทำการตัดพืชที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการตัดพืชที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด

- ควรทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale เพื่อผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุดที่จะทำให้สามารถออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- ลักษณี่ คณานธินันท์. (2539). ประสิทธิภาพพดกกลม Cyperus corymbosus ฐปฤยี่ Typha angustifolia อ้อ Phragmites australis และแห้วทรวงกระเทียม Eleocharis dulcis ในพื้นที่ ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อกำบัตโครเมียมในน้ำเสียดจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยา นิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณทิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย. (2535). คู่มือการวิเคราะห์น้ำเสียด. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: World Environment Center.
- Adrock, P. W., Ryan, G. L. and Osborne, P. L. (1995). Nutrient Partitioning In A Clay-bedded Surface Flow Wetland. **Water Science and Technology**. 32: 203-210.
- APHA, AWWA and WPCF. (1995). **Standard Methods for the Examination of water and Wastewater** (16th ed.). Washington D.C: APHA.
- Bevor, H. L., Roser, D. J. and Adcock, P. W. (1995). Challenges for The Development of Advanced Constructed Wetlands Technology. **Water Science and Technology**. 32:13-20.
- Boon, A. G. (1985). **Report of a Visit by Members and Staffs of WRC to Germany to Investigate the Root Zone Method for Treatment of Wastewater**. Stevenage, England: Water Research Center.
- Campbell, S. C. and Ogden, H. M. (1999). **Constructed Wetlands in the Sustainable Landscape**. John Wiley & Sons.
- Cole, Stephen. (1998). The Emergent of Treatment Wetlands. **Environmental Science and Technology**. 32(9): 218A.
- Crites, R. W. (1994). Design Criteria and Practice for Constructed Wetlands. **Water Science and Technology**. 29(4): 1-6.
- Crities, R. W. and Tchobanoglous, G. (1998). **Small and Decentralized Wastewater Management Systems**. New York: WCB/McGraw-Hill.

- De Jong, J. (1979). The Purification of Wastewater With The Aid of Rush or Reed Ponds. **Biological Control of Water Pollution**. pp. 133-139. Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.
- Finlayson, C. M. and Chick, A. J. (1983). Testing the Potential of Aquatic Plants to Treat Abattoir Effluent. **Water Research**. 17(4): 415-422.
- Good, B. J. and Patrick, W. H., Jr. (1987), Root-Water-Sediment Interface Processes, in Reddy, K. R. and Smith, W. H. (ed.). **Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery** (pp. 337-353). Orlando: Magnolia Public Inc.
- Grey, N. F. (1989). **Biology of Wastewater Treatment**. Trinity College University of Dublin. Oxford University Press.
- Hammer, D. E. and Kadlec, R. H. (1983). **Design Principles for Wetland Treatment Systems**. University of Michigan. Oklahoma: National Technical Information Service.
- H. Brix (1993). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. In Gerald A. Moshiri (ed.). **Constructed Wetlands for Water Quality Improvement**. Boca Raton: Lewis.
- Kadlec, R. H. (1987). The Hydrodynamics of Wetland Water Treatment Systems, in Reddy, K. R. and Smith, W. H. (ed.). **Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery** (pp. 373-391). Orlando: Magnolia Public Inc.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). **Treatment Wetlands**. Boca Raton: Lewis.
- Kessomboon, S. (1990). **Piggery Wastewater Treatment by Aquatic Plant System**. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Lim Poh-Eng and Polprasert, C. (1996). Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Resource Recovery. **Environmental System Reviews**. N.14. ENSIC, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Metcalf & Eddy Inc. (1991). **Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse** (3rd Ed.). New York: McGraw-Hill.
- Miller, I. W. G. and Black, S. (1985). Design and Use of Artificial Wetlands. **Ecological Considerations in Wetland Treatment of Municipal Wastewater**. New York.

