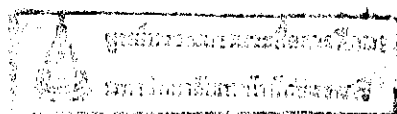


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง  
โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว

นาย วิฑิต ขอสันติวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2545  
ISBN 974-533-242-9



**UPGRADING OF EFFLUENTS QUALITY FROM TAPIOCA STARCH  
FACTORY BY SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND**

**Mr. Withit Khorsantiwivat**

**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 2002**

**ISBN 974-533-242-9**

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว  
UPGRADING OF EFFLUENTS QUALITY FROM TAPIOCA STARCH FACTORY BY  
SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



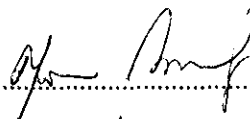
.....  
(อาจารย์ ดร. วุฒิ ดานกิตติกุล)

ประธานกรรมการ



.....  
(อาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธานี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



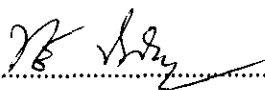
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวศา กานตวนิชกูร)

กรรมการ



.....  
(อาจารย์ ดร. จงพันธ์ จงลักษณะณี)

กรรมการ



.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



.....  
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร. วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิจิต ขอสันติวิวัฒน์ : การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว (UPGRADING OF EFFLUENTS QUALITY FROM TAPIOCA STARCH FACTORY BY SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND) อ. ที่ปรึกษา : ดร. ณัฐวุฒิ ธานี, 70 หน้า.  
ISBN 974-533-242-9

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวโดยใช้กกกลม (*Cyperus corymbosus*) แบบจำลองเป็นบ่อสังกะสีขนาด 60×200×70 เซนติเมตร จำนวน 4 หน่วยการทดลอง แต่ละหน่วยการทดลองบรรจุหินตัวกลางแต่ละขนาด โดยบรรจุตัวกลางสูง 50 เซนติเมตร ระดับน้ำลึก 40 เซนติเมตร หินตัวกลางมีความพรุน 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5 และ 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD

ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ BOD สูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บที่ 7 วันและที่ค่าความพรุนของหินตัวกลาง 0.400 และ 0.420 ได้ 72.95% และ 74.76% และ 86.67% และ 87.33% ตามลำดับ ส่วนการกำจัด TDS, TSS, TKN, NO<sub>3</sub>-N และ NH<sub>3</sub> ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บ 7 วันทีค่าความพรุนของหินตัวกลาง 0.400 ประสิทธิภาพการกำจัดได้ 22.23%, 84.15%, 89.84%, 82.23% และ 95.13% ตามลำดับ ระยะเวลากักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด คือระยะเวลากักเก็บสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้น ส่วนค่าความพรุนจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด คือค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้น (P=0.05)

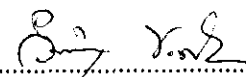
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD ที่ค่าความพรุน 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 คือ


$$\ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.288t, \quad \ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.291t, \quad \ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.197t \quad \text{และ} \quad \ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.169t$$

ตามลำดับ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

WITHIT KHORSANTIWIWAT : UPGRADING OF EFFLUENTS QUALITY  
FROM TAPIOCA STARCH FACTORY BY SUBSURFACE FLOW  
CONSTRUCTED WETLAND THESIS ADVISOR : NATHAWUT THANEE,  
Ph.D. 70 PP. ISBN 974-533-242-9

WATER QUALITY/SUBSURFACE FLOW/CONSTRUCTED WETLAND/RETENTION  
TIME/POROSITY

Four lab-scale of subsurface flow constructed wetland systems grown with *Cyperus corymbosus* were operated to study the water quality improvement and mathematical model of BOD removal of tapioca starch wastewater. The experimental units were constructed with zinc of 60×200×70 cm and were operated with the hydraulic retention time (HRT) of 1 day, 3,5 and 7 days. Each unit was contained different porosities of rock media: 0.400, 0.420, 0.439 and 0.465 with 50 cm in their height and 40 cm of water level.

The results showed that the highest COD and BOD removal efficiencies were at 7 days of HRT and media porosities of 0.400 and 0.420. They were 72.95% and 74.76% and 86.67% and 87.33% respectively. Whereas the highest TDS, TSS, TKN, NO<sub>3</sub>-N and NH<sub>3</sub> removal efficiencies at 7 days HRT and media porosity of 0.400 were 22.33%, 84.15%, 89.84%, 82.23% and 95.13% respectively. The removal efficiencies depended on the HRT and the porosity of rock media. As the HRT increased and the porosity of rock media decreased, the removal efficiency increased.

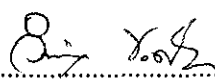
Mathematical models of BOD removal of tapioca starch wastewater are

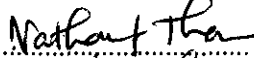
$$\ln\left(\frac{C_e}{C_0}\right) = -0.288t, \quad \ln\left(\frac{C_e}{C_0}\right) = -0.291t, \quad \ln\left(\frac{C_e}{C_0}\right) = -0.197t \quad \text{and} \quad \ln\left(\frac{C_e}{C_0}\right) = -0.169t,$$

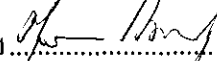
corresponding to media porosities of 0.400, 0.420, 0.439 and 0.465 respectively.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างค้ำจุน ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ดร. ฉัฐวุฒิ ธาณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร. ศุวศา กานตวนิชกูร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์
- ดร. วุฒิ คำนุกิตติกุล และ ดร. จงพันธ์ จงลักษณ์งณี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณนารี กลิ่นกลาง ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน คุณมานพ จร โลกกรวด คุณวินัย เขาวเรศ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา
- คุณเทียนชัย เขียดแก้ว คุณนุกูล กุศลแสง คุณปราโมช คงศักดิ์ตระกูล รวมไปถึงพี่และเพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาเอกและปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและชีววิทยาสังแวดล้อม ทุกๆท่าน ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในทุกๆด้านมาโดยตลอด
- ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัย
- บริษัท เจ้าพระยาพีชไร้ จำกัด ที่ให้ใช้น้ำทิ้งในการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วิทิต ขอสันติวิวัฒน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดการวิจัย.....	2
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	3
2.2 ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	4
2.2.1 แบบไหลผ่านผิว.....	4
2.2.2 แบบไหลใต้ผิว.....	5
2.3 กลไกในการบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.3.1 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	6
2.3.2 การกำจัดของแข็ง.....	6
2.3.3 การกำจัดไนโตรเจน.....	8
2.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส.....	9
2.4 พืชโคล่าพื้นน้ำ.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	บทบาทของพืชในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำ.....	11
2.5.1	ผลทางฟิสิกส์.....	11
2.5.2	ผลต่อค่าการนำทางศาสตร์ของดิน.....	12
2.5.3	พื้นที่ผิวสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์.....	12
2.5.4	การนำสารอาหารไปใช้.....	12
2.5.5	การปลดปล่อยจากราก.....	12
2.6	ตัวกลาง.....	12
2.7	สิ่งมีชีวิต.....	13
2.8	ราคา.....	13
2.9	ตัวแปรในการออกแบบระบบ.....	14
2.9.1	ระยะเวลาที่เก็บ.....	15
2.9.2	อัตราภาระอินทรีย์.....	15
2.9.3	อัตราภาระทางศาสตร์.....	15
2.9.4	การออกแบบแบบจำลองการกำจัด BOD.....	15
2.9.5	การออกแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจน.....	18
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1	รูปแบบการวิจัย.....	20
3.2	ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	20
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	20
3.3.1	การสร้างแบบจำลอง.....	20
3.3.2	การเตรียมต้นพันธุ์และการปลูกพืช.....	20
3.3.3	ตัวกลาง.....	23
3.4	การดำเนินการวิจัย.....	23
3.5	ตัวแปรในการศึกษา.....	25
3.5.1	ตัวแปรกำหนด.....	25



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2	ตัวแปรอิสระ.....	25
3.5.3	ตัวแปรตาม.....	25
3.6	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.6.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์น้ำ.....	26
3.7	การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	26
3.8	การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ.....	27
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	29
4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	29
4.1.1	ประสิทธิภาพการกำจัด COD.....	29
4.1.2	ประสิทธิภาพการกำจัด BOD.....	30
4.1.3	ประสิทธิภาพการกำจัด TDS.....	32
4.1.4	ประสิทธิภาพการกำจัด TSS.....	33
4.1.5	ประสิทธิภาพการกำจัด TKN.....	34
4.1.6	ประสิทธิภาพการกำจัด NO <sub>3</sub> -N.....	36
4.1.7	ประสิทธิภาพการกำจัด NH <sub>3</sub> .....	37
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	38
4.2.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD.....	38
4.3	อัตราการเจริญเติบโตของพืชโผล่พื้นน้ำ.....	40
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	43
	เอกสารอ้างอิง.....	44
	ภาคผนวก.....	48
	ภาคผนวก ก.....	48
	ภาคผนวก ข.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค.....	57
ภาคผนวก ง.....	68
ภาคผนวก จ.....	69
ประวัติผู้เขียน .....	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปหลักการการกำจัดและกลไกการเปลี่ยนรูปของมลสารที่อยู่ในน้ำเสียโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 7
2.2	สรุปเกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ..... 14
2.3	ชนิดของตัวกลางและลักษณะเฉพาะสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ..... 17
3.1	ขนาดเบอร์หินและความพรุนของตัวกลาง..... 23
3.2	สรุปค่าออกแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว..... 24
3.3	วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ..... 27
3.4	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานแปงมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง..... 27
4.1	ผลการทดสอบถอดอยเชิงเส้น ..... 39
ก1	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ..... 48
ข1	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ..... 49
ข2	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ..... 50
ข3	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ..... 51
ข4	ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.465 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ..... 52
ข5	ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ..... 53
ข6	ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ที่ระยะเวลาเก็บค่าต่างๆ..... 54

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข7 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ.....	55
ข8 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ.....	56
ค1 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ COD.....	57
ค2 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ BOD.....	58
ค3 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ TDS.....	59
ค4 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ TSS .....	60
ค5 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ TKN.....	61
ค6 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ NO <sub>3</sub> -N.....	62
ค7 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ของ NH <sub>3</sub> .....	63
ค8 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400.....	64
ค9 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400.....	64
ค10 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400 .....	64
ค11 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420.....	65
ค12 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420.....	65
ค13 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420 .....	65
ค14 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439.....	66

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค15 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439.....	66
ค16 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439 .....	66
ค17 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465 .....	67
ค18 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465.....	67
ค19 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465 .....	67
ง1 มวลชีวภาพกกลม.....	68
จ1 เปรียบเทียบน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ระยะเวลาพักเก็บ และค่าความพรุนของตัวกลาง 0.400 กับ 0.420 .....	69

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบไหลผ่านผิว..... 4
2.2	แบบไหลใต้ผิว..... 5
2.3	การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำ..... 9
2.4	กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ..... 10
2.5	ชนิดของพืช ใต้อ่างน้ำ..... 11
3.1	แบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 21
3.2	ทางน้ำเข้าและออกในแบบจำลอง..... 22
3.3	ตำแหน่งการปลูกพืชในระบบ..... 23
4.1	ร้อยละการกำจัด COD กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 30
4.2	ร้อยละการกำจัด BOD กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 31
4.3	ร้อยละการกำจัด TDS กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 33
4.4	ร้อยละการกำจัด TSS กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 34
4.5	ร้อยละการกำจัด TKN กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 35
4.6	ร้อยละการกำจัด NO <sub>3</sub> -N กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 36
4.7	ร้อยละการกำจัด NH <sub>3</sub> กับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 38
4.8	มวลชีวภาพกับระยะเวลาที่กักเก็บ..... 41

## อธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

$\alpha$	=	สัดส่วนช่องว่างหรือค่าความพรุนตัวกลาง
$\theta$	=	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (temperature coefficient)
A	=	พื้นที่ของระบบ, $m^2$
$A_c$	=	พื้นที่หน้าตัดของชั้นตัวกลางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, $m^2$
$A_h$	=	พื้นที่ของระบบ, $m^2$
AL	=	สระเติมอากาศ (aerated lagoon)
BOD	=	ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biochemical oxygen demand)
$C_c$	=	BOD <sub>5</sub> ออก, mg/L
cm	=	เซนติเมตร
$C_o$	=	BOD <sub>5</sub> เข้า, mg/L
COD	=	ความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (chemical oxygen demand)
d	=	ค่าความลึกของการไหล, m
FWS	=	แบบไหลผ่านผิว (free water surface system)
ha	=	เฮกแตร์
HLR	=	อัตราการทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate)
HRT	=	ระยะเวลากักเก็บ (hydraulic retention time)
$K_{20}$	=	ค่าคงที่ที่ 20°C
kg	=	กิโลกรัม
$K_s$	=	ค่าการนำทางชลศาสตร์ของตัวกลาง, $m^3/m^2-d$
L	=	ความยาวของระบบ, m
m	=	เมตร
$N_2$	=	ก๊าซไนโตรเจน (nitrogen gas)
$N_2O$	=	ไนตรัสออกไซด์ (nitrous oxide)
$NH_3$	=	แอมโมเนีย (ammonia)
$NH_4^+$	=	แอมโมเนียม (ammonium)
$NO_2^-$	=	ไนไตรต์ (nitrite)

## อธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ (ต่อ)

$\text{NO}_3\text{-N}$	=	ไนเตรตไนโตรเจน (nitrate nitrogen)
OLR	=	อัตราการอินทรีย์ (organic loading rate)
Q	=	อัตราการไหลเฉลี่ยผ่านระบบ, $\text{m}^3/\text{d}$
S	=	ความเข้มข้นของชั้นตัวกลางหรือความลาดทางชลศาสตร์
SF	=	แบบไหลใต้ผิว (subsurface flow system)
T	=	อุณหภูมิ (temperature)
$t'$	=	เวลากักเก็บ
TDS	=	ของแข็งละลายทั้งหมด (total dissolved solids)
TKN	=	total Kjeldahl nitrogen
TN	=	ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)
TP	=	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus)
TSS	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids)
VF	=	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลตามแนวตั้ง (vertical flow constructed wetland)
W	=	ความกว้างของระบบ, m



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตแป้งจากมันสำปะหลังในประเทศไทยมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น ทั้งในด้านปริมาณการผลิตและจำนวนโรงงาน ปัญหาที่ตามมาจากการดำเนินกิจกรรมของโรงงาน เหล่านี้คือเรื่องของน้ำทิ้ง เนื่องจากการผลิตแป้งจำเป็นต้องใช้น้ำปริมาณมาก นับตั้งแต่การล้าง หัวมันซึ่งน้ำทิ้งในส่วนนี้จะมีตะกอนดินและสิ่งสกปรกอื่นๆปะปนอยู่ด้วย อีกทั้งการใช้น้ำในการ ข่อยสลายหัวมันซึ่งน้ำที่ผ่านการแยกแป้งออกแล้วจะเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ สูง อีกทั้งมีสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวมอยู่ด้วย น้ำทิ้งเหล่านี้ถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อนจะทำให้แหล่งน้ำ นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและชีวภาพจนมีคุณภาพลดต่ำลง และอาจเป็นสาเหตุให้พืช น้ำที่มีอยู่เดิมเกิดการเจริญเติบโตได้ดี จนทำให้เกิดการเสียดุลของระบบนิเวศในแหล่งน้ำนั้น และ เกิดการเน่าเสียตามมา นอกจากนี้ปัญหาระง่อนของน้ำเสียและทัศนียภาพที่ไม่สวยงามยังส่งผล กระทบต่อสุขภาพผู้คนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงทั้งสุขภาพกายและสุขภาพจิตอีกด้วย

ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม กำหนด สำหรับวิธีการที่เหมาะสมในการนำมาใช้ควรเป็นระบบบำบัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดหรือไม่ ใช้พลังงานและเครื่องจักรกลใดๆ เนื่องจากน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นต่อวันของโรงงานเหล่านี้มีปริมาณมาก ระบบที่นำมาใช้ควรเป็นระบบที่อาศัยกลไกทางธรรมชาติ อาศัยการบำบัดของดิน พืช จุลินทรีย์ และ บรรยากาศมาทำงานร่วมกันในการบำบัดเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการดูแลรักษาต่ำ

ด้วยเหตุนี้ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวเข้ามาใช้ในการ ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยพืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ ต้นกกกลม (*Cyperus corymbosus*) ซึ่งเป็นพืชน้ำที่ปลูกได้ง่าย เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ที่นำ มาใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว โดยนำมาใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สาม (tertiary treatment) สำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) มาแล้ว ซึ่งนอกจากช่วยใน การปรับปรุงลักษณะทางด้านกายภาพและชีวภาพของน้ำ ให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และยังช่วยลดปัญหาที่เกิดกับประชาชนที่อยู่อาศัยโดยรอบ และ

ผลดีอีกอย่างที่ได้จากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว คือสามารถนำต้นกกกลม นำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านตัดกรรม และ อื่นๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับประชาชนในท้องถิ่นอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว (subsurface flow constructed wetland)

1.2.2 เพื่อศึกษาหาค่าเวลากักเก็บ (retention time) และ ขนาดของตัวกลาง (media size) ที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว

1.2.3 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว เพื่อนำมาใช้ในการอธิบายการย่อยสลายสารอินทรีย์

## 1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดการวิจัย

1.3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของระบบได้แก่ ค่า BOD, COD, TDS, TSS, TKN,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_3$  โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำก่อนและหลังผ่านการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว

1.3.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังโรงงานเจ้าพระยาพีชไร้ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) มาแล้ว

1.3.3 พืชที่ใช้ในการวิจัย คือ กกกลม (*Cyperus corymbosus*)

## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetlands) ตามอนุสัญญาแรมซาร์ (Ramsar Convention) หรืออนุสัญญาว่าด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีความสำคัญระดับนานาชาติ หมายถึง ที่ลุ่ม ที่ราบลุ่ม ที่ลุ่มชื้นแฉะ พรุ แหล่งน้ำทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ทั้งที่มีน้ำขังหรือท่วมอยู่ถาวรและชั่วคราว ทั้งที่เป็นแหล่งน้ำนิ่งและน้ำไหล ทั้งที่เป็นน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำเค็ม รวมไปถึงที่ชายฝั่งทะเลและที่ในทะเลในบริเวณซึ่งเมื่อน้ำลดลงต่ำสุดมีความลึกระดับน้ำไม่เกิน 6 เมตร (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2542) พื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติเคยถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแต่มีข้อจำกัดในการทำงานของระบบ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ อีกทั้งมลพิษที่อยู่ในน้ำเสียมีผลกระทบต่อระบบนิเวศและการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (constructed wetland) เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยได้ออกแบบระบบที่ลดข้อด้อยแต่ยังคงข้อดีของพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติไว้ ซึ่งกระบวนการต่างๆ ในระบบมีการพัฒนาให้ดีขึ้นเนื่องจากสามารถควบคุมและจัดองค์ประกอบต่างๆ ได้ตามต้องการ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้สามารถสร้างได้จากที่ลุ่มน้ำขังหรือที่ดินอื่นๆ ที่มีข้อจำกัดในการใช้ พืชโคล่พื้นที่น้ำที่นิยมใช้ได้แก่ ต้นธูปฤาษี (*Typha* spp.) กก (*Scirpus* spp.) และอ้อ (*Phragmites communis*) เป็นต้น (Lim and Polprasert, 1996)

โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติสามารถสร้างและดำเนินการได้ในราคาต่ำกว่าระบบอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการใช้พืชน้ำในการบำบัดน้ำเสียแล้ว พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากสามารถทนต่ออัตราการอินทรีย์ (organic loading rate) ที่มีค่าสูงโดยใช้ระยะเวลากักเก็บ (hydraulic retention time) ที่สั้นกว่าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบ ทั้งการใช้พื้นที่ก็น้อยกว่าอีกด้วย นอกจากนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังมีความสามารถในการบำบัดมลพิษที่อยู่ในน้ำได้มากกว่าหนึ่งชนิดในเวลาเดียวกัน เช่น สามารถลดค่า BOD (biochemical oxygen demand), ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen, TN) และของแข็งแขวนลอย (total suspended solids, TSS) ได้พร้อมกัน ซึ่งพบได้น้อยในระบบที่ใช้พืชน้ำอื่นๆ

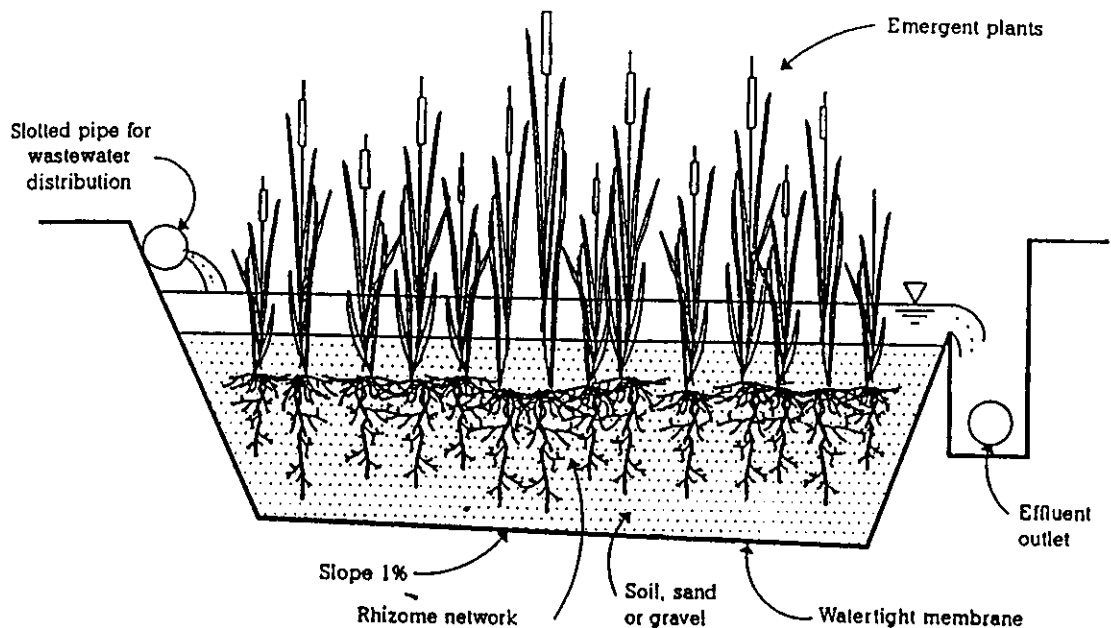
## 2.2 ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของลักษณะการไหล ตัวกลางที่ใช้ และชนิดของพืชโผล่พ้นน้ำ โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 แบบ

- แบบไหลผ่านผิว (free water surface system, FWS)
- แบบไหลใต้ผิว (subsurface flow system, SF)

### 2.2.1 แบบไหลผ่านผิว (free water surface system, FWS)

แบบไหลผ่านผิวระบบนี้จะจำลองมาจากที่ลุ่มน้ำขังตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ที่มีชั้นของดินเหนียวหรือวัสดุอื่นปูลาดที่พื้นล่างสุดเพื่อป้องกันการไหลซึมออกของน้ำ ถัดขึ้นมาจะเป็นชั้นของดินหรือตัวกลางอื่นที่มีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของพืชโผล่พ้นน้ำ น้ำเสียมีความลึกไม่มากนักอยู่ระหว่าง 0.1-0.6 เมตร จะไหลตามแนวขวางเหนือชั้นดินอย่างช้าๆ ลักษณะการไหลจะใกล้เคียงการไหลแบบหลอด (plug-flow hydraulic pattern)



รูปที่ 2.1 แบบไหลผ่านผิว (free water surface system, FWS)

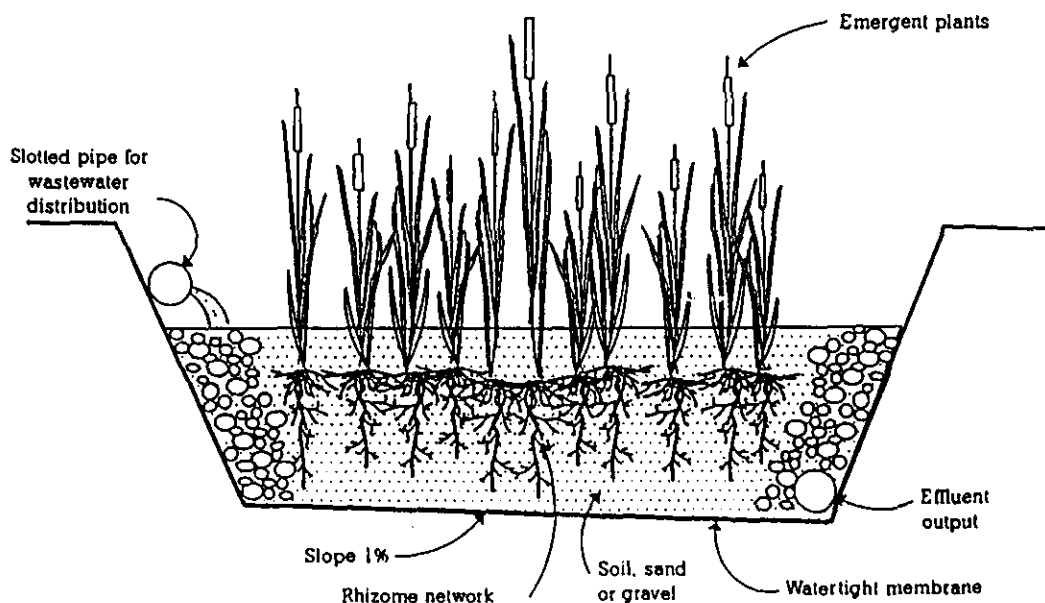
(Lim and Polprasert, 1996)

### 2.2.2 แบบไหลใต้ผิว (subsurface flow system, SF)

แบบไหลใต้ผิว ระบบนี้จะมียอดน้ำประกอบในระบบเหมือนกับระบบ FWS แต่การไหลของน้ำเสียจะจำกัดอยู่ที่ชั้นใต้ผิว ตัวกลางที่ใช้โดยทั่วไปประกอบด้วยดิน ทราย กรวด และหินตามลำดับ ซึ่งจะให้ค่าความพรุนที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลของน้ำเสียมียังทั้งการไหลขึ้น (upflow) การไหลลง (downflow) หรือการไหลตามแนวขวาง (horizontal flow) แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือการไหลตามแนวขวาง โดยมากมีการออกแบบระบบให้มีค่าความชัน (slope) ร้อยละ 1 หรือมากกว่าเล็กน้อย

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลาง จะมีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียบนพื้นผิวตัวกลางและรากพืช โดยตรงในส่วนที่อยู่ใต้ผิว (subsurface zone) โดยทั่วไปจะอยู่ในสภาพแอนอ็อกซิก (anoxic) แต่พืชจะสามารถถ่ายเทออกซิเจนส่วนเกินมาที่ระบบราก ดังนั้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนที่ราก (roots) และลำต้นใต้ดิน (rhizomes)

สารประกอบอินทรีย์จะถูกกำจัดทั้งในสภาพแอโรบิก (aerobic) และแอนแอโรบิก (anaerobic) โดยแบคทีเรีย พื้นผิวตัวกลางและโครงสร้างของพืชที่อยู่ใต้ดิน (เช่นรากและลำต้นใต้ดิน) ออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบแอโรบิกมาจากการแพร่โดยตรงจากบรรยากาศ และปล่อยออกจากรากและลำต้นใต้ดินในชั้นรากพืช (rhizosphere)



รูปที่ 2.2 แบบไหลใต้ผิว (subsurface flow system, SF)

(Lim and Polprasert, 1996)

## 2.3 กลไกในการบำบัดน้ำเสีย

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถลดสารปนเปื้อนในน้ำเสียได้หลายชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์ในรูปของ BOD, COD (chemical oxygen demand), ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะ และ เชื้อโรคต่างๆ ซึ่งกลไกที่เกิดของสารแต่ละตัวจะแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

### 2.3.1 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable matter removal)

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD หรือ COD) ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน BOD ที่เหลืออยู่จะสัมพันธ์กับปริมาณของของแข็งตกตะกอน (settleable solids) ที่ถูกกำจัดโดยกระบวนการตกตะกอน (sedimentation) ทั้งระบบ SF และ FWS จำเป็นต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่เหมือนบ่อบำบัดแบบติดผิวชีวภาพ (attached growth biological reactor) กลไกการกำจัด BOD ในฟิล์มชีวภาพ (biofilms) จะคล้ายกับระบบโปรยกรอง (trickling filter) การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำถูกพามาที่ฟิล์มชีวภาพบนลำต้นส่วนที่อยู่ใต้ดิน (สำหรับระบบ FWS) ระบบรากบริเวณรอบๆ ดินหรือตัวกลาง โดยกระบวนการแพร่กระจาย (diffusion process)

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ พบว่าทั้งระบบ SF และ FWS จะมีลักษณะที่เหมือนกันคือ BOD ที่เกิดขึ้นในระบบ เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชและสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งผลที่ตามมาคือ ระบบไม่สามารถกำจัด BOD ได้อย่างสมบูรณ์ และมี BOD ปริมาณ 2-7 mg/L ที่บริเวณทางน้ำออก (U.S. EPA, 1993)

### 2.3.2 การกำจัดของแข็ง (solids removal)

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ของแข็งที่ตกตะกอนได้จะถูกกำจัดได้ง่ายโดยการตกตะกอนด้วยแรงดึงดูดของโลกเมื่อมีระยะเวลาที่เก็บที่นานพอ ของแข็งที่ไม่ตกตะกอนหรือคอลลอยด์จะมีกลไกการกำจัดคือ การกรอง ในกรณีที่ใช้ทรายเป็นตัวกลาง การตกตะกอนและการย่อยสลายทางชีวภาพ (เป็นผลจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย) และการปะทะกัน (collision) แล้วดูดติดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) กับของแข็งอื่นๆ พืช ดิน ทราย กรวด เป็นต้น สำหรับการใช้กรวดเป็นตัวกลางอันเป็นองค์ประกอบสำคัญของการไหลได้ผิว Sapkota and Bavor (1994) กล่าวว่า การกำจัดของแข็งแขวนลอยในเบื้องต้นจะเกิดขึ้นโดยการตกตะกอนและการย่อยสลายทางชีวภาพคล้ายกับที่เกิดขึ้นในระบบโปรยกรอง (trickling filter)

ตารางที่ 2.1 สรุปหลักการการกำจัดและกลไกการเปลี่ยนรูปของมลสารที่อยู่ในน้ำเสียโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Crites and Tchobanoglous, 1998)

ส่วนประกอบ	ระบบไหลผ่านผิว	ระบบไหลใต้ผิว
สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีววิทยา	- การเปลี่ยนรูปทางชีววิทยาโดยสถานะแอโรบิก แพล็คเททีฟและแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนพืชและตะกอนที่ทับถมบนพื้นผิว	- การเปลี่ยนรูปทางชีววิทยาโดยสถานะแอโรบิก แพล็คเททีฟและแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนพืชและตะกอนที่ทับถมบนพื้นผิว
ของแข็งแขวนลอย	- กระบวนการดูดติดผิว - การกรองและตกตะกอน - การตกตะกอน	- กระบวนการดูดติดผิว - การกรอง - การตกตะกอน
ไนโตรเจน	- ไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน - การดูดซึมโดยพืช - การระเหยเป็นไอ	- ไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน - การดูดซึมโดยพืช - การระเหยเป็นไอ
ฟอสฟอรัส	- การตกตะกอน - การดูดซึมโดยพืช	- การกรอง - การตกตะกอน - การดูดซึมโดยพืช
โลหะหนัก	- การดูดติดผิวของพืชและตะกอนที่ทับถม - การตกตะกอน	- การดูดติดผิวรากพืชและตะกอนที่ทับถม - การตกตะกอน
สารอินทรีย์ปริมาณน้อย	- การระเหยเป็นไอ - การดูดติดผิว - การย่อยสลายทางชีววิทยา	- การดูดติดผิว - การย่อยสลายทางชีววิทยา
เชื้อโรค	- การตายทางธรรมชาติ - การถูกกินโดยสัตว์อื่น - รังสี UV - การตกตะกอน - รากของพืชปล่อยสาร antibiotics	- การตายทางธรรมชาติ - การถูกกินโดยสัตว์อื่น - รังสี UV - การตกตะกอน - รากของพืชปล่อยสาร antibiotics

ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทุกประเภทของแข็งส่วนใหญ่ในน้ำเสียจะถูกกรองและตกตะกอนบริเวณใกล้ทางน้ำเข้า (inlet zone) จากการทดลองของ Bavor and Schulz (1993) พบว่า 80-90 % ของของแข็งที่อยู่ในน้ำเสียจะระเหยออกไป แต่ในหลายๆ ระบบของแข็งจมน้ำจะถูกกำจัดออกในกลไกการบำบัดเบื้องต้น เช่น การตกตะกอน หรือ ถังอิมฮอฟ (Imhoff tank) ก่อนที่น้ำเสียจะไหลเข้าสู่พื้นที่ชุ่มน้ำ

### 2.3.3 การกำจัดไนโตรเจน (nitrogen removal)

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำ มี 3 รูปแบบคือ

- ไนตริฟิเคชัน (nitrification) / ดีไนตริฟิเคชัน (denitrification)
- การระเหยในรูปแอมโมเนีย (volatilization of ammonia)
- การดูดซึมของพืช (uptake by plants)

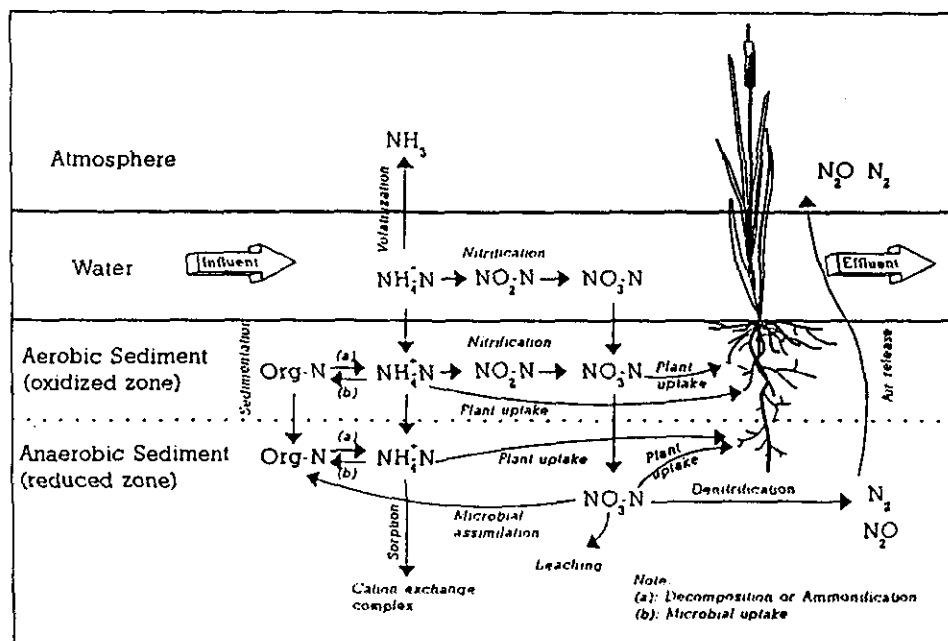
กลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจนออกจากระบบคือกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังใช้การระเหยเป็นไอ การดูดติดผิว และการดูดซึมไปใช้โดยพืช แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรตโดยไนตริไฟอิงแบคทีเรียในแอโรบิกโซน และไนเตรตจะเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนโดยดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียในแอนแอโรบิกโซน แต่เนื่องจากออกซิเจนในชั้นรากพืชมีไม่เพียงพอ ดังนั้นการเกิดไนตริฟิเคชันจึงไม่สมบูรณ์อันเป็นข้อจำกัดของการกำจัดไนโตรเจนของระบบนี้ ส่วนกลไกอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วมีบทบาทน้อยมากในการกำจัดไนโตรเจน

