

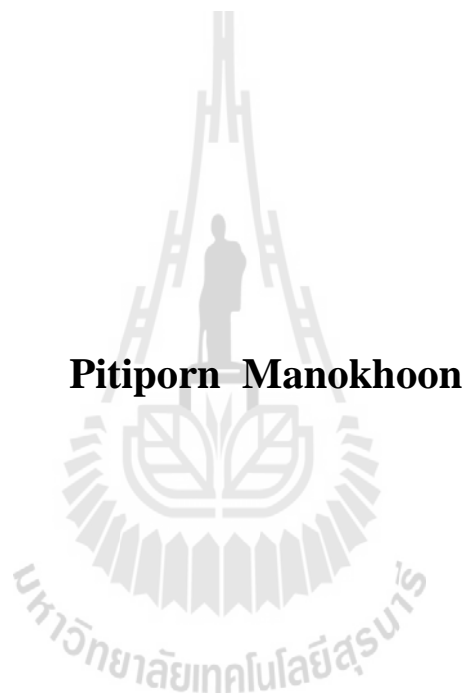
สมุดรวมผลการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง



นางสาวปิติพร มโนคุ้ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**MASS BALANCE FOR PHOSPHORUS REMOVAL
IN A SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED
WETLAND USING SHALE AS A SUBSTRATE**



Pitiporn Manokhoon

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

สมุดมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุจิตต์ กระจิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ

(อ. ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปีจันงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปิติพร มโนคูน : สมดุลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง (MASS BALANCE FOR
PHOSPHORUS REMOVAL IN A SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED
WETLAND USING SHALE AS A SUBSTRATE) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร, 186 หน้า.

การศึกษาสมดุลมวลสารในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินของตัวกลางหินดินดาน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยการจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางจำนวน 8 บ่อ มีกรวดและทรายเป็นตัวกลางจำนวน 6 บ่อ และปลูกพืชต่างชนิดกัน 3 ชนิด ได้แก่ ฐปถายี ต้นอ้อ และหญ้าแฝก และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่างกันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.04 14.98 และ 28.72 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสัดส่วนการสะสมฟอสฟอรัสภายในชุดระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานมีฟอสฟอรัสสะสมที่ตัวกลางร้อยละ 68.41-99.71 สะสมในพีชร้อยละ 4.58-20.27 และในรูปอื่น ๆ ร้อยละ 0.14-13.33 ส่วนชุดระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางกรวดและทรายมีฟอสฟอรัสสะสมที่ตัวกลางร้อยละ 50.50-86.02 สะสมในพีชร้อยละ 7.31-18.56 และในรูปอื่น ๆ ร้อยละ 6.68-29.96 และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 74.49-78.92 กำจัดฟอสฟอรัสมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 68.73-77.21 และกำจัดทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57.49-61.98 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางกรวดและทรายมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57.01-64.42 กำจัดฟอสฟอรัสมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54.19-66.26 และกำจัดทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 46.96-48.91 การนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกลไกของตัวกลางหินดินดานและพีช สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการสมดุลมวลสารสมการ $QC_{in} - QC_{out} = 0.00062W_s + W_p k_p$ โดยค่า k_p ของต้นอ้อ ฐปถายี และหญ้าแฝกมีค่าเท่ากับ 0.0672 0.0533 และ 0.0546 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ตามลำดับ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม _____

PITIPORN MANOKHOON : MASS BALANCE FOR PHOSPHORUS
REMOVAL IN A SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND
USING SHALE AS A SUBSTRATE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 186 PP.

CONSTRUCTED WETLAND/ PHOSPHORUS/ SHALE/ MASS BALANCE

The constructed wetlands are considered as a low-cost alternative system for phosphorus (P) removal. Several studies have concluded that the substrate plays the greatest role in P removal. It is not clear how much of the added P is accumulated in the substrate, assimilated in plants, and transformed by microorganisms or volatilization. The objective of this study was to investigate the transformation and elimination processes of P in subsurface flow constructed wetlands (SF) by using mass balance. The 8 pilot scales of SF constructed wetland with shale as substrate and 6 pilot scales of SF constructed wetland with gravel and sand as substrate were set. The reed (*Phragmites* spp.), cattail (*Typha* spp.) and vetiver grass (*Vetiveria* spp.) were planted in pilot scale units. The synthetic wastewater with three different P concentrations 5.04, 14.98, and 28.72 mg/L was fed into each operation. The calculation of P mass balance in shale units had found that P was accumulated in a substrate of 70-93%, P was accumulated in plants of 5-20% and P was accumulated in other component of 1-12%. Also P mass balance in gravel-sand units had P was accumulated in a substrate of 50-70%, P was accumulated in plants of 5-15% and P was accumulated in other components of 11-50%. The removal efficiencies of shale units were found in a range of 74.49-78.92% for COD, 68.73-77.21% for P, and 57.49-61.98 % for TKN. The removal efficiencies of gravel and sand units were

found in range of 57.01-64.42% for COD, 54.19-66.26% for P, and 46.96-48.91% for TKN. The results could be applied to a design of SF constructed wetland with shale as substrate by using mass balance equation; $QC_{in} - QC_{out} = k_s W + W k_p$ and k_s values is $0.00062 \text{ mg.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ and k_p values are $0.0672 \text{ mg.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ for reed, $0.0533 \text{ mg.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ for cattail and $0.0546 \text{ mg.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ for vetiver grass.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตต์ ครุจิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ขอขอบพระคุณสำนักกองทุนงานสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย
- ขอขอบพระคุณบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ดินดาน
- หน่วยงานประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณวรรณชัย วิจิตรวิภา คุณมานพ จร โศภกรวด และคุณรุ่งเรือง นวลโพธิ์ ที่ให้การช่วยเหลือ