- Nagalingam Thayalakumaran. (1994). **Application of Constructed Wetlands to the Treatment of a Heavy Metal Wastewater**. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Nguyen Phuoc Dan. (1993). **Potential of Constructed Wetlands for Toxic Organic Waste Treatment**. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Oanh, N. T. K. (1991). **Assessment and Control of Wastewater in Meat Factories and Slaughterhouse**. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Praphon Kemmadamrong. (1992). **Anaerobic Baffle Reactor (ABR) Process for Treating a Slaughterhouse Wastewater**. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Reddy, K. R. and Debusk, W. F. (1987). Nutrient Storage Capabilities of Aquatic and Wetland Plants, in Reed, S.C. (eds.). **Aquatic Plants For Wastewater Treatment and Resource Recovery** (pp. 337-353). Orlando: Magnolia Public Inc.
- Reed, S. C. (1980). **Aquaculture Systems for Wastewater Treatment**. EPA 430/9-80-007.
- Reed, S. C. (1988). Engineering Assessment of Aquaculture Systems for Wastewater Treatment: Overview, in Reed, S.C. (eds.). **Aquaculture Systems for Wastewater Treatment and Engineering Assessment**. Washington D.C: U.S.EPA.
- Reed, S. C., Middlebrooks, E.J. and Crities, R.W. (1995). **Natural Systems for Waste Management and Treatment**. New York: McGraw-Hill.
- Siedel, K. (1976). Macrophytes and Water Purification. **Biological Control of Water Pollution** (pp. 109-121). Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.
- Seidel, K., Happel, H. and Graue, G. (1978). **Contributions to Revitalisation of Water**. Stiftung Limnologische Arbeitsgruppe Dr. Seidel c.v. Meersburg. West Germany.
- Thammarat Koottatep. (1999). **Nitrogen Removal In Constructed Wetlands Located In The Tropics**. Ph.D. Dissertation, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Wolverton, B. C. and McDonald, R. C. (1975). **Water Hyacinths for Upgrading Sewage Lagoons to Meet Advanced Wastewater Treatment Standards**. Part I (x-72729). N.A.S.A. Technical Memorandum.
- Water Pollution Control Federation (1990). Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice No. FD-16. **Water Pollution Control Federation**. Alexandria. V.A.
- Zang, S.Q. (1997). A Laboratory Study of Poultry Abattoir Wastewater Treatment by Membrane Technology. **Canadian Agricultural Engineering**. 39(2): 99.

ภาคผนวก ก
การศึกษารติดตาม

ตารางที่ 1ก ผลการทดลองและการคำนวณของรูปถ่าย

Time (min)	Δt_i	C (g/L)	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0	0	0	0	0	0	0
5	5	0.059981	0.0012	0.005998	0.029991	0.149954
10	5	0.349892	0.006998	0.034989	0.0349892	3.498915
15	5	4.458617	0.089172	0.445862	6.687926	100.3189
20	5	6.737911	0.134758	0.673791	13.47582	269.5164
30	10	9.457067	0.189141	7.891413	56.7424	1702.272
60	30	8.647319	0.172946	5.188391	311.3035	18678.21
96	36	4.788515	0.09577	3.447731	330.9822	31774.29
120	24	2.669172	0.053383	1.281203	153.7443	18449.32
150	30	1.909408	0.038188	1.145645	171.8467	25777.01
180	30	1.099659	0.021993	0.659795	118.7632	21377.37
240	60	0.54983	0.010997	0.659795	158.3509	38004.22
300	60	0.349892	0.006998	0.41987	125.9609	37788.28
360	60	0.199938	0.003999	0.239926	86.37322	31094.36
420	60	0.119963	0.002399	0.143955	60.46125	25393.73
480	60	0.069978	0.0014	0.083974	40.3075	19347.6
540	60	0.049985	0.001	0.059981	32.38996	17490.58
600	60	0.039988	0.0008	0.047985	28.79107	17274.64
$C_0 = 50 \text{ g/L}$			sum	16.43031	1696.561	304525.3

การคำนวณสารติดตาม

$$\theta \text{ ทางทฤษฎี} = V/Q = 0.78 \text{ m}^3 / (0.2592 \text{ m}^3/\text{hr}) = 3.009 \text{ hrs.}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{1696.561}{16.43031} = 103.26 \text{ min}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{304525.3}{16.43031} - 10662.21518 = 7872.146$$

$$2d + 8d^2 = \sigma^2 / T_{\text{mean}}^2 = 7872.146 / 10662.21518 = 0.738$$
$$d = 0.2034$$