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเกิดในชั้นออกซิไดซ์ (oxidized) และรีดิวซ์ (reduced) ของดิน ผิวหน้าของรากฝอย (root-soil) และ ส่วนของพืชที่จมอยู่ใต้ดินดังแสดงในรูปที่ 2.3 สารอินทรีย์ไนโตรเจน (organic-N) จะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของชั้นดิน ชั้นของการออกซิไดซ์และส่วนที่อยู่ใต้ดินของพืชเป็นตำแหน่งสำคัญสำหรับไนตริฟิเคชันที่แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) โดยแบคทีเรีย *Nitrosomanas* และเปลี่ยนเป็นไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ในที่สุดโดยแบคทีเรีย *Nitrobacter* ที่ระดับ pH สูง แอมโมเนียม จะอยู่ในรูปก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และสูญหายไปในบรรยากาศโดยกระบวนการระเหย ไนเตรตในชั้นรีดิวซ์จะลดลงโดยผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน การกรองและบางส่วนถูกพืชดูดซึมไปใช้ อย่างไรก็ตามจะได้รับไนเตรตจากโซนออกซิไดซ์ด้วยการแพร่กระจาย

ในส่วนของรากฝอยออกซิเจนจากบรรยากาศจะแพร่กระจายเข้าสู่ช่องว่างภายในรากผ่านทางใบ ลำต้นและรากของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำและทำให้เกิดชั้นแอนออกซิคลากซ์กับที่เกิดบริเวณผิวดิน ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นในช่องว่างภายในรากโดยที่แอมโมเนียมจะออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรต พืชจะไม่นำไนเตรตไปยังแอนออกซิคลากซ์ซึ่งมีการรีดิวซ์ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) และไนทรัส



ออกไซด์  $N_2O$  โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แอมโมเนียที่อยู่ในช่องว่างภายในรากจะมีมากขึ้น จากแอมโมเนียมที่อยู่ในแอนอ็อกซิไดซัน โดยการแพร่กระจายเข้ามา



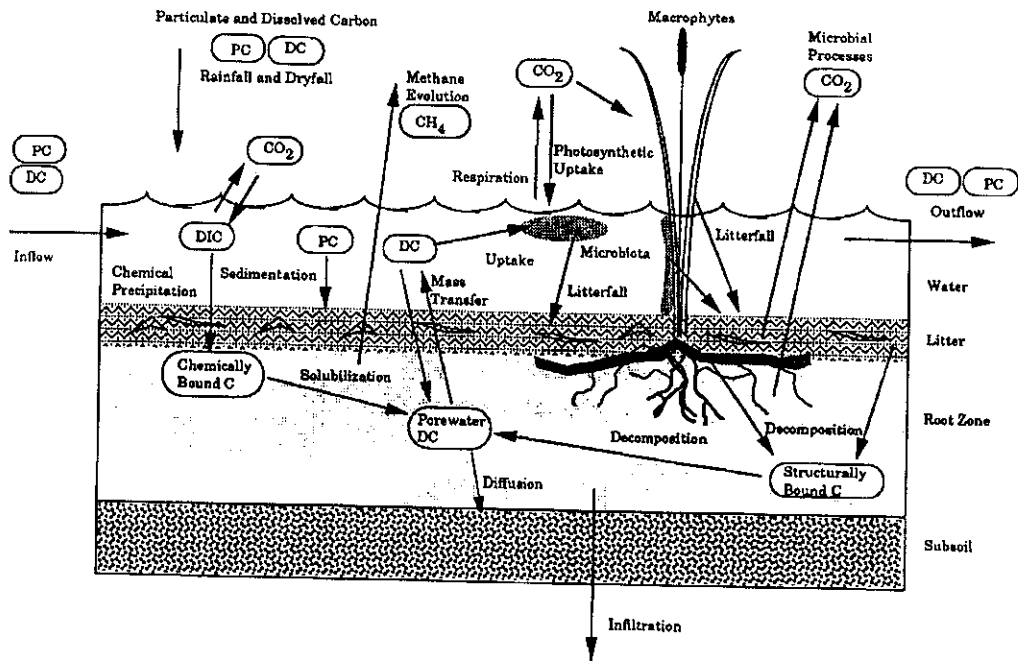
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ

(Lim and Polprasert, 1996)

### 2.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส (phosphorus removal)

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัส ในพื้นที่ชุ่มน้ำประกอบด้วย การดูดซึมโดยพืช การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การดูดติดบนผิวดินหรือมลสารอินทรีย์และการตกตะกอนด้วย  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  ในกรณีที่มีระยะเวลาเก็บที่นานและชั้นตัวกลางเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด กลไกหลักที่เกิดขึ้น คือ การดูดติดผิวแล้วตกตะกอน เนื่องจากในกรณีดังกล่าวฟอสฟอรัสจะมีเวลาสัมผัสและดูดซึมเข้าไปในดินได้มากขึ้น (Reed and Brown, 1992; Reed, Middlebrooks and Crites, 1988) เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เก็บอยู่ในดินมากขึ้น ดินจะถูกขุดลอกออกมาเพื่อนำไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสมต่อไป

กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากการศึกษาของ (Adrock, Ryan and Osborne, 1995) พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ร้อยละ 68



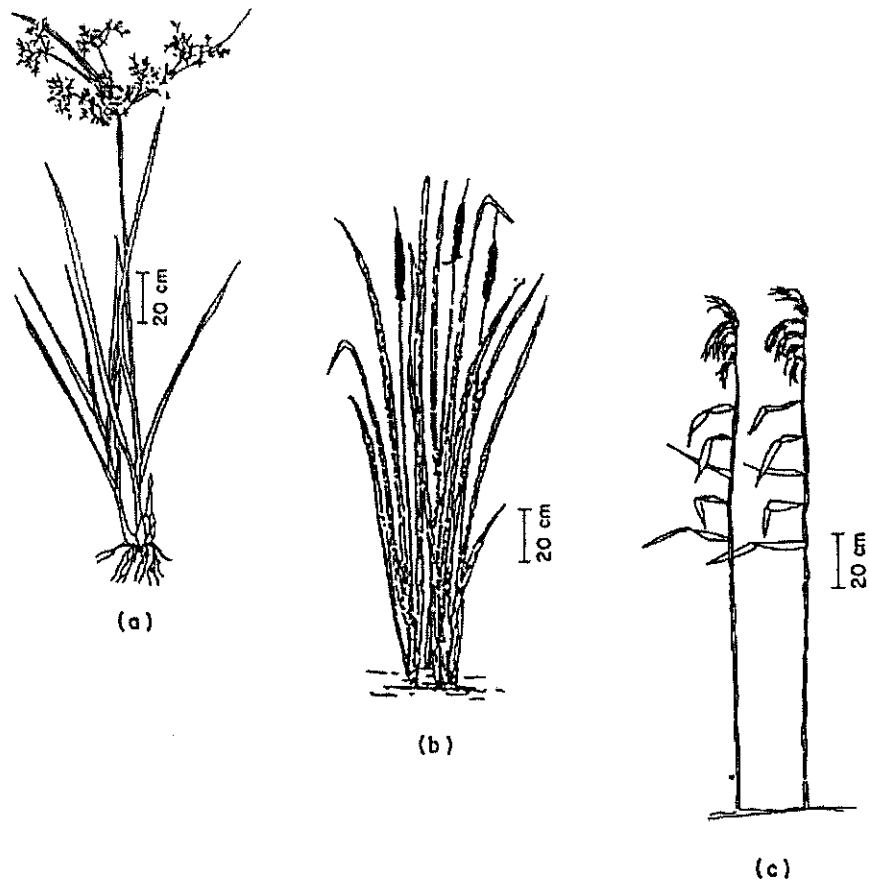
รูปที่ 2.4 กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ  
(Kadlec and Knight, 1987)

## 2.4 พืชโคล่พื้นน้ำ (emergent aquatic macrophyte)

พืชโคล่พื้นน้ำจะเจริญเติบโตในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีระดับน้ำได้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดิน 50 เซนติเมตร และน้ำมีความลึกอย่างน้อย 150 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปจะมีรากอากาศและมีการแผ่ขยายรากและลำต้นในดิน พืชชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะเจริญเติบโตได้ในที่มีน้ำท่วมขัง เนื่องจากมีช่องอากาศภายในขนาดใหญ่ที่สามารถถ่ายเทออกซิเจนมายังรากและลำต้นใต้ดิน พืชที่อยู่ในกลุ่มนี้ คือ (a) พืชตระกูลกก, (b) ธูปฤาษี และ (c) อ้อ

สำหรับพืชโคล่พื้นน้ำที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ กกกลม

กกกลม (*Cyperus corymbosus*) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ส่วนใหญ่พบขึ้นตามที่ลุ่มชื้นแฉะหนองบึง และดินเลนตามชายทะเล ช่วง pH ที่เหมาะสมคือ 5-7.5 ทนความเค็มได้น้อยกว่า 0.5 ppt เจริญเติบโตด้วย rhizome มีการแตกกิ่งสามารถขึ้นได้ดีในน้ำท่วมขัง ระดับน้ำที่อยู่ได้คือ ไม่เกิน 50 เซนติเมตร ลักษณะกกกลมจะมีลำต้นกลม ลำต้นส่วนปลายใกล้ ๆ กับดอกจะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม ลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1-2 เมตร ดอกมีขนาดเล็กเป็นฝอยอยู่รวมกันเป็นช่อดอกเมื่อยังอ่อนจะมีสีเขียวอ่อน พออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2530)



รูปที่ 2.5 ชนิดของพืชใต้อ่างน้ำ  
 (a) พืชตระกูลกก (b) ธูปฤาษี (c) อ้อ  
 (Lim and Polprasert, 1996)

## 2.5 บทบาทของพืชในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พืชจะมีบทบาทสำคัญในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.5.1 ผลทางฟิสิกส์ (physical effect)

พืชที่อยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำจะช่วยกระจายและลดความเร็วของน้ำ (Pettecrew and Kalff, 1992; Somes, Breen and Wong, 1996) ซึ่งมีผลทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอย ลดการกัดกร่อนและการฟุ้งกระจายของตะกอนอีกทั้งเป็นการเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียและพืช รากที่หนาแน่นของมันจะป้องกันการกัดกร่อนของน้ำ

พืชที่ปกคลุมพื้นที่ชุ่มน้ำเปรียบเสมือนแผ่นฟิล์มชีวภาพที่อยู่ระหว่างบรรยากาศกับดินหรือพื้นผิวน้ำซึ่งมีความสำคัญทำให้เกิดความแตกต่างของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมขึ้น

### 2.5.2 ผลต่อค่าการนำทางชลศาสตร์ของดิน (effect on soil hydraulic conductivity)

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการไหลแบบได้ผิวในแนวขวาง น้ำจะไหลผ่านตามช่องที่เกิดจากการชอนไชของรากและลำต้นใต้ดิน เมื่อรากและลำต้นใต้ดินเหล่านี้ตายจะเกิดการย่อยสลายทำให้เกิดรูและช่องว่างขึ้นในดิน ทำให้ดินมีความพรุนและก่อให้เกิดการเพิ่มค่าการนำทางชลศาสตร์ของดิน (Kickuth, 1981) โครงสร้างของช่องว่างหรือรูเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและสภาวะการเจริญเติบโต (Beven and Germann, 1982)

### 2.5.3 พื้นที่ผิวสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (surface area for attachment)

ลำต้นและใบของพืชที่อยู่ใต้น้ำจะให้พื้นที่ผิวขนาดใหญ่สำหรับการเกิดฟิล์มชีวภาพ (Gumbrecht, 1993a, 1993b; Chappell and Goulder, 1994) เนื้อเยื่อพืชจะเกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แสงเหมือนกับในแบคทีเรียและโปรโตซัว นอกจากนี้รากลำต้นใต้ดินจะเป็นที่เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Hofmann, 1986) ดังนั้นฟิล์มชีวภาพจึงเกิดทั้งเหนือและใต้เนื้อเยื่อพืช ฟิล์มชีวภาพเหล่านี้จะเป็นพื้นที่ของการเกิดกระบวนการกำจัดมลสารต่างๆ ของจุลินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำ

### 2.5.4 การนำสารอาหารไปใช้ (nutrient uptake)

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำมีความต้องการนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต สารอาหารจะถูกดูดซึมโดยผ่านระบบราก บางครั้งอาจผ่านทางลำต้นและใบ สารอาหารถูกกำจัดโดยเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพ และกำจัดออกไปโดยการเก็บเกี่ยวพืช แต่ถ้าไม่มีการเก็บเกี่ยวสารอาหารก็จะกลับสู่ระบบเนื่องจากกระบวนการย่อยสลาย (Kadlec and Knight, 1996)

### 2.5.5 การปลดปล่อยจากราก (root release)

พืชจะปล่อยออกซิเจนสู่ชั้นรากพืช และจะมีผลต่อวัฏจักรชีวธรณีเคมี (biogeochemical cycle) (Barko, Gunnison and Carpenter, 1991; Sorrell and Boon, 1992) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ง่ายเมื่อเกิดสีแดงของออกไซด์เหล็กที่อยู่บริเวณผิวดินแต่ปริมาณออกซิเจนที่ปล่อยออกมายังไม่เป็นที่แน่ชัด (Bedford, Bouldin and Beliveau, 1991; Sorrell and Armstrong, 1994)

อัตราการปล่อยออกซิเจนจากรากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจนที่อยู่ภายใน ความต้องการออกซิเจนของตัวกลางและความสามารถในการซึมผ่านผนังราก (Sorrell and Armstrong, 1994) อัตราการปล่อยออกซิเจนจะสูงในส่วนปลายรากและจะลดลงตามระยะทางจากปลายรากเข้าสู่ด้านใน (Armstrong, 1979)

## 2.6 ตัวกลาง (media)

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สามารถแพร่พันธุ์ได้ในดินและกรวดทรายหลายชนิดที่มีขนาดแตกต่างกัน ช่องว่างที่มีอยู่ในดินหรือตัวกลางอื่นๆ จะเป็นช่องทางไหลของน้ำในกระบวนการ

บำบัดของระบบไหลใต้ผิว การบำบัดในกรณีนี้เกิดจากจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวราก ลำต้นใต้ดิน และตัวกลางที่อยู่ใกล้เคียงกัน

ในระบบที่ไม่มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดฟอสฟอรัส ตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว คือ ทรายหยาบ ระบบส่วนใหญ่จะใช้กรวดรองพื้น เนื่องจากจะให้ค่าอัตราการทางชลศาสตร์สูงและจะเกิดการอุดตันของตัวกลางน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ดินเป็นตัวกลางในกรณีที่ต้องการกำจัดฟอสฟอรัสตัวกลางที่ใช้ คือ ดิน แต่ความจุทางชลศาสตร์จะลดลง

การอุดตันเกิดจากการทับถมของของแข็งแขวนลอยภายในระบบแบบไหลใต้ผิว โดยเฉพาะบริเวณใกล้ทางน้ำเข้าระบบส่วนของแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้จะกลายเป็นก๊าซ แต่ส่วนที่เป็นแร่ธาตุอื่นๆ จะสะสมและทับถมกัน

Tanner and Sukias (1994) ได้ทำการวัดการทับถมของสารอินทรีย์ของ *Schoenoplectus* ในชั้นกรวดพบว่ามีค่า  $5 \text{ kg/m}^2$  ภายในระยะเวลา 2 ปี และพบว่าประมาณ 50 % ของช่องว่างจะอุดตัน ความหนาแน่นของอินทรีย์สารวัดได้ประมาณ  $0.2 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งการทับถมของสารอินทรีย์เหล่านี้จะทำให้เกิดการอุดตันประมาณ 18 % ของช่องว่าง (balance of blockage) เป็นผลเนื่องมาจาก ราก ลำต้น ใต้ดิน และอินทรีย์สาร ข้อมูลจากการศึกษาพบว่าผลของการอุดตันจะเพิ่มขึ้น 10% ต่อปี (Thut, 1989)

## 2.7 สิ่งมีชีวิต (organism)

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดตั้งแต่แบคทีเรีย รา และโปรโตซัวจนถึงสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังและมิกระดูกสันหลังถูกพบในระบบ ในกรณีที่มีการปลูกพืชในระบบการเจริญเติบโตเกิดขึ้นในส่วนที่จุ่มอยู่ในน้ำของพืช ในดิน ทราย หรือเกาะบนตัวกลางโดยตรงสำหรับระบบแบบไหลใต้ผิว

## 2.8 ราคา (cost)

U.S. EPA (1993) บ่งชี้ว่าราคาเฉลี่ยสำหรับระบบ SF อยู่ที่ประมาณ 200,000 ดอลลาร์/เฮกแตร์ (87,000 ดอลลาร์/เอเคอร์) ส่วนสำหรับระบบ FWS อยู่ที่ประมาณ 50,000 ดอลลาร์/เฮกแตร์ (22,000 ดอลลาร์/เอเคอร์) สาเหตุหลักที่ทำให้ราคาของทั้งสองระบบแตกต่างกัน คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับตัวกลางจำพวก หิน หรือ กรวด รวมถึงค่าใช้จ่ายสำหรับการขนส่งและติดตั้งตัวกลางเหล่านี้ด้วย ถึงแม้ว่าราคาค่าก่อสร้างต่อหนึ่งหน่วยเอเคอร์สำหรับระบบ SF จะสูงกว่าระบบ FWS และการออกแบบอัตราการไหลของระบบ SF ก็ยังสูงกว่าระบบ FWS แต่ผลที่ตามมา คือ ราคาค่าหน่วยบำบัดน้ำเสียของระบบ SF คือ 163 ดอลลาร์/ลบ.ม.(0.62 ดอลลาร์/แกลลอน) ในขณะที่ราคาค่าหน่วยบำบัดน้ำเสียระบบ FWS จะอยู่ที่ 206 ดอลลาร์/ลบ.ม. (0.78 ดอลลาร์/แกลลอน)