ด้านการดำเนินงานวิจัย

- เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ร่วมสถาบันที่ให้การช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด
- และกลุ่มบุคคลอื่น ๆ ที่ให้การช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และผู้มีอุปการะทุกท่าน ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สนับสนุนให้ทุนการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปิติพร มโนคุณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ฟอสฟอรัส.....	6
2.1.1 ฟอสฟอรัสในน้ำ.....	6
2.1.2 ฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	8
2.1.3 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย.....	9
2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	9
2.2.1 ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	12
2.2.2 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	กลไกในการกำจัดมลสารในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน.....	25
2.3.1	สารอินทรีย์.....	26
2.3.2	ของแข็งแขวนลอย.....	26
2.3.3	ไนโตรเจน.....	27
2.3.4	เชื้อโรค.....	27
2.3.5	ฟอสฟอรัส.....	27
2.4	การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน.....	28
2.4.1	อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์.....	28
2.4.2	อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์.....	29
2.4.3	ระยะเวลาการกักเก็บ.....	29
2.4.4	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ.....	29
2.4.5	ขนาดของตัวกลาง.....	29
2.4.6	ค่าความพรุน.....	29
2.4.7	อัตราการย่อยสลายฟอสฟอรัส.....	29
2.4.8	ปัจจัยสถานะแวดล้อม (อุทกวิทยาและสภาพอากาศ).....	29
2.5	หินดินดาน.....	31
2.5.1	ปริมาณและแหล่งหินดินดานในประเทศไทย.....	32
2.5.2	การใช้ประโยชน์หินดินดาน.....	32
2.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	34
2.6.1	ความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34
2.6.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำหินดินดานมาใช้ในระบบพื้นที่ ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	40
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของพืช ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	41
2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลาง ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	43
2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สมมูลมวลในการกำจัดฟอสฟอรัส ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	44
2.7.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 สถานที่ทำการวิจัย.....	49
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	49
3.2.1 ตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในระบบ.....	49
3.2.2 การจำแนกขนาดของหินดินดาน.....	49
3.2.3 ศึกษาลักษณะสมบัติสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน.....	51
3.2.4 ศึกษาลักษณะสมบัติสมบัติทางเคมีของหินดินดาน.....	51
3.2.5 การออกแบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	51
3.2.6 การติดตั้งและเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	59
3.2.7 การเก็บตัวอย่าง.....	60
3.2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการสมมูลมวลสาร.....	63
3.2.9 การประเมินผลการแทนค่าของสมการสมมูลมวลสาร.....	69
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	ผลการศึกษาและการอภิปรายผล	71
4.1	ลักษณะสมบัติของตัวกลางหินดินดาน	71
4.1.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน	71
4.1.2	ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน	72
4.2	ผลการศึกษาชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	73
4.2.1	ผลการศึกษาสารติดตาม	73
4.2.2	ผลการศึกษาปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบในชุดจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	75
4.2.3	ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืช	76
4.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	81
4.3.1	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	82
4.3.2	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	87
4.3.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	90
4.4	ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	93
4.4.1	ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลาง.....	93
4.4.2	ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช.....	96
4.4.3	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมดุลมวลสาร.....	98
4.5	การวิเคราะห์ข้อมูลสมดุลมวลสารเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดิน โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลาง	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1	การวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลาง	106
4.5.2	การวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช	106
4.5.3	การสร้างสมการสมดุลมวลสาร	110
4.6	การเปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากการเดินระบบจริง และจากสมการสมดุลมวลสาร	111
4.7	ตัวอย่างการคำนวณสมการสมดุลมวลสาร	113
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	115
	รายการอ้างอิง	117
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การคำนวณการศึกษาสารติดตาม	128
	ภาคผนวก ข. การเจริญเติบโตของพืช	140
	ภาคผนวก ค. ประสิทธิภาพของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	145
	ภาคผนวก ง. สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	160
	ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	175
	ประวัติผู้เขียน	186