ตารางที่ ก2 ผลการทดลองและการคำนวณของกกลม

Time (min)	Δt_i	C (g/L)	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0	0	0	0	0	0	0
5	5	0.049985	0.001	0.004998	0.024992	0.124961
10	5	0.069978	0.0014	0.006998	0.069978	0.499783
15	5	1.399566	0.027991	0.139957	2.099349	31.49024
20	5	2.619188	0.052384	0.261919	5.239376	104.7675
30	10	5.278363	0.105567	1.055673	31.67018	950.1054
60	30	11.36648	0.22733	6.819885	409.1931	2455.59
90	30	10.70668	0.214134	6.424008	578.1607	52034.46
120	30	8.717297	0.174346	5.230378	627.6454	75317.44
150	30	6.487988	0.12976	3.892793	583.9189	87587.84
180	30	5.138407	0.102768	3.083044	554.9479	99890.62
240	60	3.28898	0.06578	3.946776	947.5596	227334.3
300	60	2.429247	0.048585	2.915096	874.5288	262358.6
360	60	2.019374	0.040387	2.423249	875.3695	314053
420	60	1.57951	0.03159	1.895412	796.0731	334350.7
480	60	1.069668	0.021393	1.283602	616.1289	295741.9
540	60	0.70978	0.014196	0.851736	459.9374	248366.2
600	60	0.539833	0.010797	0.647799	388.6795	233207.7
660	60	0.469854	0.009397	0.563825	372.1246	245602.2
720	60	0.399876	0.007998	0.479851	345.4929	248754.9
780	60	0.349892	0.006998	0.41987	327.4984	255448.8
840	60	0.309904	0.006198	0.371885	312.3831	262401.8
900	60	0.259919	0.005198	0.311903	280.713	252641.7
960	60	0.219932	0.004399	0.263918	253.3614	243227
1020	60	0.189941	0.003799	0.227929	232.4879	237137.7
1080	60	0.149954	0.002999	0.179944	194.3397	209886.9
1140	60	0.109966	0.002199	0.131959	150.4334	171494
$C_0 = 50 \text{ g/L}$			Sum	43.83441	10216.75	4382477

การคำนวณสารติดตาม

$$\theta \text{ ทางทฤษฎี} = \frac{V}{Q} = \frac{0.78 \text{ m}^3}{(0.1116 \text{ m}^3/\text{hr})} = 6.989 \text{ hrs.}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{10216.75}{43.83441} = 233.07 \text{ min}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{4382477}{43.83441} - 54321.6249 = 45656.38324$$

$$2d + 8d^2 = \sigma^2 / T_{\text{mean}}^2 = 45656.38324 / 54321.6249 = 0.84, \quad d = 0.2223$$

ภาคผนวก ข
ประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ 1x อุณหภูมิน้ำเสียในบ่อทดลอง

วัน	อุณหภูมิ (°C) ที่ระยะห่างจากจุดน้ำเข้า (m)		
	0	2	4
1	30	28	28
2	29.5	27.5	28.5
3	30	28	27.5
4	29	28	28
5	29	28.5	28
6	30.5	29	29
7	29	29	28.5

ตารางที่ 2ข ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ใช้กกลมที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆในช่วงระบบ
เข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	HRT (days)			
	3	7	11	15
1	208.94	168.80	168.47	112.00
2	193.18	178.30	155.04	111.10
3	200.00	164.78	158.92	111.36
4	190.76	163.50	153.60	107.30
5	181.83	153.25	157.11	110.21
6	181.82	161.28	152.17	105.84
7	181.82	168.44	153.25	102.80
8	182.78	162.15	154.16	111.66
9	184.24	169.65	152.46	103.46
10	181.82	160.44	153.26	103.04

ตารางที่ 3ข ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ใช้รูปถ่ายที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆในช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	HRT (days)			
	3	7	11	15
1	182.17	147.28	148.30	132.58
2	178.26	143.41	147.73	130.26
3	175.24	145.59	137.92	126.43
4	168.53	134.10	137.92	120.88
5	157.09	137.93	142.85	121.21
6	156.04	149.42	137.10	128.78
7	166.68	136.36	130.26	124.08
8	166.68	147.72	132.58	120.32
9	163.13	141.27	128.78	117.65
10	170.22	143.93	136.36	113.72

ตารางที่ 4x ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ของกกลม

HRT (days)	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variation
3	188.7	9.46	5.0
7	165.1	6.73	4.1
11	155.8	4.91	3.2
15	107.9	3.97	3.7

$$\text{Coefficient of variation} = (\text{Std.Dev.} \times 100) / \text{Mean}$$

ตารางที่ 5x ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ของรูปถามี

HRT (days)	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variation
3	168.4	8.50	5.0
7	142.7	5.17	3.6
11	137.9	6.68	4.8
15	123.6	5.93	4.8

$$\text{Coefficient of variation} = (\text{Std.Dev.} \times 100) / \text{Mean}$$

ตารางที่ 6x ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

พืช	OLR (kg-BOD/ha- d)	Q _{in} C _{in} (g/d)							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม & ธูปฤาษี	462.7	63.8	27.8	17.2	1.68	7.25	0.065	23.63	14.3
	200.5	27.4	11.9	7.4	0.72	3.11	0.028	10.13	6.1
	128.5	17.4	7.6	4.7	0.46	1.98	0.018	6.46	3.9
	92.6	12.8	5.6	3.4	0.34	1.45	0.013	4.73	2.9