ชูโชติ สุทธิบริบาล, คำทอง รัชมี และ วิวัฒน์ จิรัตติกาลสกุล (2546) ได้ทำการศึกษการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยระบบสระเติมอากาศ (aerated lagoon, AL) และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลตามแนวคิ่ง (vertical flow constructed wetland, VF) จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ VF มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD และ SS ร้อยละ 97.7, 93.4 และ 94.9 ซึ่งสูงกว่าระบบ AL ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 92.9, 69.95 และ 67.03 การบำบัด TKN, ammonia และ TP มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ส่วน nitrate พบว่า ทั้ง 2 ระบบ nitrate มีแนวโน้มสูงขึ้นซึ่งอาจเนื่องจาก ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศ ค่า TDS พบว่ามีแนวโน้มคงที่ ทั้ง 2 ระบบไม่สามารถบำบัดได้ ขนาดของพื้นที่ที่ใช้สำหรับก่อสร้าง ระบบทั้ง 2 มีความต้องการในการใช้พื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยระบบ AL มีค่า HLR อยู่ที่ 277 ลบ.ม./ไร่/วัน ส่วนระบบ VF มีค่า HLR อยู่ที่ 280 ลบ.ม./ไร่/วัน ราคาค่าก่อสร้างระบบ AL มีแนวโน้มค่าก่อสร้างที่ต่ำกว่าระบบ VF โดยที่ AL มีค่าก่อสร้างต่อ ลบ.ม. น้ำเสียที่ 7763.72 บาท ส่วน VF อยู่ที่ 8570.25 บาท ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบหรือค่าบำรุงรักษาระบบ VF มีค่าเดินระบบและซ่อมบำรุงอยู่ที่ 522 บาท/ลบ.ม./ปี ส่วนระบบ AL มีค่าเดินระบบและซ่อมบำรุงอยู่ที่ 720 บาท/ลบ.ม./ปี ซึ่งสูงกว่าระบบ VF

**2.9 ตัวแปรในการออกแบบระบบ (design parameters)**

ตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปเกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว

ตัวแปร	หน่วย	Metcalf and Eddy (1991)	Etnier and Guterstam (1997)	Crites and Tchobanoglous, (1998)
ระยะเวลาเก็บ	Day	4-15	1-4	3-4 (BOD) 6-10 (N)
อัตราการระ BOD, ความลึกของน้ำ	kg/ha-d m	< 68 0.3-0.76	11.2-67.2 0.3-0.76	< 112 0.3-0.61
ความลึกของชั้นตัวกลาง	m	-	-	0.45-0.76
อัตราการทางชลศาสตร์	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d	0.014-0.047	-	-
พื้นที่ที่ต้องการ	ha/m <sup>3</sup> -d	0.007-0.02	0.0002-0.002	-

### 2.9.1 ระยะเวลาักเก็บ (hydraulic retention time, HRT)

ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ระยะเวลาักเก็บเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่มีผลต่อการบำบัด โดยทั่วไประยะเวลาักเก็บที่ยาวนานจะทำให้เกิดสถานะแอนแอโรบิก ในขณะที่ระยะเวลาักเก็บที่สั้น จะไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายมลสาร การประมาณระยะเวลาักเก็บของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นเรื่องยากเนื่องจากมีหลายปัจจัย ได้แก่ ความแตกต่างทางภูมิศาสตร์ การเจริญเติบโตของพืช การตกตะกอนของของแข็ง และการเกิดการลัดวงจร รวมทั้งการระเหยเป็นไอในช่วงฤดูร้อน และการก่อดินเป็นน้ำแข็งในฤดูหนาว

### 2.9.2 อัตราภาระอินทรีย์ (organic loading rate, OLR)

อัตราภาระอินทรีย์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ มวลต่อพื้นที่ต่อเวลา (kg/ha-d) ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะไม่ส่งผลโดยตรงกับการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำสำหรับการบำบัดสารอาหารและมลสารอื่นที่ปราศจาก BOD ค่านี้จะใช้ตรวจสอบสถานะแอโรบิกของระบบ ซึ่งมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย การควบคุมยูงและกลิ่น ค่าอัตราภาระอินทรีย์สูงสุดสามารถทำการประมาณค่าได้โดยอยู่บนพื้นฐานต่อไปนี้ (Reed, Middlebrooks and Crites, 1988)

2.9.2.1 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของพืชในระบบซึ่งมีค่าประมาณ 20 g/m<sup>2</sup>/d

2.9.2.2 ความต้องการออกซิเจนซึ่งมีค่า 1.5 เท่าของภาระอินทรีย์

### 2.9.3 อัตราภาระทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate, HLR)

อัตราภาระทางชลศาสตร์จะรู้จักในรูปของอัตราภาระทางชลศาสตร์พื้นผิว ซึ่งหมายถึง ปริมาตรของน้ำเสียในระบบต่อพื้นที่ผิวต่อวัน (m<sup>3</sup>/ha-d) การเลือกใช้ค่าอัตราภาระทางชลศาสตร์ ต้องพิจารณาสถานะอากาศ สภาพดิน เช่น ความสามารถในการซึมผ่านและชนิดของพืชที่ใช้

### 2.9.4 การออกแบบแบบจำลองการกำจัด BOD

Kickuth (1981) ได้ศึกษาการออกแบบระบบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ตามความสัมพันธ์ ดังนี้

$$A_h = \frac{Q_d (\ln C_o - \ln C_e)}{K_{BOD}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $A_h$  = พื้นที่ผิวของระบบ, m<sup>2</sup>

$Q_d$  = อัตราการไหลเฉลี่ย, m<sup>3</sup>/d

$C_e$  = BOD<sub>5</sub> น้ำออก, mg/L

$C_o$  = BOD<sub>5</sub> น้ำเข้า, mg/L

$K_{BOD}$  = ค่าคงที่, m/d

การกำจัด BOD สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองอันดับที่ 1 ของการไหลแบบหลอด (plug-flow) ดังสมการข้างล่าง

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp[-K_T t] \quad (2.2)$$

โดยที่  $K_T$  = ที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ย

เวลากักเก็บ ( $t'$ ) เป็นค่าทางทฤษฎีที่ขึ้นอยู่กับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง

$$t' = \frac{LW\alpha d}{Q} = \frac{Ad\alpha}{Q} \quad (2.3)$$

โดยที่  $L$  = ความยาวของระบบ, m

$W$  = ความกว้างของระบบ,

$d$  = ค่าความลึกของการไหล, m

$\alpha$  = สัดส่วนช่องว่างหรือค่าความพรุนของตัวกลาง

$Q$  = อัตราการไหลเฉลี่ยผ่านระบบ,  $m^3$

$A$  = พื้นที่ผิวของระบบ,  $m^2$

สามารถเขียนสมการ (2.2) ได้เป็น

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left[-\frac{K_T Ad\alpha}{Q}\right] \quad (2.4)$$

สมการ (2.4) จัดเรียงใหม่ได้ดังนี้

$$A = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T d\alpha} \quad (2.5)$$

สมการนี้ใช้ประมาณค่าพื้นที่ที่ต้องการในการลดค่า BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว พื้นที่หน้าตัดของการไหลผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว คำนวณได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

$$A_c = \frac{Q}{K_S S} \quad (2.6)$$

โดยที่  $A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของชั้นตัวกลางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล,  $m^2$

=  $d$  (ความลึกของชั้นตัวกลาง)  $\times$   $W$  (ความกว้างของชั้นตัวกลาง)

$K_S$  = ค่าการนำทางชลศาสตร์ของตัวกลาง,  $m^3/m^2-d$

$S$  = ความชันของชั้นตัวกลางหรือความลาดทางชลศาสตร์



มีข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลองว่าค่า  $\frac{Q}{A_c}$  ผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางต้องน้อยกว่า 8.6 m/d เพื่อป้องกันการแยกตัวของชั้นตัวกลางกับลำต้นใต้ดิน และเพื่อให้มั่นใจว่าเวลาสัมผัสของการบำบัดมีค่าเพียงพอ (Reed, Middlebrooks and Crites, 1988)

$$\frac{Q}{A_c} \leq 8.6 \text{ m/d} \quad (2.7)$$

$$K_S S \leq 8.6 \text{ m/d} \quad (2.8)$$

ข้อกำหนดนี้สามารถคำนวณหาค่าความลาดชันของชั้นตัวกลางและค่าการซึมผ่านของตัวกลางที่เหมาะสมได้ ชนิดและลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวแสดงดังตารางที่ 2.3 การคำนวณค่า  $K_T$  ใช้สมการ (2.9)

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad (2.9)$$

โดยที่  $K_{20} =$  ค่าคงที่ที่  $20^\circ\text{C}$

$T =$  อุณหภูมิจริงของระบบ,  $^\circ\text{C}$

ตารางที่ 2.3 ชนิดของตัวกลางและลักษณะเฉพาะสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว (U.S. EPA, 1988)

ชนิดตัวกลาง	10 % ของขนาดที่ใหญ่ที่สุด มม. (Max.10% grain size, mm)	ความพรุน $\alpha$	สภาพนำทางชลศาสตร์ ( $K_s$ ), $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$	$K_{20}$ , $\text{d}^{-1}$
ทรายขนาดกลาง (Medium sand)	1	0.42	420	1.84
ทรายหยาบ (Coarse sand)	2	0.39	480	1.35
กรวด (Gravelly sand)	8	0.35	500	0.86

ค่าคงที่  $K_{20}$  ในบางระบบจะมีความเกี่ยวข้องกับค่าความพรุนของตัวกลางที่ใช้ (Reed, Middlebrooks and Crites, 1988; Wood, 1994) ค่า  $K_{20}$  แสดงดังในตารางที่ 2.3 หรือคำนวณได้จากสมการที่แนะนำโดย (Reed, Middlebrooks and Crites, 1988)

$$K_{20} = K_0 (37.31 \alpha^{4.172}) \quad (2.10)$$

โดยที่  $K_0$  = ค่าคงที่ของชั้นตัวกลาง ซึ่งมีค่า  $1.839 \text{ d}^{-1}$  สำหรับน้ำเสียชุมชน และ  $0.198 \text{ d}^{-1}$  สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีค่า COD สูง

$\alpha$  = ค่าความพรุนของตัวกลางที่ใช้ในระบบ

### 2.9.5 การออกแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจน

ในการออกแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.9.5.1 ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen, TN)

จากการศึกษาพบว่า มีแบบจำลองการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์ 2 แบบโดย WPCF (1990) และ Hammer and Knight (1994) โดยได้มาจากการวิเคราะห์ความถดถอยทางสถิติที่ได้จากการเก็บข้อมูล

$$A = \frac{0.01Q}{(0.645C_c - 0.125C_o + 1.129)} \quad (\text{WPCE, 1990}) \quad (2.11)$$

และ

$$A = \frac{QC_oM_w}{QC_oN_{\max} - 1000M_wK_n} \quad (\text{Hammer and Knight, 1994}) \quad (2.12)$$

โดยที่

$A$  = พื้นที่ผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำ, h

$C_o$  = TN ไหลเข้า, mg N/L

$C_c$  = TN ไหลออก, mg N/L

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

$M_w$  = การกำจัด TN, kg N/d

$N_{\max}$  = อัตราการกำจัดจำเพาะของ TN, kg N/(ha-d)

$K_n$  = ค่าคงที่ของครึ่งการอิ่มตัวของ TN, kg N/(ha-d)

#### 2.9.5.2 แอมโมเนียไนโตรเจน (ammonia nitrogen, AN)

$$A = \frac{0.01Q}{\exp[1.527 \ln C_c - 1.050 \ln C_o + 1.69]} \quad (\text{WPCE, 1990}) \quad (2.13)$$

และ

$$A = \frac{1.83QC_o}{1000(C_c + 0.161)} \quad (\text{Hammer and Knight, 1994}) \quad (2.14)$$

โดยที่

$A$  = พื้นที่ผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำ, ha

$C_o$  = TN น้ำเข้า, mg N/L

$C_c$  = TN น้ำออก, mg N/L

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

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อผึ่ง โดยดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) จากโรงงานเจ้าพระยาพีชไร้ อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา มาแล้ว

#### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

##### 3.3.1 การสร้างแบบจำลอง

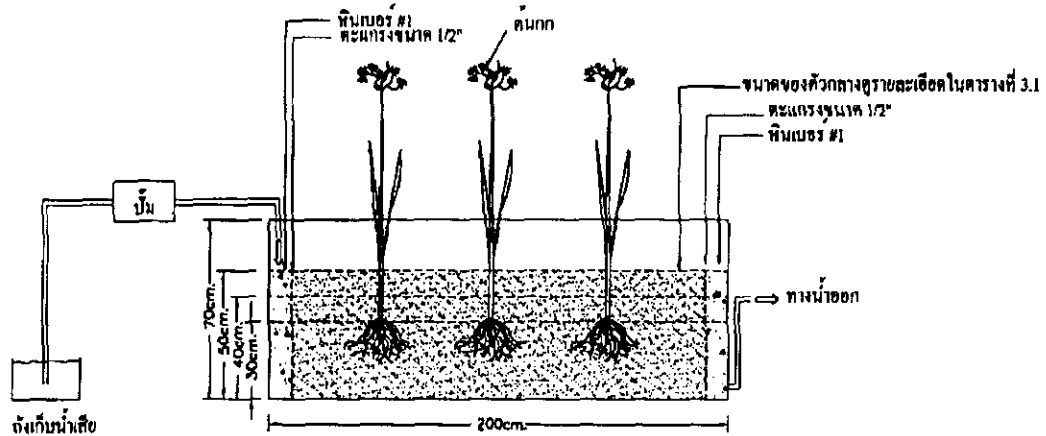
สร้างแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวด้วยแผ่นสังกะสีที่มีลักษณะเป็นบ่อจำนวน 4 หน่วยการทดลอง แต่ละหน่วยกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 200 เซนติเมตร และสูง 70 เซนติเมตร ภายในหน่วยการทดลองบรรจุตัวกลางแต่ละขนาดดังตารางที่ 3.1 โดยบรรจุตัวกลางสูง 50 เซนติเมตร (ระดับน้ำลึก 40 เซนติเมตร) แล้วทำการปลูกกกกลม การกระจายน้ำเสียเข้าสู่ระบบใช้วิธีเจาะรูด้านข้างโดยใช้ท่อ PVC ขนาด 1/2 นิ้ว ต่อกับถังเก็บน้ำเสียที่เก็บมาจากบ่อผึ่งของโรงงานแป้งมันสำปะหลังเจ้าพระยาพีชไร้ การกระจายน้ำเข้าสู่ระบบควบคุมโดยปั๊ม ดังรูปที่ 3.1

##### 3.3.2 การเตรียมต้นพันธุ์และการปลูกพืช

###### 3.3.2.1 การเตรียมต้นพันธุ์กกกลม

การเตรียมต้นพันธุ์พืชที่จะใช้ปลูกในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้ดำเนินการไปพร้อมกับการก่อสร้างระบบฯ แหล่งของต้นพันธุ์พืชจำพวกต้นกกกลม (*Cyperus corymbosus*) สามารถหาได้จากพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติทั่วไป (สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2545) ในการวิจัยนี้ใช้ต้นกกกลมจากพื้นที่บริเวณใกล้เคียงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งในการจัดเตรียมต้นพันธุ์พืชสามารถกระทำได้เป็นลำดับดังนี้

- (1) เตรียมพื้นที่สำหรับการเพาะชำอนุบาลต้นพันธุ์กกกลม
- (2) นำต้นพันธุ์กกกลมจากแหล่งพันธุ์ปลูกลงในแปลงอนุบาล
- (3) ดูแลต้นพันธุ์กกกลมให้เจริญเติบโต

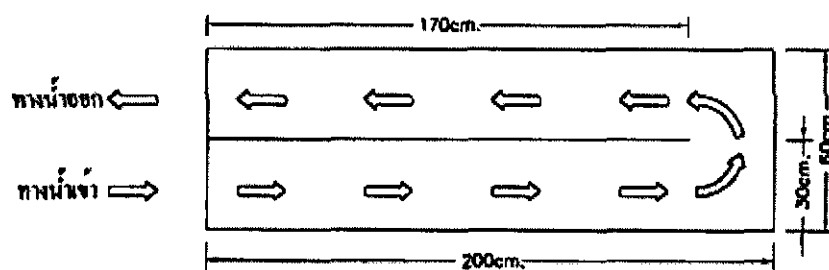


รูปที่ 3.1 แบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

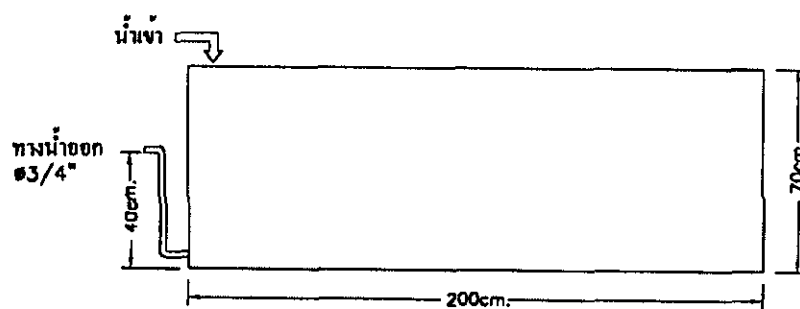
### 3.3.2.2 การปลูกพืช

หลังจากต้นพันธุ์กกกลมเจริญเติบโตแล้วก็นำต้นพันธุ์กกกลมจากแปลงอนุบาลปลูกลงในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งสามารถกระทำได้เป็นลำดับดังนี้