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วิธีการจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย.....	10
2.2	หน้าที่ของพืชไหล่พื้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	15
2.3	ลักษณะของตัวกลางที่ใช้สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ใต้ผิวดิน	21
2.4	สรุปกลไกในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ใต้ผิวดิน.....	25
2.5	ส่วนประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของหินดินดาน	31
2.6	ปริมาณและมูลค่าการผลิต การใช้ หินดินดาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544-2549.....	33
2.7	เกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ใต้ผิวดิน	35
2.8	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
3.1	วิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี ของตัวอย่างหินดินดาน	51
3.2	การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ใต้ผิวดิน	53
3.3	ลักษณะของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	57
3.4	วิธีการวิเคราะห์และเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำ.....	61
3.5	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างพืชและตัวกลาง	63
4.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน.....	72
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน	73
4.3	ผลการศึกษาสารติดตาม	75
4.4	ผลการศึกษาค่าเฉลี่ย (Mean \pm SD) ปัจจัยสภาวะแวดล้อม ในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	76
4.5	น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชทั้ง 3 ชนิดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	79
4.6	ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่เข้าและออกในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	81
4.7	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	84
4.8	ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลาง.....	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืช 97
4.10(ก)	สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลใต้ผิวดิน ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน) 99
4.10(ข)	สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลใต้ผิวดิน ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ระยะเวลาการเดินระบบ 120 วัน) 100
4.10(ค)	สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ระยะเวลาการเดินระบบ 180 วัน) 101
4.11	ผลวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลางหินดินดาน 107
4.12	ผลการวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช 109
4.13	ค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัส โดยพืช (k_p) 111
4.14	สรุปตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลมวลสาร 111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปของฟอสฟอรัสและการแตกตัวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ 7
2.2	ปฏิกิริยาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมและเหล็ก 8
2.3	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลท่วมผิวดินอย่างอิสระ 12
2.4	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน 13
2.5	ชั้นของตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 21
2.6	การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์ 24
2.7	กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 30
2.8	ไดอะแกรมของแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร 39
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 50
3.2	แผนผังชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 52
3.3	รูปตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ของตัวกลางหินดินดาน 55
3.4	รูปตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ของทราย 56
3.5	ลักษณะการปลูกพืชในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 60
3.6	จุดเก็บตัวอย่างตัวกลาง 62
3.7	การหาค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดาน (k_d) 66
3.8	การหาค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช (k_p) 67
3.9	การหาค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืช (W_p) 68
4.1	ผลการศึกษาสารติดตาม (ก) บ่อตัวกลางหินดินดาน และ (ข) บ่อตัวกลางกรวดและทราย 74
4.2	น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 78
4.3	แสดงความสูงเฉลี่ยของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ระยะเวลาตั้งแต่ 0-180 วัน 80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของตัวกลางต่างชนิดกัน 83
4.5	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของพืช ชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน 83
4.6	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลางต่างชนิดกัน 87
4.7	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ของพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน 88
4.8	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของตัวกลางต่างชนิดกัน 91
4.9	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น ของพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน 92
4.10	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 95
4.11	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 97
4.12	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบที่ไม่ปลูกพืช โดยใช้ตัวกลางหินดินดาน (บ่อ S) 102
4.13	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูกต้นอ้อ โดยตัวกลางหินดินดาน (บ่อ SP) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CP) 102
4.14	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูก กล้วย โดยตัวกลางหินดินดาน (บ่อ ST) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CT) 103
4.15	ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูกหญ้าแฝก โดยตัวกลางหินดินดาน (บ่อ SV) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CV) 103
4.16	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางของระบบ 107
4.17	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช 108
4.18	การเปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ 113

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_c	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล
CEC	=	Cation Exchange Capacity
COD	=	Chemical Oxygen Demand
EPA	=	Environmental Protection Agency
FWS	=	Free Water Surface Flow Constructed Wetland
$g\ cm^{-3}$	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
K_f	=	ค่าคงที่การดูดซับของระบบ
LECA	=	Light Expanded Clay Aggregate
m	=	ปริมาณสารดูดซับ
mm	=	มิลลิเมตร
$m\ d^{-1}$	=	เมตรต่อวัน
mg	=	มิลลิกรัม
$mg\ l^{-1}$	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
$mg\ P\ g^{-1}$	=	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม
$mg\ P\ plant^{-1}$	=	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้น
$m\ yr^{-1}$	=	เมตรต่อปี
$m^2\ g^{-1}$	=	ตารางเมตรต่อกรัม
m^2	=	ตารางเมตร
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
ORP	=	Oxidation-Reduction Potential
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
PO_4^{3-}	=	ออร์โธฟอสเฟต
R^2	=	Correlation Coefficient
SF	=	Subsurface Flow Constructed Wetland
x	=	ปริมาณตัวถูกละลายบนผิวสารดูดซับ
X	=	ปริมาณตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ฟอสฟอรัสเป็นสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียซึ่งมีแหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มาจากชุมชนและการเกษตรกรรม ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ และการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ของมนุษย์ในโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วของสาหร่ายและแพลงตอนต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ โดยฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Sawyer et al., 2003; มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และมันรัชย์ ตันกุลเวศน์, 2547) ดังนั้นจึงควรกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปของชุมชนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนได้ในปริมาณสูงแต่กำจัดฟอสฟอรัสได้ในปริมาณต่ำ ถ้าต้องการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งต้องมีการเพิ่มกระบวนการเฉพาะเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่ การใช้สารเคมีในการตกตะกอนผลึก วิธีนี้มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการและมีปริมาณสลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัดที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป (Metcalf and Eddy, 2004) กระบวนการทางชีวภาพ เช่น ระบบเอเอสตัดแปลง เป็นระบบที่สามารถกำจัดได้ทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบเดียว แต่จะมีข้อเสียคือ ต้องควบคุมสภาวะของระบบให้มีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัด (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547) ดังนั้นจึงมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนได้ใกล้เคียงกับระบบอื่น และสามารถกำจัดทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นระบบที่ง่ายต่อการดูแลรักษา มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประหยัดพลังงาน และไม่มีตะกอนส่วนเกินที่ต้องกำจัด (Cooper et al., 1996; Kadlec and Knight, 2006) จึงนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการกำจัดฟอสฟอรัส ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่ไม่ซับซ้อนผสมผสานกับการปลูกพืชเพื่อเลียนแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติ ทำให้มีส่วนสำคัญในการส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและความหลากหลายทางชีวภาพ เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ดังนั้นจึงมีการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน อุตสาหกรรมและจากแหล่งน้ำเสียอื่น ๆ มากยิ่งขึ้น