*Coliform Bacteria × 10¹⁰

ตารางที่ 7x ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากระบบ

พืช	OLR (kg-BOD/ha- d)	Q _{out} C _{out} (g/d)							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม	462.7	2.54	0.70	0.39	0.265	1.32	0.017	150	2.39
	200.5	0.90	0.26	0.11	0.066	0.39	0.005	18.09	0.91
	128.5	0.54	0.16	0.06	0.032	0.21	0.003	11.25	0.55
	92.6	0.26	0.09	0.04	0.012	0.08	0.001	1.14	0.17
ธูปฤาษี	462.7	2.91	0.62	0.54	0.210	0.87	0.008	91.58	2.55
	200.5	0.95	0.20	0.19	0.056	0.33	0.003	27.38	1.01
	128.5	0.52	0.10	0.06	0.022	0.14	0.002	1.9	0.49
	92.6	0.33	0.07	0.03	0.008	0.07	0.001	1.3	0.22

*Coliform Bacteria × 10⁸

ตารางที่ 8x ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในแง่ความเข้มข้นของตัวแปรต่างๆ

พืช	OLR (kg-BOD/ha-d)	% Removal							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม	462.7	87	92	93	50	41	12	80	46
	200.5	88	92	94	67	55	31	93	47
	128.5	89	92	95	75	62	37	94	50
	92.6	93	94	95	87	79	76	99	78
รูปถ่าย	462.7	88	94	91	66	68	65	90	52
	200.5	90	95	93	78	70	67	92	53
	128.5	90	96	96	85	77	74	99	59
	92.6	91	96	97	92	85	83	99	74

*Coliform Bacteria

$$\% \text{Removal} = [C_{in}(\text{mg/L}) - C_{out}(\text{mg/L})] \times 100 / C_{in}(\text{mg/L})$$

ตารางที่ 9x ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในแง่อัตราการระบรทุก

พืช	OLR (kg-BOD/ha-d)	% Removal							
		COD	BOD	TSS	TP	TKN	NO ₃ ⁻ -N	Col. Bact.*	Oil & Grease
กกกลม	462.7	96	97.5	97.7	84	82	74	93.7	83
	200.5	96.7	97.8	98.5	91	88	81	98.2	85
	128.5	96.9	98.1	98.7	93	89	83	98.3	86
	92.6	97.9	98.4	98.8	96	95	94	99.8	94
รูปถ่าย	462.7	95.4	97.8	96.9	88	88	87	96.1	82
	200.5	96.5	98.1	97.4	92	89	88	97.3	83
	128.5	97	98.4	98.7	95	93	92	99.7	87
	92.6	97.4	98.8	99.1	98	96	95	99.7	92

*Coliform Bacteria

$$\% \text{Removal} = [Q_{in}C_{in}(\text{g/d}) - Q_{out}C_{out}(\text{g/d})] \times 100 / Q_{in}C_{in}(\text{g/d})$$

ตารางที่ 10x น้ำหนักของพืชที่ตัดออก

HRT (days)	น้ำหนัก (kg/m ²)	
	กกกลม	รูปดาบ
3	9.10	15.04
7	10.36	17.95
11	12.55	19.41
15	14.32	21.98

ตารางที่ 11x สัดส่วนของ MLVSS ในชั้นดิน

HRT (days)	% MLVSS	
	กกกลม	รูปดาบ
3	0.13	0.22
7	0.14	0.34
11	0.31	0.37
15	0.38	0.41

ภาคผนวก ก
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 1ค ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

Parameter	พืช	t	df	Significant (2-tailed)
COD	กกกลม	0	3	1
	รูปถ่าย	0	3	1
BOD	กกกลม	0	3	1
	รูปถ่าย	0	3	1
TSS	กกกลม	0	3	1
	รูปถ่าย	0	3	1
TP	กกกลม	-0.049	3	0.964
	รูปถ่าย	0.059	3	0.957
TKN	กกกลม	0.066	3	0.952
	รูปถ่าย	0.068	3	0.950
NO ₃ ⁻ -N	กกกลม	0.012	3	0.991
	รูปถ่าย	-0.014	3	0.990
Coliform Bacteria	กกกลม	-0.041	3	0.970
	รูปถ่าย	-0.027	3	0.980
Oil & Grease	กกกลม	-0.041	3	0.970
	รูปถ่าย	0.011	3	0.992