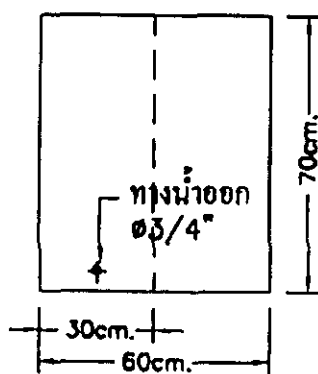
- (1) เติมน้ำใส่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ระดับความลึก 40 เซนติเมตร)
- (2) คัดเลือกต้นพันธุ์กกกลมที่มีอายุประมาณ 1 เดือนและทำการตัดแต่งต้นและรากของต้นพันธุ์กกกลมให้มีความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร
- (3) ปลูกต้นพันธุ์กกกลมลงในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยให้มีระยะห่างจากขอบผนัง 15 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างต้น 15 เซนติเมตร จำนวน 21 ต้น/ม<sup>2</sup> ดังรูปที่ 3.3 และทิ้งไว้ให้พืชฟื้นตัวประมาณ 2 สัปดาห์ก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบ
- (4) ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบ โดยการค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียเพื่อให้พืชปรับตัวได้ ซึ่งใช้เวลาในการเริ่มต้น (start-up) ประมาณ 2-3 สัปดาห์



ก) ภาพด้านบน

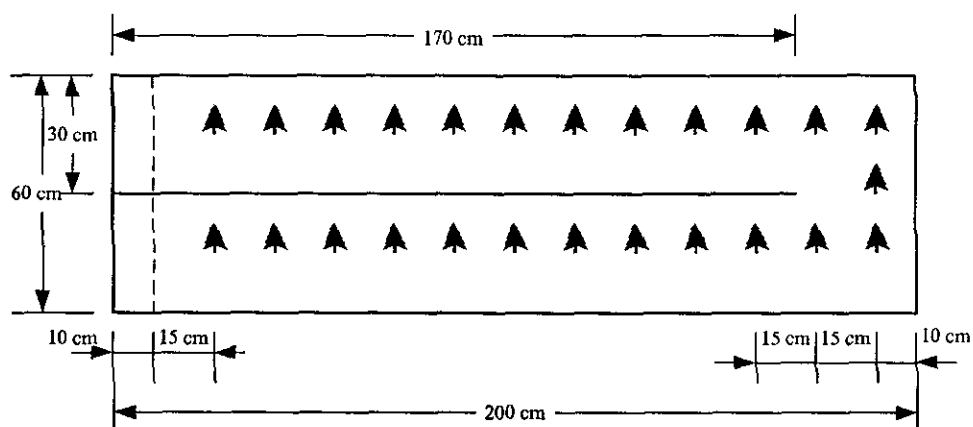


ข) ภาพด้านหน้า



ค) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 3.2 ทางน้ำเข้าและออกในแบบจำลอง



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการปลูกกกกลมในระบบ

### 3.3.3 ตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการวิจัย คือ หินที่มีขนาดเบอร์หินและความพรุนแตกต่างกัน 4 ขนาด สำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดเบอร์หินและความพรุนของตัวกลาง

หน่วยการทดลอง	ขนาดเบอร์หิน (นิ้ว)	ความพรุน ( $\alpha$ )
1	1	0.465
2	1/2	0.439
3	3/4	0.420
4	3/8	0.400

หมายเหตุ หินจากร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั่วไป

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

หลังจากที่พืชปรับตัวได้ประมาณ 2 สัปดาห์ จึงเริ่มทำการปล่อยน้ำเสียแบบต่อเนื่องลงแต่ละหน่วยการทดลองทั้ง 4 หน่วยการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แต่ละหน่วยการทดลองทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้ระยะเวลาเก็บที่แตกต่างกันคือ 1, 3, 5 และ 7 วัน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปค่าออกแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว

หน่วยการทดลอง	ระยะเวลาพัก เก็บ	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)	ความพรุน $\alpha$	อัตราการทางชล ศาสตร์ (cm/d)
1	1	0.2232	0.465	18.60
	3	0.0744		6.20
	5	0.0446		3.72
	7	0.0319		2.66
2	1	0.2107	0.439	17.56
	3	0.0702		5.85
	5	0.0421		3.51
	7	0.0301		2.51
3	1	0.2016	0.420	16.80
	3	0.0672		5.60
	5	0.0463		3.36
	7	0.0288		2.40
4	1	0.1920	0.400	16.00
	3	0.0640		5.33
	5	0.0384		3.20
	7	0.0274		2.29

คำนวณระยะเวลากักเก็บได้จากสมการที่ 2.3

$$t' = \frac{LW\alpha d}{Q} = \frac{Ad\alpha}{Q}$$

โดยที่

- L = ความยาวของระบบ, m
- W = ความกว้างของระบบ, m
- d = ค่าความลึกของการไหล, m
- $\alpha$  = สัดส่วนช่องว่างหรือค่าความพรุนของตัวกลาง
- Q = อัตราการไหลเฉลี่ยผ่านระบบ, m<sup>3</sup>/d
- A = พื้นที่ผิวของระบบ, m<sup>2</sup>



### 3.5 ตัวแปรในการศึกษา

ตัวแปรที่พิจารณาในการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 แบบคือ

- ตัวแปรกำหนด (fixed variables)
- ตัวแปรอิสระ (independent variables)
- ตัวแปรตาม (dependent variables)

#### 3.5.1 ตัวแปรกำหนด (fixed variables)

ตัวแปรกำหนดที่ต้องการให้คงที่มีดังนี้ คือ

- ความสูงของชั้นตัวกลาง 50 เซนติเมตร
- ระดับความลึกของน้ำในระบบ 40 เซนติเมตร
- ปริมาตรของแบบทดลอง 0.6 ลูกบาศก์เมตร
- พืชที่ใช้ คือ กกกลม (*Cyperus corymbosus*)

#### 3.5.2 ตัวแปรอิสระ (independent variables)

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ตัว ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียในสภาวะต่างๆ ดังนั้นตัวแปรอิสระ คือ ระยะเวลาพักเก็บ และขนาดของตัวกลาง โดยที่ตัวกลางแต่ละขนาดนั้นจะทำให้อัตราการไหลและอัตราการระน้ำแตกต่างกันที่ระยะเวลาพักเก็บที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

- ระยะเวลาพักเก็บ
- อัตราการไหล
- ความพรุน
- อัตราการระทางชลศาสตร์

#### 3.5.3 ตัวแปรตาม (dependent variables)

ตัวแปรตามเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนไปเมื่อตัวแปรอิสระมีการเปลี่ยนแปลง ในการศึกษานี้ ตัวแปรตามประกอบด้วย

- ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biochemical oxygen demand, BOD)
- ความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (chemical oxygen demand, COD)
- ของแข็งละลายทั้งหมด (total dissolved solids, TDS)
- ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids, TSS)
- ไนโตรเจนทั้งหมด (total Kjeldahl nitrogen, TKN)
- ไนเตรตไนโตรเจน (nitrate nitrogen,  $\text{NO}_3\text{-N}$ )
- แอมโมเนีย (ammonia,  $\text{NH}_3$ )

### 3.6 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์น้ำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำประกอบด้วย

ขวด COD flasks

เครื่องแก้ว

เครื่องชั่งละเอียด

ชุดกรอง

ชุดย่อยสลายเจลาตินพร้อมชุดกลั่น

ชุดเตา COD พร้อม reflux condenser ขนาด 250 ml

สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เตาชนิด hot plate

เตาเผาไหม้ 550°C

ตู้ที่บแสง (Incubator) อุณหภูมิ 20±1°C

ตู้อบ 103-105°C

ถ้วยอลูมิเนียม (evaporating dish, ความจุ > 25 ml)

แผ่นกรองใยแก้ว (Whatman GF/C, 47 mm)

BOD พร้อมจุก ขนาด 300 ml

desiccators

DO meter

magnetic bars และ magnetic stirrer

pH meter

steam table, water bath 103-105°C

### 3.7 การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของน้ำเสียที่จุดเก็บน้ำตัวอย่าง 2 จุด คือจุดน้ำเข้าและจุดน้ำออก ตามวิธีการใน standard methods (APHA, AWWA and WPCF, 1995) รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติบางประการของน้ำทิ้งนี้พบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานมีค่าความสกปรก มีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
อุณหภูมิ (temperature)	Mercury thermometer
ความเป็นกรด – เบส (pH)	pH Meter
Total suspended solids (TSS)	นำน้ำผ่านเครื่องกรองระเหยให้แห้งที่ 103°C
BOD	Direct method
COD	Open dichromate reflux method
Nitrate nitrogen (NO <sub>3</sub> -N)	Sodium salicylate method
Total Kjeldahl nitrogen (TKN)	Macro Kjeldahl method

จากตารางที่ 3.4 พบว่า COD, BOD และ TSS มีค่าเกินมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังตารางที่ ก1 (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานแป้งมันที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	ความเข้มข้น (mg/L)	
	ช่วง	เฉลี่ย
COD	273.32-459.91	343.71±88.91
BOD	41.25-54.65	47.25±5.67
TDS	1366.67-1838.44	1613.17±231.73
TSS	106.22-266.44	193.39±71.45
TKN	17.93-30.55	25.21±6.08
NO <sub>3</sub> -N	0.287-0.446	0.393±0.072
NH <sub>3</sub>	9.78-18.93	15.02±4.60

### 3.8 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% ส่วนในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบสามารถหาได้จากการคำนวณ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำเข้า และน้ำออกจากระบบ แสดงดังสมการข้างล่าง

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบ (\%)} = \left( \frac{\text{ความเข้มข้นน้ำเข้า} - \text{ความเข้มข้นน้ำออก}}{\text{ความเข้มข้นน้ำเข้า}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

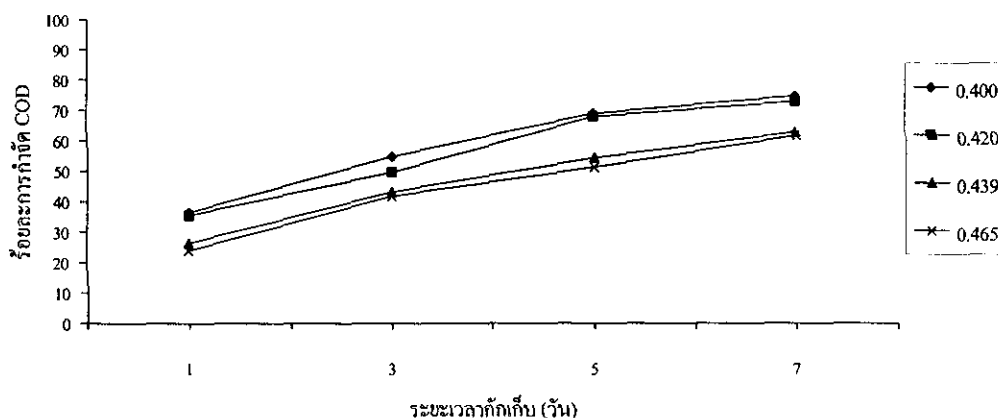
การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD, BOD, TDS, TSS, TKN, NO<sub>3</sub>-N ที่ระยะเวลาพักเก็บ (retention time) ที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5 และ 7 วัน และขนาดของตัวกลางที่มีค่าความพรุนแตกต่างกัน คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ระยะเวลาพักเก็บได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.3 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ทำการทดลองโดยปล่อยน้ำทิ้งสู่บ่อทดลองจนถึงที่สภาวะคงที่ (steady state condition) แล้วจึงนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบมาทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

##### 4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัด COD

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า COD น้ำเข้าระบบมีค่า 459.91, 366.66, 273.32 และ 274.94 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า COD น้ำออกจากระบบมีค่า 291.76, 165.71, 84.76 และ 69.40 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 36.56, 54.81, 68.99 และ 74.76 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า COD น้ำออกจากระบบมีค่า 296.22, 184.44, 88.12 และ 73.94 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 35.60, 49.70, 67.94 และ 72.95 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า COD น้ำออกจากระบบมีค่า 338.26, 208.54, 124.39 และ 102.25 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 26.45, 43.12, 54.48 และ 62.81 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า COD น้ำออกจากระบบมีค่า 349.41, 213.80, 133.01 และ 105.28 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 24.03, 41.70, 51.34 และ 61.71 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด COD จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด COD คือเมื่อค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัด COD จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.400 และ 0.420 โดยการ

ทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ ๓1 (ภาคผนวก ก) กลไกหลักในการกำจัด COD คือ ปฏิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ การกรอง และการตกตะกอนของของแข็ง



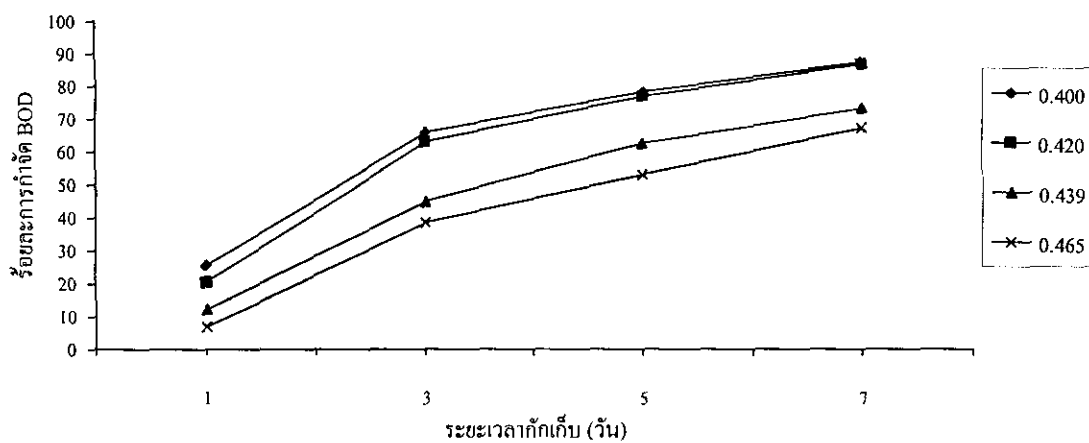
รูปที่ 4.1 ร้อยละการกำจัด COD กับระยะเวลาเก็บ

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาเก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400, 0.420 ที่ระยะเวลาเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด COD มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 72.95-74.76

#### 4.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัด BOD

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า BOD น้ำเข้าระบบมีค่า 54.65, 48.60, 41.25, และ 45.00 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า BOD น้ำออกจากระบบมีค่า 40.69, 16.40, 9.00 และ 5.70 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 25.54, 65.83, 78.18 และ 87.33 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า BOD น้ำออกจากระบบมีค่า 43.45, 17.80, 9.55 และ 6.00 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 20.49, 62.92, 76.85 และ 86.67 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า BOD น้ำออกจากระบบมีค่า 48.00, 26.45, 15.50 และ 12.10 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 12.17, 44.90, 62.42 และ 73.11 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า BOD น้ำออกจากระบบมีค่า 50.88, 29.50, 19.40 และ 14.85 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 6.90, 38.54, 52.97 และ 67.00 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด BOD เมื่อระยะเวลาเก็บมากขึ้นประ

ประสิทธิภาพการกำจัด BOD จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด BOD คือเมื่อค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัด BOD จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.400 และ 0.420 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ ค2 (ภาคผนวก ค) กลไกหลักในการกำจัด BOD คือ ปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ การกรองและการตกตะกอนของของแข็ง



รูปที่ 4.2 ร้อยละการกำจัด BOD กับระยะเวลาที่เก็บ

ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาที่เก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400, 0.420 ที่ระยะเวลาที่เก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด BOD มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 86.67-87.33

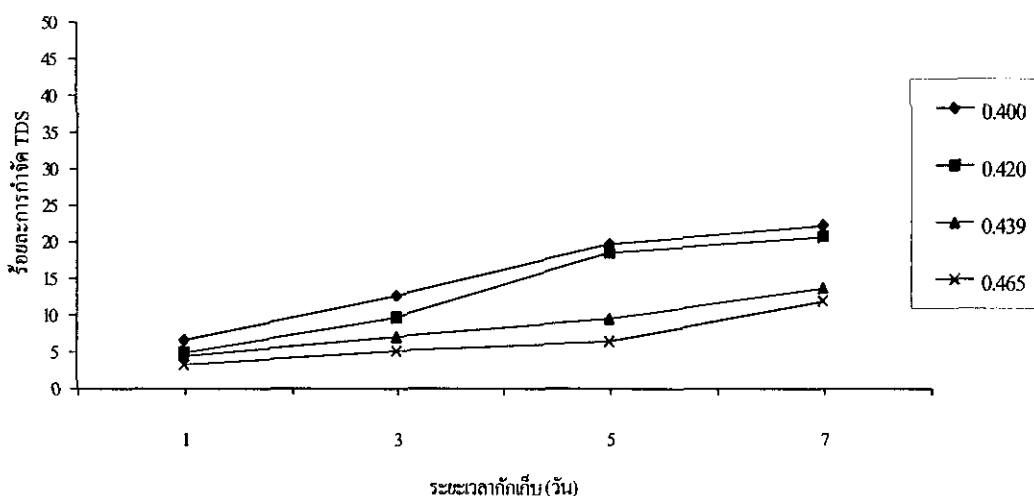
จากการศึกษาใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวโดยใช้กกเป็นพืชโพล์พื้นที่น้ำ Roser, McKersie, Fisher, Breen and Bavor (1987) ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ระยะเวลาที่เก็บ 7.3 วัน ประสิทธิภาพการบำบัด BOD ร้อยละ 90 ขณะที่ Gersberg, Elkins, Lyon and Goldman (1986) ใช้น้ำเสียเทศบาล ระยะเวลาที่เก็บ 6 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ร้อยละ 96 และ Gersberg, Lyon, Brenner and Elkins (1989) ใช้น้ำออกจากสระเติมอากาศ ระยะเวลาที่เก็บ 7.5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ร้อยละ 63 นอกจากนี้ การกำจัด BOD จากน้ำเสียฟาร์มโคนม ระยะเวลาที่เก็บ 7 วัน และ 6.5 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัด BOD ร้อยละ 92 และ 75 ตามลำดับ (Tanner, Clayton and Upsdell, 1995a; Thut, 1989)