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Constructed Wetlands) เป็นระบบบำบัดที่น้ำเสียไหลผ่านลงไปในพื้นที่ชั้นตัวกลางในแนวนอนหรือแนวตั้งที่มีพืชน้ำปลูกอยู่ โดยน้ำเสียที่ไหลผ่านจะถูกบำบัดระหว่างการสัมผัสพื้นผิวของตัวกลาง และรากพืชที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่ ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างพืช จุลินทรีย์ และตัวกลาง มีกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สำคัญ คือ ปฏิกริยาการดูดซับและตกตะกอนกับองค์ประกอบของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวกลาง จากนั้นฟอสฟอรัสจะถูกพืชและจุลินทรีย์นำฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์เนื้อเยื่อ ตัวกลางจึงเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Johnsson et al., 1997; Zhu et al., 1997; Adam et al., 2007) ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยสำหรับให้จุลินทรีย์ใช้ยึดเกาะและพืชใช้ในการพัฒนาระบบราก ช่วยในการกรองและดูดซับสารแขวนลอยและมลสารต่าง ๆ ที่เข้ามาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่นำมาเป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ควรเลือกใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารได้ดี โดยเฉพาะฟอสฟอรัส เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษของระบบ ตัวกลางที่นิยมใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยทั่วไปจะเป็นตัวกลางที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น มีราคาถูกและมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่พอเหมาะ เช่น กรวด หินหรือดินร่วนปนทราย แต่ตัวกลางเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำ ทำให้เกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ในระบบได้ง่าย ส่งผลทำให้อายุการใช้งานของระบบสั้น มีการศึกษาวิจัยพบว่าตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงจะต้องมีพื้นที่ ผิวสัมผัสมากและความพรุนสูง มีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย แคลเซียม เหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสได้ดี (Gray et al., 2000; Bubba et al., 2003; Forbes et al., 2005; Kadlec and Knight, 2006)

หินดินดาน (Shale) มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา ดาวโรตอง, 2550; Martin Marietta Material, 2004) มีการนำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดย Drizo et al. (1997) ได้ทำการเปรียบเทียบตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น กรวด ทราย และหินดินดาน พบว่าหินดินดานมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ดีกว่าตัวกลางกรวดและทราย โดยเฉพาะการกำจัดฟอสเฟตมีประสิทธิภาพสูงร้อยละ 98-100 นอกจากนี้พืชยังสามารถเจริญเติบโตและพัฒนาระบบรากได้ดีบนหินดินดาน และมีการคาดการณ์อายุการใช้งานของหินดินดานที่นำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ว่าสามารถนำมาใช้งานระบบได้สูงถึง 20 ปี ซึ่งจากผลการศึกษาของ Daothaisong and Yimrattanabovorn (2008) สนับสนุนงานวิจัยนี้

โดยพบว่าเมื่อนำหินดินดานในจังหวัดสระบุรี ประเทศไทย ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันมาทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสและไนโตรเจน พบว่าหินดินดานขนาด 0.25-8.00 มิลลิเมตร มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสและไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.051-0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.029-0.143 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบใช้เป็นตัวกลางในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 48.55-72.96 และ 64.74-93.50 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตัวกลางกรวดและทรายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นหินดินดานจึงมีลักษณะสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ปัจจุบันกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินยังไม่สามารถอธิบายได้เป็นที่ชัดเจน (Chung et al., 2008; Meuleman et al., 2010) ดังนั้นการศึกษากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของกลไกการกำจัดฟอสฟอรัส โดยตัวกลางหรือการนำไปใช้โดยพืชว่ามีสัดส่วนในการกำจัดฟอสฟอรัสมากน้อยเพียงใด จะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและออกแบบระบบ (Lantzke et al., 1999; Lai and Lam, 2008) การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง เพื่อทราบถึงกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ โดยอาศัยทฤษฎีสมดุลมวลสาร เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงและสัดส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และนำข้อมูลที่ได้ออกไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบก่อสร้างระบบและการเดินระบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง ทำให้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นระบบนำร่องสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียจริงจากชุมชนขนาดเล็กซึ่งมักมีปัญหาการปนเปื้อนฟอสฟอรัสจากการเกษตรกรรม เพื่อช่วยแก้ปัญหาหมกพิษในแหล่งน้ำสาธารณะได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางโดยวิธีสมดุลมวลสาร