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด BOD ของกกกลม

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-2.431	0.039		-62.127	0.000
HRT	-1.059×10^{-2}	0.002	-0.970	-5.656	0.030

Dependent Variable: $\ln C/C_0$

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด BOD ของรูปถ่าย

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-2.756	0.041		-67.845	0.000
HRT	-1.346×10^{-2}	0.002	-0.980	-6.926	0.020

Dependent Variable: $\ln C/C_0$

ตารางที่ 4ค แบบจำลองการกำจัด BOD

พืชโผล่พ้นน้ำ	$C_{\text{ทดลอง}}$	$C_{\text{ทำนาย}}$
กกกลม	50	50.8
	47	46.7
	44	42.5
	38	39
ธูปฤาษี	37	36.07
	31	32.35
	29	28.66
	26	25.84

หน่วย mg/L

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด P ของกกกลม

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-0.353	0.131		-2.697	0.114
1/L _w	-15.743	1.943	-0.985	-8.101	0.015

Dependent Variable: $\ln C/C_0$

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นในแบบจำลองการกำจัด P ของรูปถั่ว

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-0.673	0.154		-4.356	0.049
1/L _w	-18.096	2.291	-0.984	-7.900	0.016

Dependent Variable: $\ln C/C_0$

ตารางที่ 7ค แบบจำลองการกำจัด P

พืชโผล่พ้นน้ำ	$C_{\text{ทดลอง}}$	$C_{\text{ทำนาย}}$
กกกลม	18.8	19.128
	12.2	12.686
	9.2	8.023
	5	5.429
ธูปฤาษี	12.6	13.25
	8.3	8.265
	5.7	4.88
	2.8	3.115

หน่วย mg/L

ตารางที่ 8ค ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มในแบบจำลองการกำจัด N ของกกกลม

พืช	แบบจำลองการกำจัด N	t	df	Sig. (2-tailed)
กกกลม	WPCF (1990)	2.855	3	0.065
	Knight et al (1993)	0.962	3	0.407

ตารางที่ 9ค ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มในแบบจำลองการกำจัด N ของรูปถายี่

พืช	แบบจำลองการกำจัด N	t	df	Sig. (2-tailed)
รูปถายี่	WPCF (1990)	-0.549	3	0.621
	Knight et al (1993)	-2.210	3	0.114

1. การคำนวณค่า K_{20} และ F

กกกลม

จากสมการถดถอยเชิงเส้น : $\ln C_e/C_0 = -(1.059 \times 10^{-2})t - 2.431$

$$\ln F = -2.431$$

$$F = 0.088$$

$$0.7K_T A_v^{1.75} = 1.059 \times 10^{-2}$$

$$K_T(0.7)(15.7)^{1.75} = 1.059 \times 10^{-2}$$

$$K_T = 1.22 \times 10^{-4}$$

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

$$K_{20} = (1.22 \times 10^{-4}) / 1.1^{(29-20)} = 5.2 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$$

รูปถ่าน

จากสมการถดถอยเชิงเส้น : $\ln C_e/C_0 = -(1.346 \times 10^{-2})t - 2.756$

$$\ln F = -2.756$$

$$F = 0.0635$$

$$0.7K_T A_v^{1.75} = 1.346 \times 10^{-2}$$

$$K_T(0.7)(15.7)^{1.75} = 1.346 \times 10^{-2}$$

$$K_T = 1.55 \times 10^{-4}$$

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

$$K_{20} = (1.55 \times 10^{-4}) / 1.1^{(29-20)} = 6.6 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$$

2. การคำนวณค่า K_A

กกกลม

จากสมการถดถอยเชิงเส้น : $\ln C_e/C_0 = -15.743/L_w - 0.353$

$$-K_A = -15.743$$

$$K_A = 15.743 \text{ mm/d}$$

รูปถายี่

จากสมการถดถอยเชิงเส้น : $\ln C_e/C_0 = -18.096/L_w - 0.673$

$$-K_A = -18.096$$

$$K_A = 18.096 \text{ mm/d}$$

ประวัติผู้เขียน

นายกฤตธี วงศ์สถิตย์ เกิดเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2517 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาเทคโนโลยีทรัพยากร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2540 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่ สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2541

ปัจจุบัน ทำงานที่บริษัท เอ็นไวรอนเมนทอล คอนเซอร์เวทีฟ เซอร์วิส จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรสิ่งแวดล้อม