#### 4.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัด TDS

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TDS ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า TDS น้ำเข้าระบบมีค่า 1780.89, 1466.67, 1366.67 และ 1834.44 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 วัน ค่า TDS น้ำออกจากระบบมีค่า 1662.59, 1281.33, 1097.55 และ 1429.78 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 6.61, 12.64, 19.70 และ 22.23 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 วัน ค่า TDS น้ำออกจากระบบมีค่า 1693.41, 1324.44, 1113.78 และ 1457.78 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 4.89, 9.70, 18.50 และ 20.71 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 วัน ค่า TDS น้ำออกจากระบบมีค่า 1701.57, 1362.67, 1236.67 และ 1587.11 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 4.43, 7.09, 9.51 และ 13.67 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 วัน ค่า TDS น้ำออกจากระบบมีค่า 1722.67, 1391.11, 1279.11 และ 1619.44 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 3.25, 5.15, 6.40 และ 11.91 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด TDS เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด TDS จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด TDS คือเมื่อค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัด TDS จะมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ทั้งนี้เพราะว่าในการทดลองได้ใช้หินเป็นตัวกลาง ดังนั้นกลไกในการกำจัด TDS จึงต่ำเนื่องจากหินมีค่าความพรุนสูงกว่ากรวดและทราย เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ ระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.420 และ 0.439 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.420 และ 0.465 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ ๓3 (ภาคผนวก ค) กลไกหลักในการกำจัด TDS คือ การกรองและการตกตะกอนของของแข็ง

ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด TDS มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 22.23

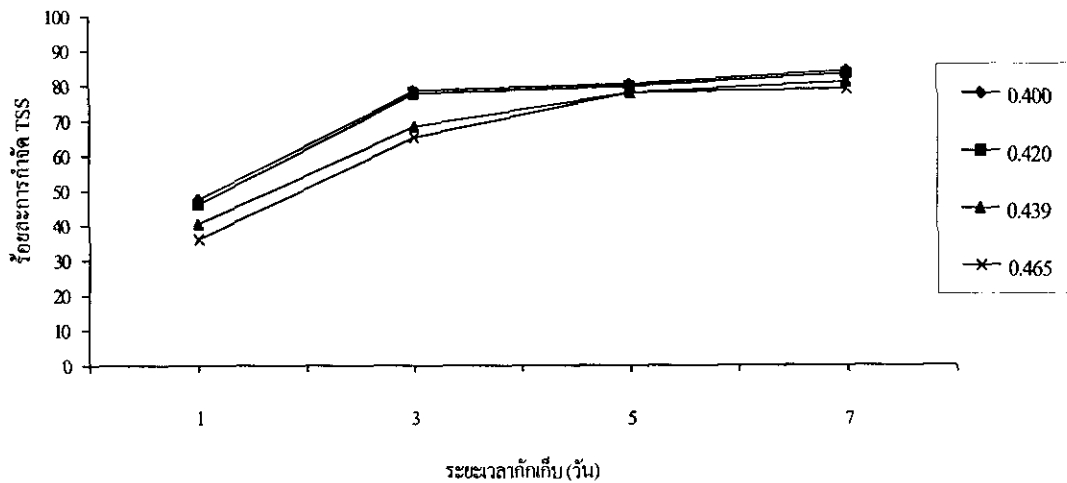




รูปที่ 4.3 ร้อยละการกำจัด TDS กับระยะเวลาพักเก็บ

#### 4.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัด TSS

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TSS ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า TSS น้ำเข้าระบบมีค่า 234.22, 166.68, 106.22 และ 266.44 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า TSS น้ำออกจากระบบมีค่า 122.67, 36.00, 20.89 และ 42.22 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 47.63, 78.40, 80.33 และ 84.15 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า TSS น้ำออกจากระบบมีค่า 126.22, 37.33, 21.78 และ 44.44 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 46.11, 77.60, 79.50 และ 83.32 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า TSS น้ำออกจากระบบมีค่า 139.56, 52.89, 23.56 และ 50.67 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 40.42, 68.27, 77.82 และ 80.98 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า TSS น้ำออกจากระบบมีค่า 149.78, 58.22, 23.56 และ 56.00 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 36.05, 65.07, 77.82 และ 78.98 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด TSS เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด TSS จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด TSS คือเมื่อค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัด TSS จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.420 และ 0.439 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.420 และ 0.465 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.439 และ 0.465 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ 4 (ภาคผนวก ค) กลไกหลักในการกำจัด TSS คือ การกรองและการตกตะกอนของของแข็ง



รูปที่ 4.4 ร้อยละการกำจัด TSS กับระยะเวลาพักเก็บ

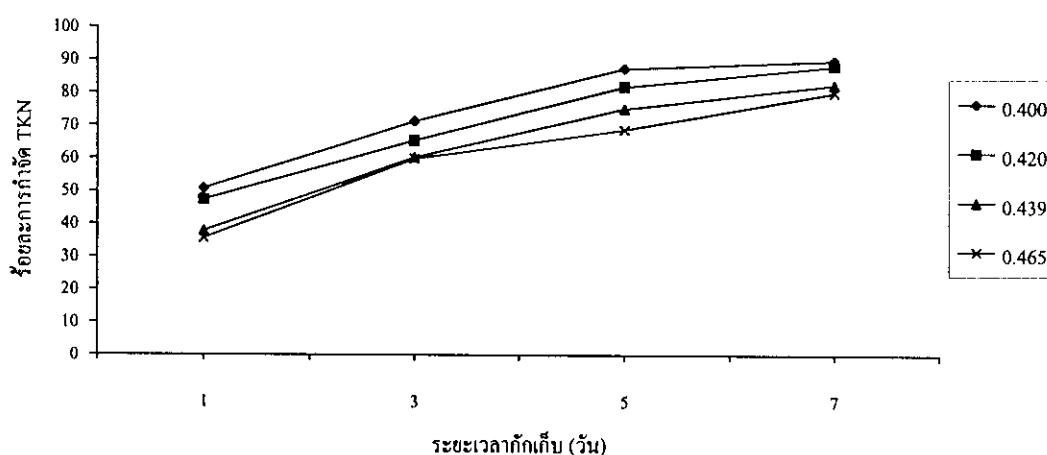
ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด TSS มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 84.15

จากการศึกษาใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวโดยใช้กากเป็นพืชโพล์พืชน้ำ Roser, McKersie, Fisher, Breen and Bavor (1987) ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ระยะเวลาพักเก็บ 7.3 วัน ประสิทธิภาพการบำบัด SS ร้อยละ 94 ขณะที่ Gersberg, Elkins, Lyon and Goldman (1986) ใช้น้ำเสียเทศบาล ระยะเวลาพักเก็บ 6 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด SS ร้อยละ 94 และ Gersberg, Lyon, Brenner and Elkins (1989) ใช้น้ำออกจากสระเติมอากาศ ระยะเวลาพักเก็บ 7.5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด SS ร้อยละ 69 นอกจากนี้ การกำจัด BOD จากน้ำเสียฟาร์มโคนม ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และ 6.5 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัด SS ร้อยละ 76 และ 69 ตามลำดับ (Tanner, Clayton and Upsdell 1995a; Thut, 1989)

#### 4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TKN ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า TKN น้ำเข้าระบบมีค่า 30.55, 29.88, 17.93 และ 22.49 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า TKN น้ำออกจากระบบมีค่า 15.05, 8.56, 2.26 และ 2.29 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 50.74, 71.34, 87.40 และ 89.84 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า TKN น้ำออกจากระบบมีค่า 16.09, 10.33, 3.24 และ 2.66 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 47.32, 65.43, 81.91 และ 88.19 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า TKN น้ำออกจากระบบมีค่า 18.99, 11.84,

4.45 และ 3.93 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 37.83, 60.36, 75.20 และ 82.53 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า TKN น้ำออกจากระบบมีค่า 19.67, 11.98, 5.59 และ 4.49 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 35.63, 59.91, 68.82 และ 80.04 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัด TKN เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด TKN จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด TKN คือเมื่อค่าความพรุนต่ำ ประสิทธิภาพการกำจัด TKN จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความ พรุนของตัวกลางขนาด 0.439 และ 0.465 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ ค5 (ภาคผนวก ค) กลไกหลักในการกำจัด TKN คือ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน การระเหยของแอมโมเนีย และการดูดซึมของพืช



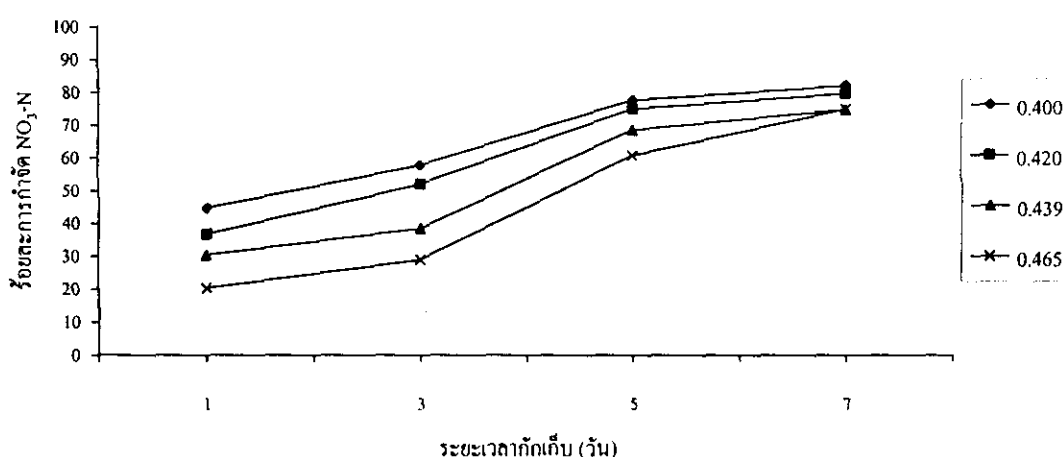
รูปที่ 4.5 ร้อยละการกำจัด TKN กับระยะเวลาพักเก็บ

ประสิทธิภาพการกำจัด TKN ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ พบว่าที่ความ พรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด TKN มากที่สุด มีค่าเฉลี่ย เป็นร้อยละ 89.84

จากการศึกษาใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวโดยใช้กกเป็นพืชไผ่ล่พื้นน้ำ Roser, McKersie, Fisher, Breen and Bavor (1987) ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ระยะเวลาพักเก็บ 7.3 วัน ประสิทธิภาพการบำบัด TN ร้อยละ 56 ขณะที่ Gersberg, Elkins, Lyon and Goldman (1986) ใช้น้ำเสียเทศบาล ระยะเวลาพักเก็บ 6 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด TN ร้อยละ 94 และ Tanner, Clayton and Upsdell (1995a) ใช้น้ำจากน้ำเสียฟาร์มโคนม ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัด TN ร้อยละ 75

#### 4.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัด $\text{NO}_3\text{-N}$

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  น้ำเข้าระบบมีค่า 0.410, 0.429, 0.446 และ 0.287 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  น้ำออกจากระบบมีค่า 0.227, 0.181, 0.099 และ 0.051 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 44.63, 57.81, 77.80 และ 82.23 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  น้ำออกจากระบบมีค่า 0.260, 0.181, 0.111 และ 0.058 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 36.59, 51.98, 75.11 และ 79.79 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  น้ำออกจากระบบมีค่า 0.286, 0.264, 0.140 และ 0.072 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 30.24, 38.46, 68.61 และ 74.91 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  น้ำออกจากระบบมีค่า 0.327, 0.305, 0.175 และ 0.072 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 20.24, 28.90, 60.76 และ 74.91 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  คือเมื่อค่าความพรุนต่ำประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.439 และ 0.465 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ 6 (ภาคผนวก ก) กลไกหลักในการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  คือ การดูดซึมของพืช เนื่องจากพืชต้องการไนเตรตในการเจริญเติบโตและขบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism)



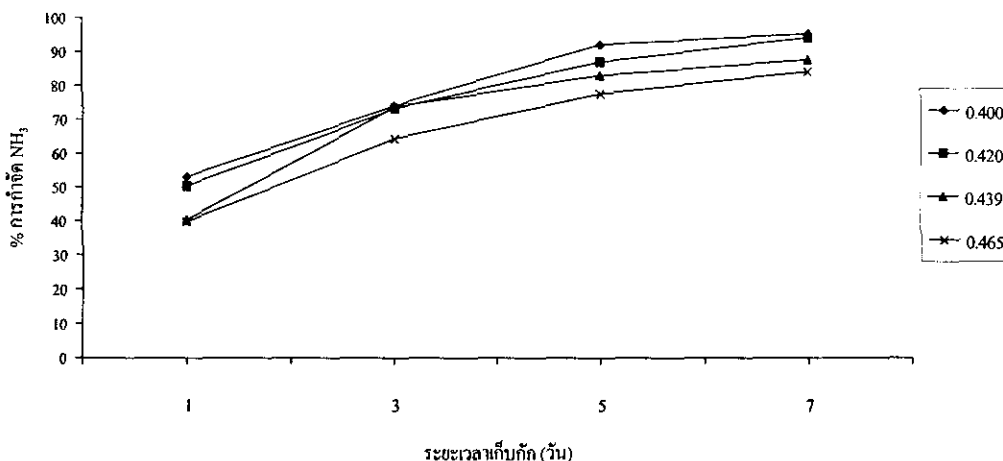
รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  กับระยะเวลาพักเก็บ

ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาเก็บเก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 82.23

#### 4.1.7 ประสิทธิภาพการกำจัด $\text{NH}_3$

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  ที่ความพรุนของตัวกลางทั้ง 4 ค่า คือ 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 1, 3, 5, และ 7 วัน ค่า  $\text{NH}_3$  น้ำเข้าระบบมีค่า 18.93, 9.78, 12.54 และ 18.84 mg/L ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ค่า  $\text{NH}_3$  น้ำออกจากระบบมีค่า 8.87, 2.54, 1.01 และ 0.92 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 53.16, 73.99, 91.92 และ 95.13 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ค่า  $\text{NH}_3$  น้ำออกจากระบบมีค่า 9.40, 2.63, 1.66 และ 1.13 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 50.34, 73.14, 86.76 และ 93.98 ตามลำดับ ที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ค่า  $\text{NH}_3$  น้ำออกจากระบบมีค่า 11.30, 3.37, 2.15 และ 2.36 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 40.32, 73.63, 82.88 และ 87.49 ตามลำดับ และความพรุนของตัวกลาง 0.465 ค่า  $\text{NH}_3$  น้ำออกจากระบบมีค่า 11.40, 3.50, 2.83 และ 3.01 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 39.76, 64.25, 77.46 และ 84.00 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาเก็บเก็บและค่าความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  เมื่อระยะเวลาเก็บเก็บมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  จะมากขึ้น ส่วนค่าความพรุนของตัวกลางจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  คือเมื่อค่าความพรุนค่าประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  จะมากขึ้น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าความพรุนของตัวกลางขนาด 0.400 และ 0.420 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.400 และ 0.439 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.420 และ 0.439 และระหว่างค่าความพรุนของตัวกลาง 0.420 และ 0.465 โดยการทดสอบค่า t-test พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าตามตารางที่ ค7 (ภาคผนวก ค)

ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  ที่ความพรุนต่างๆ และที่ระยะเวลาเก็บเก็บต่างๆ พบว่าที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400, 420 ที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 7 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 93.98-95.13



รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัด NH<sub>3</sub> กับระยะเวลาเก็บกัก

## 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD

### 4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด BOD ของการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ได้ทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยอันดับต่างๆ โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยอันดับศูนย์ ปฏิกิริยอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยอันดับสอง ของบ่อทดลองที่มีค่าความพรุน 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 ด้วยสถิติสมการถดถอยเชิงเส้น โดยทดสอบสมการและสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

โดยที่ Y = ตัวแปรตาม (dependent variable) เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X

X = ตัวแปรอิสระ (independent variable)

$\beta_0$  = ส่วนตัดแกน Y คือค่า Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์

$\beta_1$  = ความชัน (slop) ของเส้นตรง

สมมติฐานที่ทำการทดสอบมี 2 สมมติฐาน คือ

$H_0: \beta_1 = 0$  หรือ  $H_0: Y$  ไม่มีความสัมพันธ์กับ X ในรูปเชิงเส้น

$H_1: \beta_1 \neq 0$  หรือ  $H_1: Y$  มีความสัมพันธ์กับ X ในรูปเชิงเส้น

และ

$H_0: \beta_0 = 0$  เป็นการทดสอบส่วนตัดแกน Y

$$H_1 : \beta_0 \neq 0$$

ผลการทดสอบโดยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ดังตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบถดถอยเชิงเส้น

ค่าความพรุน ของตัวกลาง	อันดับปฏิกิริยา	การทดสอบ $\beta_0$		การทดสอบ $\beta_1$	
		p-value	ค่าคงที่ $\beta_0$	p-value	ค่าคงที่ $\beta_1$
0.400	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.123	13.944	0.083	3.833
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.511	-8.696E-02	0.007	-0.288
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.160	-2.588E-02	0.011	2.438E-02
0.420	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.191	11.045	0.076	4.245
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.933	-9.245E-03	0.005	-0.291
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.158	-2.66E-02	0.013	2.322E-02
0.439	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.288	5.122	0.034	4.148
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.569	3.238E-02	0.003	-0.197
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.080	-9.350E-03	0.004	9.850E-03
0.465	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.617	2.070	0.033	4.125
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.250	7.049E-02	0.003	-0.169
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.080	-7.335E-03	0.004	7.265E-03

จากตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าการกำจัด BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากมีค่า p-value ไม่เกิน 0.05 ซึ่งจะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ส่วนปฏิกิริยาอันดับศูนย์และปฏิกิริยาอันดับสองมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ซึ่งยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  คือ Y และ X ไม่มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้น และเมื่อพิจารณา p-value ของการทดสอบ  $\beta_0$  (ส่วนที่ตัดแกน Y) พบว่า p-value มากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าสมการเชิงเส้นมีส่วนตัดแกน Y จุดที่ Y=0 ซึ่งสามารถสรุปสมการดังต่อไปนี้