1.2.2 เพื่อหาสมการสมดุลมวลสารในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาดังต่อไปนี้

1.3.1 ตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยมีแหล่งที่มาอยู่ใกล้บริเวณที่ตั้งของบริษัท ตำบลบ้านป่า อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

1.3.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินดินดานที่นำมาใช้เป็นตัวกลางของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ องค์ประกอบของแร่ธาตุต่าง ๆ ในหินดินดาน จำแนกขนาดความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) และความพรุน (Porosity) เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลางเปรียบเทียบกับชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินกรวดและดินร่วนปนทรายเป็นตัวกลาง เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าและออกจากระบบทำการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ COD TKN และ Total Phosphorus (TP)

1.3.4 ทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเดินระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ได้แก่ ค่า ORP pH และอุณหภูมิ

1.3.5 ในการศึกษาวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในตัวกลางและพืช ส่วนการสะสมในรูปอื่น ๆ (ได้แก่ การสะสมในเนื้อเยื่อจุลินทรีย์ การย่อยสลายของซากพืชและสิ่งมีชีวิตในระบบ และการระเหยของน้ำไปในบรรยากาศ) จะรวมเข้าเป็นกลไกอื่น ๆ สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

1.3.5.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสที่เข้ามาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง ในรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมเนื้อเยื่อของพืช 3 ชนิด ได้แก่ ต้นอ้อ กล้วยน้ำว้า และหญ้าแฝก โดยการตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในตัวอย่างเนื้อเยื่อพืชก่อนและหลังการเดินระบบ

1.3.5.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของฟอสฟอรัสที่เข้ามาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางที่สะสมในตัวกลางหินดินดานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในตัวกลางหินดินดานก่อนและหลังการเดินระบบ

1.3.6 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยหลักการสมดุลมวลสารเพื่อศึกษาปริมาณการสะสมของฟอสฟอรัสในระบบ และนำมาประเมินหาสมการของการกำจัดฟอสฟอรัสเพื่อนำไป

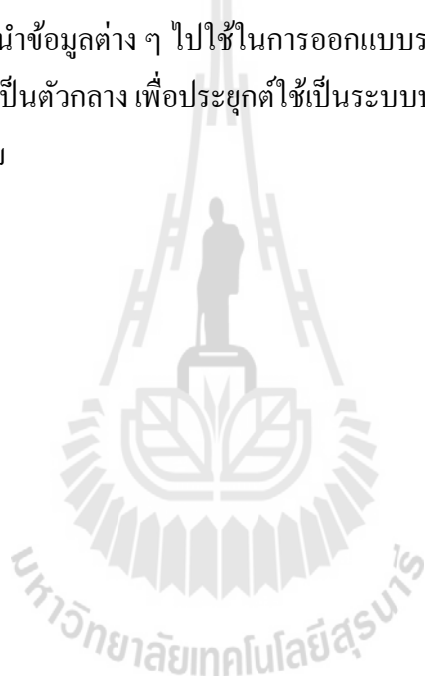
ประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง

1.4.2 เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณ และความสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง

1.4.3 สามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลาง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับชุมชนขนาดเล็ก และน้ำเสียจากอุตสาหกรรม



บทที่ 2

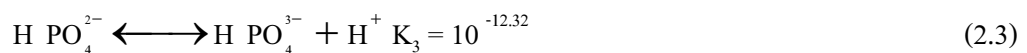
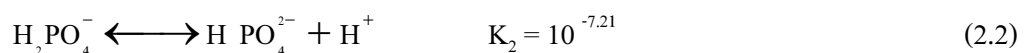
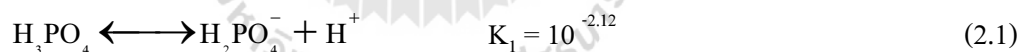
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอสฟอรัส

2.1.1 ฟอสฟอรัสในน้ำ

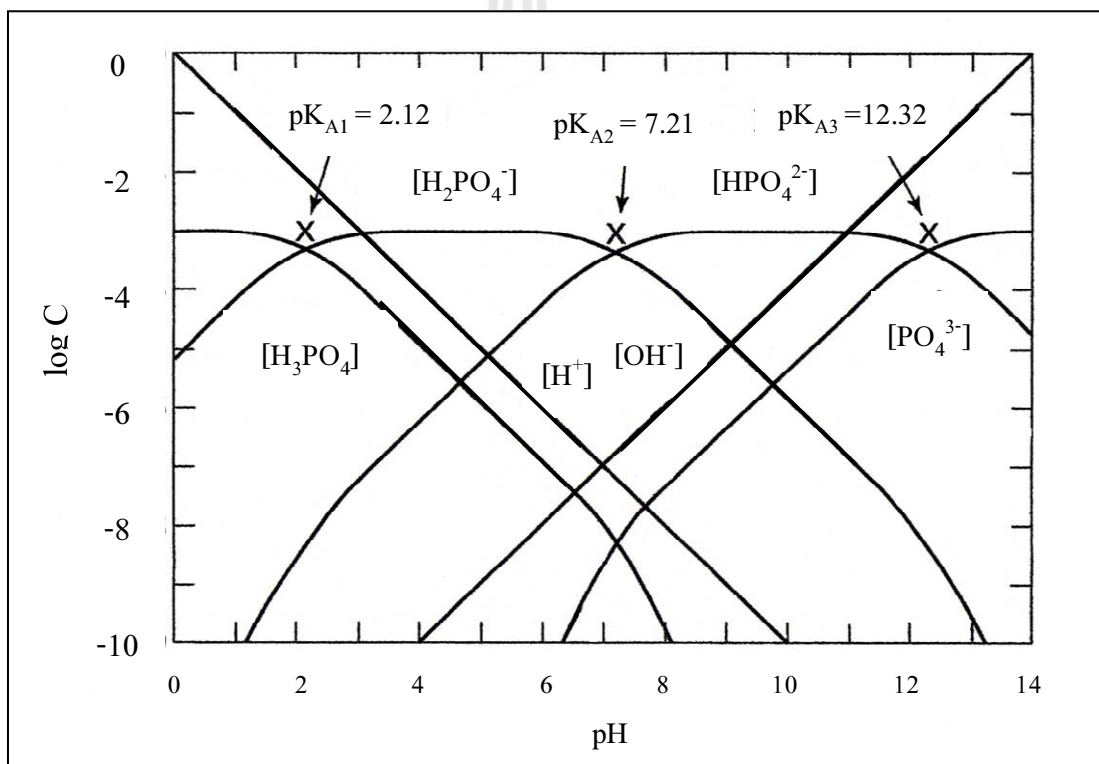
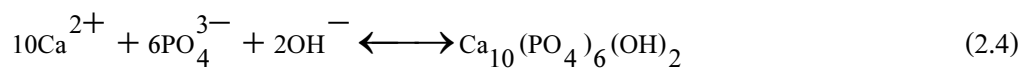
ฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมอยู่ในรูปของแข็ง ของแข็งแขวนลอย หรือสารละลาย ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น อินทรีย์ฟอสเฟต ออร์โธฟอสเฟต คอนเดนซ์ฟอสเฟต ซึ่งคอนเดนซ์ฟอสเฟตสามารถถูกไฮโดรไลซิสเป็นออร์โธฟอสเฟตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและพีเอชต่ำ และในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต นอกจากนี้พีเอชของน้ำยังเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมคุณสมบัติของสารประกอบฟอสเฟต การแตกตัวของฟอสฟอรัสในรูปต่าง ๆ ในน้ำธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับพีเอชของแหล่งน้ำนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำรูปต่าง ๆ แตกตัวเป็นไอออนของกรดออร์โธฟอสฟอริก ดังแสดงในสมการที่ (2.1)-(2.3) ในช่วงพีเอช 0-2 จะพบในรูป H_3PO_4 ช่วงพีเอช 2-7 จะพบในรูป $H_2PO_4^-$ ช่วงพีเอช 7-12 จะพบในรูป HPO_4^{2-} และช่วงพีเอช 12-14 จะพบในรูป PO_4^{3-}