สมการการกำจัด BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400 คือ

$$\ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.288t \quad (4.1)$$

โดยที่  $C$  = ค่า BOD น้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (mg/L)  
 $C_0$  = ค่า BOD น้ำทิ้งโรงงานแปรงมันสำปะหลัง (mg/L)  
 $t$  = ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)

สมการการกำจัด BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420 คือ

$$\ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.291t \quad (4.2)$$

สมการการกำจัด BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439 คือ

$$\ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.197t \quad (4.3)$$

สมการการกำจัด BOD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465 คือ

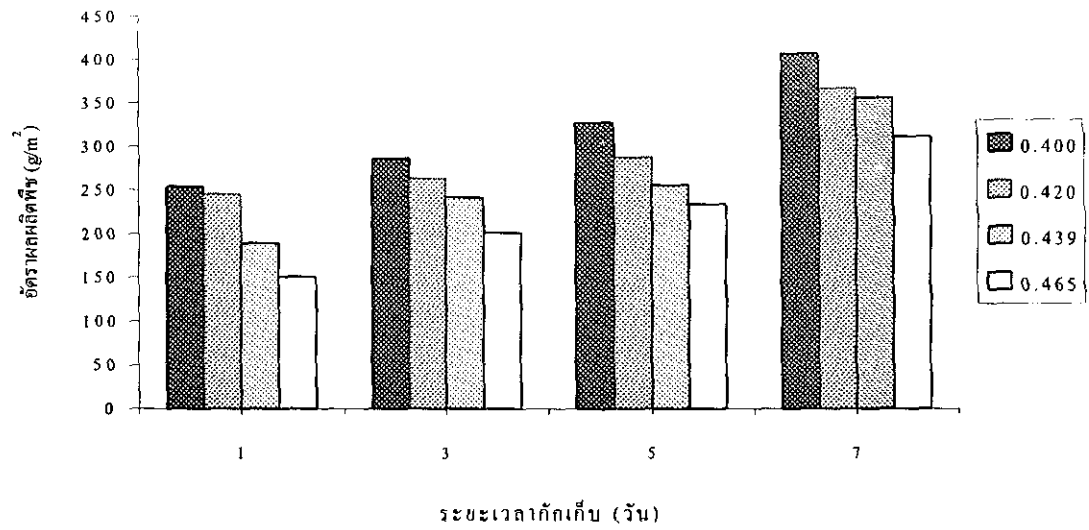
$$\ln\left(\frac{C_c}{C_0}\right) = -0.169t \quad (4.4)$$

### 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของพืชใล่พื้นน้ำ

ในการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของกกกลมโดยทำการตัดพืชที่ความสูง 15 เซนติเมตรจากระดับผิวดักกลางแล้วทำการชั่งน้ำหนักพืช พบว่าในช่วงแรกของการปลูก ความหนาแน่นของกกกลมจะต่ำ แต่เมื่อนานวันกกกลมจะเริ่มเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ และความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้น

จากการทดลองพบว่าอัตราผลผลิตของพืชจะสูงขึ้นตามระยะเวลาพักเก็บ นอกจากนี้ความพรุนของหินตัวกลางก็มีผลต่อมวลชีวภาพของพืช คือ ขนาดความพรุนของหินตัวกลางจะแปรผกผันกับมวลชีวภาพ เช่น ความพรุนของหินตัวกลางต่ำพืชจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแสดงดังรูปที่ 4.8 มีค่าตามตารางที่ ง1 (ภาคผนวก ง) เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืช การเจริญเติบโตในช่วงแรกจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูง หลังจากนั้นเมื่อพืชเจริญเติบโตได้สูงสุด อัตราการเจริญเติบโตจะเข้าสู่สภาวะสมดุล





รูปที่ 4.8 มวลชีวภาพกับระยะเวลาที่กักเก็บ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัด คือระยะเวลาพักเก็บ และค่าความพรุนของตัวกลาง เมื่อระยะเวลาพักเก็บมากจะมีประสิทธิภาพการกำจัดมากขึ้น และเมื่อค่าความพรุนของตัวกลางต่ำประสิทธิภาพการกำจัดจะมากขึ้น

5.1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวที่ระยะเวลาพักเก็บ 1, 3, 5 และ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400, 0.420, 0.439 และ 0.465 มีประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ในช่วง 24-75%, BOD อยู่ในช่วง 7-87%, TDS อยู่ในช่วง 3-23%, TSS อยู่ในช่วง 36-84%, TKN อยู่ในช่วง 36-90%,  $\text{NO}_3\text{-N}$  อยู่ในช่วง 20-82%

5.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 72.95-74.76 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 และ 0.420

5.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 86.67-87.33 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 และ 0.420

5.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 22.23 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400

5.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.15 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400

5.1.7 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 89.84 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400

5.1.8 ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 82.23 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400

5.1.9 ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3$  ที่ระบบสามารถบำบัดได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 95.13 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน และที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400

5.1.10 จากผลการทดลองที่ได้เมื่อพิจารณาค่า COD, BOD และ TSS ระหว่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงงานแป้งมันกับค่าน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิว ที่ระยะเวลาพักเก็บ 5 กับ 7 วัน และที่ความพรุนของหินตัวกลาง 0.400 กับ 0.420 พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ดินทั้งสอง ค่า COD, BOD และ TSS ตารางที่ จ1 (ภาคผนวก จ) มีค่าไม่เกินมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม จึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวสามารถเลือกระยะเวลาพักเก็บที่ 5 วัน และความพรุนของหินตัวกลาง 0.420 ได้ เหตุผลที่เลือกค่าดังกล่าวข้างต้นเพื่อจะได้บำบัดน้ำทิ้งได้ในปริมาณที่มากทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างระบบและต้นทุนการผลิตอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการทดลองกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวที่มีขนาดใหญ่ เช่น Pilot-scale และ Full-scale เพื่อผลการทดลองที่ใกล้เคียงระบบจริงมากที่สุดที่จะทำให้สามารถออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพ

5.2.2 ควรทำการทดลองกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวกับพืชไหลพื้นน้ำชนิดอื่นๆ เพื่อหาชนิดพืชที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด

5.2.3 ควรทำการแปรเปลี่ยนระดับความสูงของตัวกลางและระดับความลึกของน้ำ โดยหาระดับความสูงของตัวกลางและระดับความลึกของน้ำที่สูงที่สุดที่ยังคงประสิทธิภาพการบำบัดได้ดี เพื่อลดขนาดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวลง

## เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.(2542). **คู่มือกฎหมายสิ่งแวดล้อมสำหรับประชาชน: มลพิษทางน้ำ**. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: ฝ่ายพัฒนาและผลิตสื่อ กองส่งเสริมและเผยแพร่.
- ชูโชติ สุทธิบริบาล, คำของ รัศมี และ วิวัฒน์ จิรัตติกาลสกุล. (2546). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยระบบสระเติมอากาศและระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลตามแนวคั้ง. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 2 (หน้า 575-581). กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. (2535). **คู่มือการวิเคราะห์น้ำเสีย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: World Environment Center.
- สุชาดา ศรีเพ็ญ. (2530). **พรรณไม้น้ำ**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2545). การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย* 16(1): 12-15.
- สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม.(2542). **พื้นที่ชุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: ฝ่ายพัฒนาและผลิตสื่อ กองส่งเสริมและเผยแพร่.
- Adrock, 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 method for the examination of water and wastewater**. 16<sup>th</sup>ed. APHA. Washington D.C.
- Armstrong, W. (1979). Aeration in higher plants. *Advanced Botany Research*. 7: 225-331.
- Barko, J.W., Gunnison, D., and Carpenter, S.R. (1991). Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany*. 41: 41-65.
- Bavor, H.J., and Schulz, T.J. (1993). Sustainable suspended solids and nutrient removal in large-scale, solid-matrix, constructed wetland systems. In: Moshiri, G.A. (eds.). **Constructed wetlands for water quality improvement**. (pp. 219-225). Boca Raton, Florida: CRC Press.

- Bedford, B.L., Bouldin, D.R., and Beliveau, B.D. (1991). Net oxygen and carbon-dioxide balances in solutions bathing roots of wetland plants. **Journal of Ecology**. 79: 943-959.
- Beven, K., and Germann, F. (1982). Macropores and water flow in soils. **Water Resource**. 18: 1331-1325.
- Chappell, K.R., and Goulder, R. (1994). Seasonal variation of epiphytic extracellular enzyme activity on two freshwater plants, *Phragmites australis* and *Elodea canadensis*. **Architecture Hydrobiology**. 132: 237-253.
- Crites, Ron, and Tchobanoglous George. (1998). **Small and decentralized wastewater management systems**. Singapore: WCB/McGraw-Hill.
- Etnier, Carl, and Guterstam, Bjorn. (1997). **Ecological engineering for wastewater treatment**. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: Lewis.
- Gersberg, R.M., Elkins, B.V., Lyon, S.R., and Goldman, C.R. (1986). Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. **Water Research**. 20(3): 363-368.
- Gersberg, R.M., Lyon, S.R., Brenner, R., and Elkins, B.V. (1989). Integrated wastewater treatment using artificial wetlands: a gravel marsh case study. In: Hammer, D.A. (ed.). **Constructed wetlands for wastewater treatment**. (pp. 145-152). Chelsea, Michigan: Lewis.
- Gumbrecht, T. (1993a). Nutrient removal capacity in submersed macrophyte pond systems in a temperate climate. **Ecology Engineering**. 2: 49-61.
- Gumbrecht, T. (1993b). Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems. **Ecology Engineering**. 2: 1-30.
- Hammer and Knight. (1994). Designing constructed wetlands for nitrogen removal. **Water Science and Technology**. 29(4): 15-27.
- Hofmann, K. (1986). Wachstumverhalten von Schilf (*Phragmites australis* [Cav.] Trin. Ex Steudel) in klärschlammbeackten Filterbeeten. **Architecture Hydrobiology**. 107: 385-409.
- Kadlec, R.H., and Knight, R.L. (1996). **Treatment wetlands**. Boca Raton: Lewis.
- Kickuth, R. (1981). Abwasserreinigung in Mosaikmatritzen aus acroben und anacoben Teilbezirken. In: Moser, F. (ed.). **Grundlagen der Abwasserreinigung**. (pp. 639-665.)

- Lim, Poh-Eng, and Polprasert, C. (1996). Constructed wetland for wastewater treatment and resource recovery. **Environmental System Reviews**. No 41. ENSIC, Asian Institute of Technology. Thailand.
- Metcalf and Eddy, (1991). **Wastewater engineering treatment disposal and reuse**. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Nagalingam Thayalakumaran, (1994). **Application of constructed wetlands to the treatment of a heavy metal wastewater**. M.Eng., Thesis, Asian Institute of Technology.
- Pettecrew, E.L., and Kalf, J. (1992). Water flow and clay retention in submerged macrophyte bed. **Aquatic Science**. 49: 2483-2489.
- Reed, S.C., and Brown, D. (1992). Constructed wetland design – the first generation. **Journal of Water Environment Resource**. 64(6): 776-781.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. (1988). **Natural systems for waste management & treatment**. New York: McGraw-Hill.
- Roser, D.J., McKersie, S.A., Fisher, P.J., Breen, P.F., and Bavor, H.J. (1987). Sewage treatment using aquatic plants and artificial wetlands. **Water Research**. 14(3): 20-24.
- Sapkota, D.K., and Bavor, H.J. (1994). Gravel media filtration as a constructed wetland component for the reduction of suspended solids from maturation pond effluent. **Water Science and Technology**. 29(4): 55-66.
- Sherwood C. Reed, Donald Brown. (1995). Subsurface flow wetlands: A performance evaluation. **Water Environment Research**. 67(2): 224-248.
- Somes, N.L.G., Breen, P.F., and Wong, T.H.F. (1996). Integrated hydrologic and botanical design of stormwater control wetlands. In: **Proc. 5<sup>th</sup> Internat. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control, Universität für Bodenkultur Wien, Austria. Chapter III/4**.
- Sorrell, B.K., and Armstrong, W. (1994). On the difficulties of measuring oxygen release by root systems of wetland plants. **Journal of Ecology**. 82: 177-183.
- Sorrell, B.K., and Boon, P.I. (1992). Biogeochemistry of billabong sediments. II. Seasonal variations in methane production. **Freshwater Biology**. 27: 435-445.

- Tanner, C.C., Clayton, J.S., and Upsdell, M.P. (1995a). Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands – I. Removal of oxygen demand, suspended solids and faecal coliforms. **Water Research**. 29(1): 17-26.
- Tanner, C.C., and Sukias, J.P. (1994). Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. In **Proceedings of the Fourth International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control** (pp. 617-627). Guangzhou, China P.R.
- Thut, R.N. (1989). Utilization of artificial marshes for treatment of pulp mill effluents. In D.A. Hammer (ed.). **Constructed wetlands for wastewater treatment. Municipal, industrial and agricultural** (pp. 239-244). Chelsea, Michigan: Lewis.
- U.S. EPA. (1988). **Design Manual – Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment**. EPA 625/11-88/022. Cincinnati, Ohio: U.S. EPA CERL.
- U.S. EPA. (1993). **Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment**. A Technology Assessment. Office of Water. EPA 832-R-93-008.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, Green, M.B. and Haberl, R. (1998). **Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe**. Backhuys, The Netherlands: Leiden.
- Water Pollution Control Federation (WPCF). (1990). **Natural systems for wastewater treatment**, S.C. Reed (ed.). (pp. 211-260). Alexandria, VA: Manual of Practice FD-16.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท  
โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม



ตารางที่ ก1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ  
นิคมอุตสาหกรรม (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
และสิ่งแวดล้อม, 2542)

ตัวแปร	ค่าไม่เกิน (mg/L)
COD	120
BOD	20
TDS	3,000
TSS	50
TKN	100

ภาคผนวก ข

ประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว

ตารางที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาพักเก็บ  
ต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)			
	1	3	5	7
1	294.05	172.71	80.66	71.71
2	297.78	169.35	82.57	73.89
3	296.45	169.03	81.41	73.92
4	294.63	166.46	83.03	72.68
5	295.92	163.8	85.95	70.40
6	293.71	161.58	88.61	68.52
7	289.39	160.04	85.40	68.11
8	285.17	163.70	86.37	67.06
9	286.26	165.73	84.64	65.80
10	284.27	164.69	88.93	61.89
Mean	291.76	165.71	84.76	69.40
Std.Dev.	5.04	3.83	2.84	3.87

ตารางที่ ข2 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ที่ระยะเวลาพักเก็บ  
ต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)			
	1	3	5	7
1	300.58	191.30	91.67	74.75
2	303.72	187.40	90.99	75.39
3	301.54	188.32	90.92	72.22
4	296.74	185.79	91.14	72.74
5	297.39	184.08	89.26	73.27
6	291.87	183.11	87.48	74.09
7	290.61	182.01	85.20	71.01
8	296.58	178.35	85.66	73.20
9	293.89	179.09	84.74	75.50
10	289.27	184.98	84.10	77.20
Mean	296.22	184.44	88.12	73.94
Std.Dev.	4.82	4.03	3.01	1.82

ตารางที่ ข3 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ที่ระยะเวลากักเก็บ  
ต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	ระยะเวลากักเก็บ (วัน)			
	1	3	5	7
1	355.20	211.10	125.49	109.55
2	349.99	214.90	125.39	104.03
3	341.40	212.51	125.08	101.90
4	332.69	210.40	124.71	103.22
5	333.51	212.27	124.10	101.57
6	331.41	207.68	124.48	101.41
7	331.83	205.50	124.37	101.59
8	328.90	200.92	123.20	96.65
9	339.69	203.36	124.23	100.39
10	337.98	206.74	122.80	102.16
Mean	338.26	208.54	124.39	102.25
Std.Dev.	8.60	4.45	0.87	3.23

ตารางที่ ข4 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.465 ที่ระยะเวลากักเก็บ  
ต่างๆ ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

วัน	ระยะเวลากักเก็บ (วัน)			
	1	3	5	7
1	360.11	217.30	138.36	108.59
2	354.29	215.66	135.47	106.44
3	354.50	212.09	136.65	105.89
4	350.50	214.64	135.02	106.56
5	351.37	217.17	134.65	106.49
6	348.70	216.47	130.93	105.63
7	341.59	212.48	134.20	102.41
8	342.98	212.22	131.20	104.28
9	345.42	210.18	127.15	102.38
10	344.60	209.80	126.51	104.13
Mean	349.41	213.80	133.01	105.28
Std.Dev.	1.97	3.95	2.81	5.88

ตารางที่ ข5 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.400 ที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ

ตัวแปร		ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)			
		1	3	5	7
COD	Influent concentration (mg/L)	459.91	366.66	273.32	274.94
	Effluent concentration (mg/L)	291.76	165.71	84.76	69.40
	% Removal	36.56	54.81	68.99	74.76
BOD	Influent concentration (mg/L)	54.65	48.60	41.25	45.00
	Effluent concentration (mg/L)	40.69	16.40	9.00	5.70
	% Removal	25.54	65.83	78.18	87.33
TDS	Influent concentration (mg/L)	1780.89	1466.67	1366.67	1838.44
	Effluent concentration (mg/L)	1662.59	1281.33	1097.55	1429.78
	% Removal	6.61	12.64	19.69	22.23
TSS	Influent concentration (mg/L)	234.22	166.68	106.22	266.44
	Effluent concentration (mg/L)	122.67	36.00	20.89	42.22
	% Removal	47.63	78.40	80.33	84.15
TKN	Influent concentration (mg/L)	30.55	29.88	17.93	22.49
	Effluent concentration (mg/L)	15.05	8.56	2.26	2.29
	% Removal	50.74	71.34	87.40	89.84
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.410	0.429	0.446	0.287
	Effluent concentration (mg/L)	0.227	0.181	0.099	0.051
	% Removal	44.63	57.81	77.80	82.23
NH <sub>3</sub>	Influent concentration (mg/L)	18.93	9.78	12.54	18.84
	Effluent concentration (mg/L)	8.87	2.54	1.01	0.92
	% Removal	53.16	73.99	91.92	95.13

ตารางที่ ข6 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.420 ที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ

ตัวแปร		ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)			
		1	3	5	7
COD	Influent concentration (mg/L)	459.91	366.66	273.32	274.94
	Effluent concentration (mg/L)	296.22	184.44	88.12	73.94
	% Removal	35.59	49.70	67.95	72.95
BOD	Influent concentration (mg/L)	54.65	48.60	41.25	45.00
	Effluent concentration (mg/L)	43.45	17.80	9.55	6.00
	% Removal	20.49	52.92	76.85	86.67
TDS	Influent concentration (mg/L)	1780.89	1466.67	1366.67	1838.44
	Effluent concentration (mg/L)	1693.41	1324.44	1113.78	1457.78
	% Removal	4.89	9.69	18.50	20.71
TSS	Influent concentration (mg/L)	234.22	166.68	106.22	266.44
	Effluent concentration (mg/L)	126.22	37.33	21.78	44.44
	% Removal	46.11	77.60	79.50	83.32
TKN	Influent concentration (mg/L)	30.55	29.88	17.93	22.49
	Effluent concentration (mg/L)	16.09	10.33	3.24	2.66
	% Removal	47.32	65.43	81.91	88.19
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.410	0.429	0.446	0.287
	Effluent concentration (mg/L)	0.260	0.181	0.111	0.058
	% Removal	36.59	51.98	75.11	79.79
NH <sub>3</sub>	Influent concentration (mg/L)	18.93	9.78	12.54	18.84
	Effluent concentration (mg/L)	9.40	2.63	1.66	1.13
	% Removal	50.34	73.14	86.76	93.9



ตารางที่ ข7 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.439 ที่ระยะเวลาพักเก็บต่างๆ

ตัวแปร		ระยะเวลาพักเก็บ (วัน)			
		1	3	5	7
COD	Influent concentration (mg/L)	459.91	366.66	273.32	274.94
	Effluent concentration (mg/L)	338.26	208.54	124.39	102.25
	% Removal	26.45	43.12	54.49	62.81
BOD	Influent concentration (mg/L)	54.65	48.60	41.25	45.00
	Effluent concentration (mg/L)	48.00	26.45	15.50	12.10
	% Removal	12.17	44.90	62.42	73.11
TDS	Influent concentration (mg/L)	1780.89	1466.67	1366.67	1838.44
	Effluent concentration (mg/L)	1701.57	1362.67	1236.67	1587.11
	% Removal	4.43	7.10	9.51	13.67
TSS	Influent concentration (mg/L)	234.22	166.58	106.22	266.44
	Effluent concentration (mg/L)	139.56	52.89	23.56	50.67
	% Removal	40.42	68.27	77.82	80.98
TKN	Influent concentration (mg/L)	30.55	29.88	17.93	22.49
	Effluent concentration (mg/L)	18.99	11.84	4.45	3.93
	% Removal	37.83	60.36	75.20	82.53
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.410	0.429	0.446	0.287
	Effluent concentration (mg/L)	0.286	0.264	0.140	0.072
	% Removal	30.24	38.46	68.61	74.91
NH <sub>3</sub>	Influent concentration (mg/L)	18.93	12.78	12.54	18.84
	Effluent concentration (mg/L)	11.30	3.37	2.15	2.36
	% Removal	10.32	73.63	82.88	87.49

ตารางที่ ข8 ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ความพรุนของตัวกลาง 0.465 ที่ระยะเวลาเก็บเก็บต่างๆ

ตัวแปร		ระยะเวลาเก็บ (วัน)			
		1	3	5	7
COD	Influent concentration (mg/L)	459.91	366.66	273.32	274.94
	Effluent concentration (mg/L)	349.41	213.80	133.01	105.28
	% Removal	24.03	41.69	51.34	61.71
BOD	Influent concentration (mg/L)	54.65	48.6	41.25	45.00
	Effluent concentration (mg/L)	50.88	29.50	19.40	14.85
	% Removal	6.90	38.54	52.97	67.00
TDS	Influent concentration (mg/L)	1780.89	1466.67	1366.67	1838.44
	Effluent concentration (mg/L)	1722.67	1391.11	1279.11	1619.44
	% Removal	3.25	5.15	6.41	11.91
TSS	Influent concentration (mg/L)	234.22	166.68	106.22	266.44
	Effluent concentration (mg/L)	149.78	58.22	23.56	56.00
	% Removal	36.05	65.07	77.82	78.98
TKN	Influent concentration (mg/L)	30.55	29.88	17.93	22.49
	Effluent concentration (mg/L)	19.67	11.98	5.59	4.49
	% Removal	35.63	59.91	68.82	80.04
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.410	0.429	0.446	0.287
	Effluent concentration (mg/L)	0.327	0.305	0.175	0.072
	% Removal	20.24	28.90	60.76	74.91
NH <sub>3</sub>	Influent concentration (mg/L)	18.93	9.78	12.54	18.84
	Effluent concentration (mg/L)	11.40	3.50	2.83	3.01
	% Removal	39.76	64.25	77.46	84.00

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS

ค.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่

ค.1.1 ผลทดสอบสมมติฐาน COD

ตารางที่ ค1 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ ของ COD

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	I & II	4	.993	.007
Pair 2	I & III	4	.997	.003
Pair 3	I & IV	4	.991	.009
Pair 4	II & III	4	.989	.011
Pair 5	II & IV	4	.979	.021
Pair 6	III & IV	4	.998	.002

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	I – II	2.2325	1.9559	.9779	-8.797	5.3447	2.283	3	.107
Pair 2	I – III	12.0650	1.8215	.9108	9.1665	14.9635	13.247	3	.001
Pair 3	I – IV	14.0850	2.3909	1.1954	10.2806	17.8894	11.782	3	.001
Pair 4	II – III	9.8325	2.8459	1.4230	5.3040	14.3610	6.910	3	.006
Pair 5	II – IV	11.8525	3.5513	1.7757	6.2016	17.5034	6.675	3	.007
Pair 6	III – IV	2.0200	.9.347	.4673	.5327	3.5073	4.322	3	.023

โดยที่ I = ความพรุนของตัวกลาง 0.400                      II = ความพรุนของตัวกลาง 0.420

III = ความพรุนของตัวกลาง 0.439                      IV = ความพรุนของตัวกลาง 0.465

## ค.1.2 ผลทดสอบสมมติฐาน BOD

ตารางที่ ค2 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ BOD

## Paired Samples Correlations

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 I & II	4	1.000	.000
Pair 2 I & III	4	.992	.008
Pair 3 I & IV	4	.990	.010
Pair 4 II & III	4	.994	.006
Pair 5 II & IV	4	.991	.009
Pair 6 III & IV	4	.998	.002

## 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	I - II	2.4875	1.9515	.9757	-.6177	5.5927	2.549	3	.084
Pair 2	I - III	16.0700	3.3876	1.6938	10.6795	21.4605	9.487	3	.002
Pair 3	I - IV	22.8675	4.0561	2.0281	16.4133	29.3217	11.276	3	.001
Pair 4	II - III	13.5825	1.0043	2.0022	7.2107	19.9543	6.784	3	.007
Pair 5	II - IV	20.3800	4.9953	2.4976	12.4314	28.3286	8.160	3	.004
Pair 6	III - IV	6.7975	1.8288	.9144	3.8875	9.7075	7.434	3	.005

ก.1.3 ผลทดสอบสมมติฐาน TDS

ตารางที่ ค3 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ TDS

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	I & II	4	.996	.004
Pair 2	I & III	4	.954	.046
Pair 3	I & IV	4	.873	.127
Pair 4	II & III	4	.947	.053
Pair 5	II & IV	4	.864	.136
Pair 6	III & IV	4	.979	.021

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	I – II	1.8450	.7608	.3804	.6344	3.0556	4.850	3	.017
Pair 2	I – III	6.6620	3.5293	1.7646	1.0042	12.2358	3.751	3	.033
Pair 3	I – IV	8.6175	4.2323	2.1161	1.8830	15.3520	4.072	3	.027
Pair 4	II – III	4.7750	3.9244	1.9622	-1.4696	11.0196	2.433	3	.093
Pair 5	II – IV	6.7725	4.6107	2.3053	-.5641	14.1091	2.938	3	.061
Pair 6	III – IV	1.9975	.8095	.4047	.7095	3.2855	4.935	3	.016

## ค.1.4 ผลทดสอบสมมติฐาน TSS

ตารางที่ ค4 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ TSS

## Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	I & II	4	1.000	.000
Pair 2	I & III	4	.984	.016
Pair 3	I & IV	4	.975	.025
Pair 4	II & III	4	.983	.017
Pair 5	II & IV	4	.975	.025
Pair 6	III & IV	4	.998	.002

## 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	I – II	.9950	.3503	.1751	.4376	1.5524	5.681	3	.011
Pair 2	I – III	5.7550	3.5810	1.7905	5.689E-02	11.4531	3.214	3	.049
Pair 3	I – IV	8.1475	5.1409	2.5705	-3.2856E-02	16.3279	3.170	3	.050
Pair 4	II – III	4.7600	3.5163	1.7581	-.8352	10.3552	2.707	3	.073
Pair 5	II – IV	7.1525	5.0076	2.5038	-.8158	15.1208	2.857	3	.065
Pair 6	III – IV	2.3925	1.8655	.9328	-.5760	5.3610	2.565	3	.083

ค.1.5 ผลทดสอบสมมติฐาน TKN

ตารางที่ ค5 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ TKN

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	I & II	4	.994	.006
Pair 2	I & III	4	.995	.005
Pair 3	I & IV	4	.978	.022
Pair 4	II & III	4	.997	.003
Pair 5	II & IV	4	.983	.017
Pair 6	III & IV	4	.993	.007

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	I – II	4.1175	1.9725	.9862	.9789	7.2561	4.175	3	.025
Pair 2	I – III	10.8500	2.4910	1.2455	6.8863	14.8137	8.712	3	.003
Pair 3	I – IV	13.7300	3.9227	1.9613	7.4882	19.9718	7.000	3	.006
Pair 4	II – III	6.7325	1.9595	.9797	3.6146	9.8504	6.872	3	.006
Pair 5	II – IV	9.6125	3.4301	1.7150	4.1545	15.0705	5.605	3	.011
Pair 6	III – IV	2.8800	2.5013	1.2506	-1.1001	6.8601	2.303	3	.105



ก.1.6 ผลทดสอบสมมติฐาน  $\text{NO}_3\text{-N}$

ตารางที่ ก6 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ  $\text{NO}_3\text{-N}$

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	I & II	4	1.000	.000
Pair 2	I & III	4	.987	.013
Pair 3	I & IV	4	.978	.022
Pair 4	II & III	4	.987	.013
Pair 5	II & IV	4	.976	.024
Pair 6	III & IV	4	.994	.006

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	I – II	4.7500	2.6814	1.3407	.1832	9.0168	3.543	3	.038
Pair 2	I – III	12.5625	5.4243	2.7121	3.9313	21.1937	4.632	3	.019
Pair 3	I – IV	19.4150	9.4311	4.7155	4.4081	34.4219	4.117	3	.026
Pair 4	II – III	7.8125	3.8746	1.9373	1.6472	13.9778	4.033	3	.027
Pair 5	II – IV	14.6650	7.5166	3.7583	2.7044	26.6256	3.902	3	.030
Pair 6	III – IV	6.8525	4.6615	2.3308	-.5650	14.2700	2.940	3	.061

ค.1.7 ผลทดสอบสมมติฐาน  $NH_3$

ตารางที่ ค7 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่  
ของ  $NH_3$

Paired Samples Correlations

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 I & II	4	.995	.005
Pair 2 I & III	4	.972	.028
Pair 3 I & IV	4	.994	.006
Pair 4 II & III	4	.981	.019
Pair 5 II & IV	4	.999	.001
Pair 6 III & IV	4	.987	.013

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 I - II	2.4950	1.9768	.9884	-.6505	5.6405	2.524	3	.086
Pair 2 I - III	7.4700	5.2244	2.6122	-.8432	15.7832	2.860	3	.065
Pair 3 I - IV	12.1825	2.1403	1.0702	8.7768	15.5882	11.384	3	.001
Pair 4 II - III	4.9750	4.4277	2.2138	-2.0704	12.0204	2.247	3	.110
Pair 5 II - IV	9.6875	.7457	.3729	8.5009	10.8741	25.982	3	.000
Pair 6 III - IV	4.7125	3.6979	1.8490	-1.1717	10.5967	2.549	3	.084

ค.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS โดยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น

ค.2.1 ผลทดสอบอัตราการเกิดอันตบฏิกิริยาของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีค่าความพรุนตัว

กลาง 0.400

ค.2.1.1 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยา

ตารางที่ ค8 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยาที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	13.944	5.393		2.586	.123	-9.259	37.146
HRT	3.833	1.177	.917	.083	.083	-1.230	8.897

ค.2.1.2 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยา

ตารางที่ ค9 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยาที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-8.696E-02	.110		-.793	.511	-.559	.385
HRT	-.288	.024	-.993	-12.047	.007	-.391	-.185

ค.2.1.3 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยา

ตารางที่ ค10 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันตบฏิกิริยาที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.400

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-2.588E-02	.012		-2.189	.160	-.077	.025
HRT	2.438E-02	.003	.989	9.449	.110	.110	.035

ค.2.2 ผลทดสอบอัตราการเกิดอันดับปฏิกริยาของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีค่าความพรุนตัว  
กลาง 0.420

ค 2.2.1 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับศูนย์

ตารางที่ ค11 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	11.045	5.679		1.946	.191	-13.377	35.467
HRT	4.245	1.239	.924	3.427	.076	-1.084	9.574

ค 2.2.2 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับหนึ่ง

ตารางที่ ค12 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-9.245E-03	.097		-.095	.933	-.428	.410
HRT	-.291	.021	-.995	-13.717	.005	-.383	-.200

ค 2.2.3 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับสอง

ตารางที่ ค13 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.420

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-2.66E-02	.012		-2.204	.158	-.079	.025
HRT	2.322E-02	.003	.987	8.805	.013	.012	.035

ก.2.3 ผลทดสอบอัตราการเกิดอันคัปฏิกิริยาของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีค่าความพรุนตัว  
กลาง 0.439

ก.2.3.1 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันคัปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ตารางที่ 14 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันคัปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	5.122	3.574		1.433	.288	-10.256	20.501
HRT	4.148	.780	.966	5.318	.034	.792	7.503

ก.2.3.2 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 15 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	3.238E-02	.048		6.75	.569	-.174	.239
HRT	-.179	.010	-.997	-18.789	.003	.242	-.152

ก.2.3.3 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

ตารางที่ 16 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.439

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-9.350E-03	.003		-3.327	.080	-.021	.003
HRT	9.850E-03	.001	.996	16.064	.004	.007	.012

ถ.2.4 ผลทดสอบอัตราการเกิดอันดับปฏิกิริยาของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีค่าความพรุนตัว  
กลาง 0.465

ถ.2.4.1 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ตารางที่ ถ17 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	2.070	3.525		.587	.617	-13.098	17.237
HRT	4.125	.769	.967	5.362	.003	.815	7.434

ถ.2.4.2 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ตารางที่ ถ18 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	7.049E-02	.044		1.604	.250	-.119	.260
HRT	-.169	.010	-.997	-17.621	.003	-.210	-.128

ถ.2.4.3 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

ตารางที่ ถ19 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่มีค่าความพรุนตัวกลาง 0.465

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-7.335E-03	.002		-3.308	.080	-.017	.002
HRT	7.265E-03	.000	.996	15.016	.004	.005	.009

ภาคผนวก ง

หมวดชีวภาพกกดม

ตารางที่ ง1 มวลชีวภาพกอกกลม

ความพรุน	ระยะเวลาักเก็บ (วัน)	มวลชีวภาพ (g/m <sup>2</sup> )
0.400	1	253.74
	3	285.69
	5	326.35
	7	406.37
0.420	1	245.34
	3	263.16
	5	287.26
	7	365.92
0.439	1	189.01
	3	241.78
	5	255.42
	7	355.08
0.460	1	150.80
	3	201.13
	5	233.54
	7	311.03

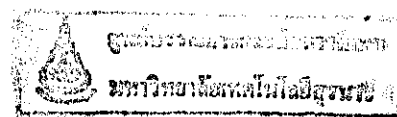


ภาคผนวก จ

เปรียบเทียบน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ระยะเวลาดัก  
เก็บและค่าความพรุนของตัวกลาง 0.400 กับ 0.420

ตารางที่ ๑1 เปรียบเทียบน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของระบบที่ระยะเวลาเก็บและค่า  
ความพรุนของตัวกลาง 0.400 กับ 0.420

ตัวแปร		$\alpha = 0.400$		$\alpha = 0.420$	
		ระยะเวลาเก็บ (วัน)			
		5	7	5	7
COD	Influent concentration (mg/L)	273.32	274.94	273.32	274.94
	Effluent concentration (mg/L)	84.76	69.40	88.12	73.94
	% Removal	68.99	74.76	67.95	72.95
BOD	Influent concentration (mg/L)	41.25	45.00	41.25	45.00
	Effluent concentration (mg/L)	9.00	5.70	9.55	6.00
	% Removal	78.18	87.33	76.85	86.67
TSS	Influent concentration (mg/L)	106.22	266.44	106.22	266.44
	Effluent concentration (mg/L)	20.89	42.22	21.78	44.44
	% Removal	80.33	84.15	79.50	83.32



## ประวัติผู้เขียน

นายวิฑิต ขอสันติวิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ.2512 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2534 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงาน บ.เดลต้าอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรปรับแต่งเครื่องมือวัด พ.ศ. 2535 ทำงาน บ.โตเมนคอร์ดเปอร์เรชั่น (ประเทศไทย) ตำแหน่งวิศวกรภาคสนาม พ.ศ. 2539 ทำงาน บ.ไอเอ็มเอส คอมมูนิเคชั่นส์ จำกัด ตำแหน่งวิศวกรโครงการ เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2543