4

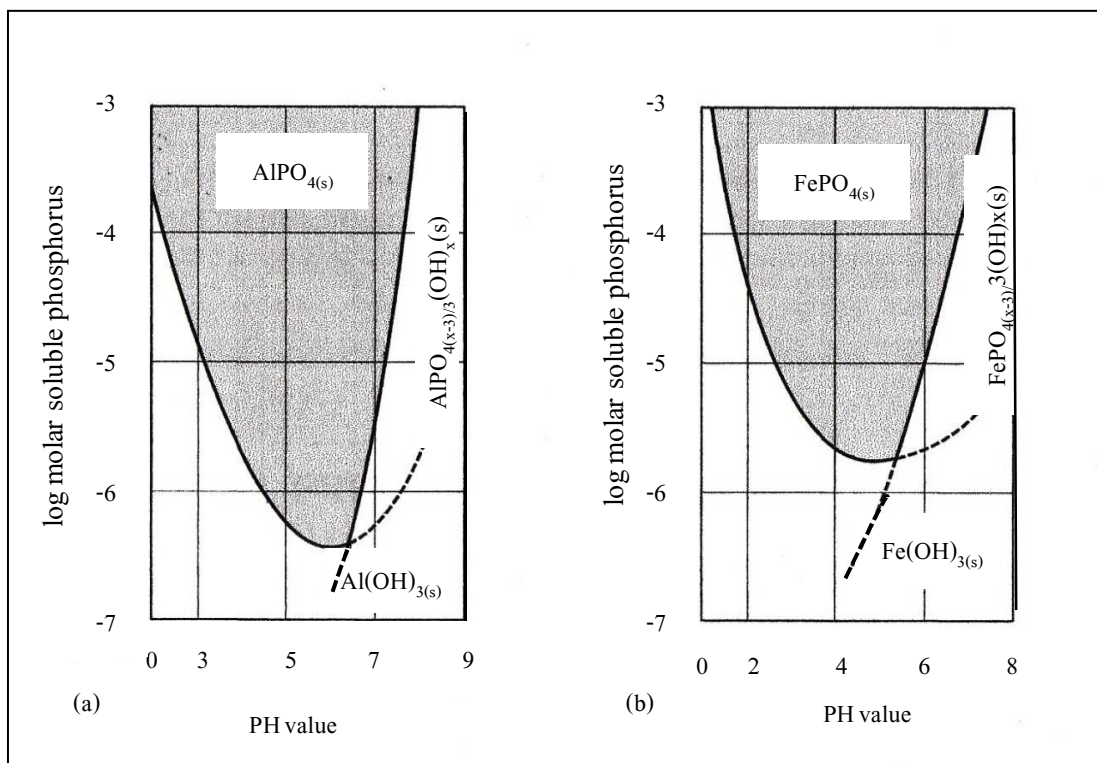


การเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนของฟอสฟอรัสกับโลหะจำพวก แคลเซียม (Ca^{2+}) เหล็ก (Fe^{3+}) และอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะขึ้นอยู่กับพีเอช โดยช่วงพีเอช 5-7 จะทำปฏิกิริยากับแมงกานีส เหล็กและอะลูมิเนียม ส่วนช่วงพีเอช 7-10 จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม (ยงยุทธ โอสดสภา สุภมาศ พณิชศักดิ์พัฒนา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณี โรจน์ และ ชัยสิทธิ์ ทองจู, 2541) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และมีสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.4) (2.5) และ (2.6) โดย

อะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยากับฟอสเฟตในรูป Hydroxylapatite เหล็กเกิดในรูปเฟอร์รัสฟอสเฟตและแคลเซียมเกิดในรูปแคลเซียมฟอสเฟตตามลำดับ



รูปที่ 2.1 รูปของฟอสฟอรัสและการแตกตัวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ (Sawyer et al., 2003)



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการตกตะกอนของอะลูมิเนียม (a) และเหล็ก (b) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2.1.2 ฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีอยู่ทั้งในรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำของแข็งแขวนลอย รูปที่ถูกดูดซับหรือถูกตรึงผิวกับผิวของตัวกลาง และรูปที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชหรือรูปที่เป็นแร่ธาตุอยู่ในดิน ซึ่งรูปของฟอสฟอรัสจะถูกควบคุมด้วยค่าพีเอชของระบบ ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9-14 ดังนั้นจะพบฟอสฟอรัสในรูป H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} (Morel and Hering, 1993) ซึ่งรูปของออร์โธฟอสเฟตจะเป็นรูปของฟอสฟอรัสที่เป็นสารอนินทรีย์ที่พบได้มากที่สุดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Hens and Merckx, 2002; Kvarnström et al., 2004) โดยออร์โธฟอสเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมและเหล็กที่อยู่ในตัวกลางได้ดีที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรด และเกิดปฏิกิริยาเคลือบผิวในสภาวะที่เป็นด่างเป็นส่วนใหญ่ (Reddy and D'Angelo, 1994) ส่วนการสะสมฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นนอกจากจะถูกสะสมที่ตัวกลางแล้ว ฟอสฟอรัสยังถูกสะสมในเนื้อเยื่อพืช ชากพืช ชากสัตว์ที่ถูกทับถม จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อาศัยในระบบและในดิน

2.1.3 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

โดยทั่วไปการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียจะอาศัยกระบวนการทางเคมีกายภาพ และชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สูตรวิธีกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย และข้อดี-ข้อเสียของแต่ละกระบวนการ จะเห็นว่ากระบวนการบำบัดทางชีวภาพต้องทำการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ ส่วนกระบวนการบำบัดทางกายภาพและเคมีจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นพื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสถานะการอิ่มตัวด้วยน้ำไว้ได้ ซึ่งเป็นการสร้างเลียนแบบบึงหรือพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น พืชจำพวกต้นอ้อ (*Phragmites*) ต้นกก (*Scirpus*) และธูปฤาษี (*Typha*) โดยมีทราย กรวดหรือดินซึ่งใช้เป็นตัวกลาง (Bragato et al., 2006; Kadlec and Knight, 2006; Calheiros et al., 2009) โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ (Reed et al., 1988) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดของเสียอีกระบบหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้าง การควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ (Kadlec and Knight, 1995; Cooper et al., 1996; Edwards et al., 2006)

ตารางที่ 2.1 วิธีกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

ชนิดของกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
1. วิธีทางชีวภาพ			
ระบบแอสตัดแปลง	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดทั้งไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ในระบบเดียว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีปริมาณสลัดจ์ที่ต้องถ่ายเททิ้งออกมากกว่าระบบแอสธรรมดา - สารพิษอาจจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบลดลง - ต้องควบคุมอัตราส่วนของสารอาหารที่เข้าระบบ (BOD : N : P) 	ชฎารัตน์ อนันต์ และ ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2539); เกரியงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2543; 2547); Morse et al. (1998); Metcalf and Eddy (2004)
2. วิธีทางกายภาพ			
การแยกด้วยไฟฟ้า-เยื่อกรอง (Electrodialysis)	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสามารถผลิตเป็นน้ำดื่มบริสุทธิ์ได้ - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีระบบบำบัดเบื้องต้นก่อนเข้าระบบนี้ - ต้องกำจัดพวกเกลือที่ใช้ในระบบบำบัด - อาจเกิดปัญหาการตกตะกอนเคมีขึ้นในระบบ - เป็นระบบที่มีค่าลงทุนสูง 	เกரியงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2543; 2547); Morse et al. (1998); Metcalf and Eddy (2004)

ตารางที่ 2.1 วิธีกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย (ต่อ)

ชนิดของกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
2. วิธีทางกายภาพ			
การแยกด้วยเคมีไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพการกำจัดไม่สูงมาก - เป็นระบบที่มีค่าลงทุนสูง 	เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2543; 2547); Morse et al. (1998) Metcalf and Eddy (2004);
ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นระบบที่มีค่าลงทุนด้านอุปกรณ์และดำเนินการสูงมาก - ต้องดูแลระบบอย่างดี เพราะแผ่นเยื่อกรอง 	
การกลั่น (Distillation)	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีแยกธาตุต่าง ๆ ออกจากน้ำเสียทำให้ได้คุณภาพน้ำเทียบเท่ากับน้ำดื่ม - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าลงทุนด้านอุปกรณ์และดำเนินการสูง 	
3. วิธีทางเคมี			
การตกตะกอนผลึก (Precipitation)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย - สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าลงทุนและดำเนินการสูง - ต้องหาวิธีกำจัดพวกสลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัด 	

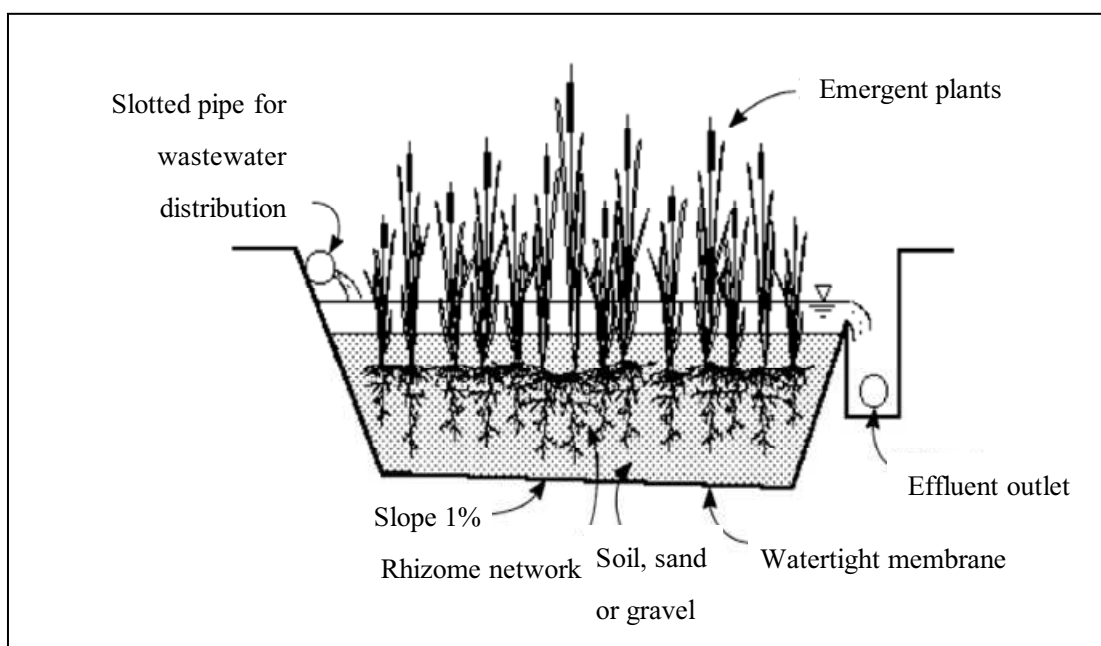
2.2.1 ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.2.1.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

(Free Water Surface Flow Constructed Wetland, FWS)

เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำเสียไหลผ่านผิวหน้าดินหรือตัวกลางและสัมผัสกับอากาศโดยตรงจากนั้นจึงไหลซึมลงสู่พื้น ซึ่งประกอบด้วยพืชน้ำหลายชนิด โดยมีระดับน้ำลึกประมาณ 0.1-0.6 เมตร พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในรูปแบบนี้อาศัยการทำงานของพืชในการบำบัดน้ำเสียเป็นหลัก น้ำเสียจะไหลตามแนวอนขนานไปกับพื้นดิน ซึ่งมีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูด้วยวัสดุกันซึม และมีพืชน้ำจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของแร่ธาตุ และเป็นที่ยึดเกาะของพวกจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Kadlec and Knight, 1996) น้ำเสียจะถูกทำให้ปล่อยโดยไหลเข้าระบบอย่างช้า ๆ ผ่านลำต้นและรากของพืชซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอน และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (กรมควบคุมมลพิษ และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, 2548)



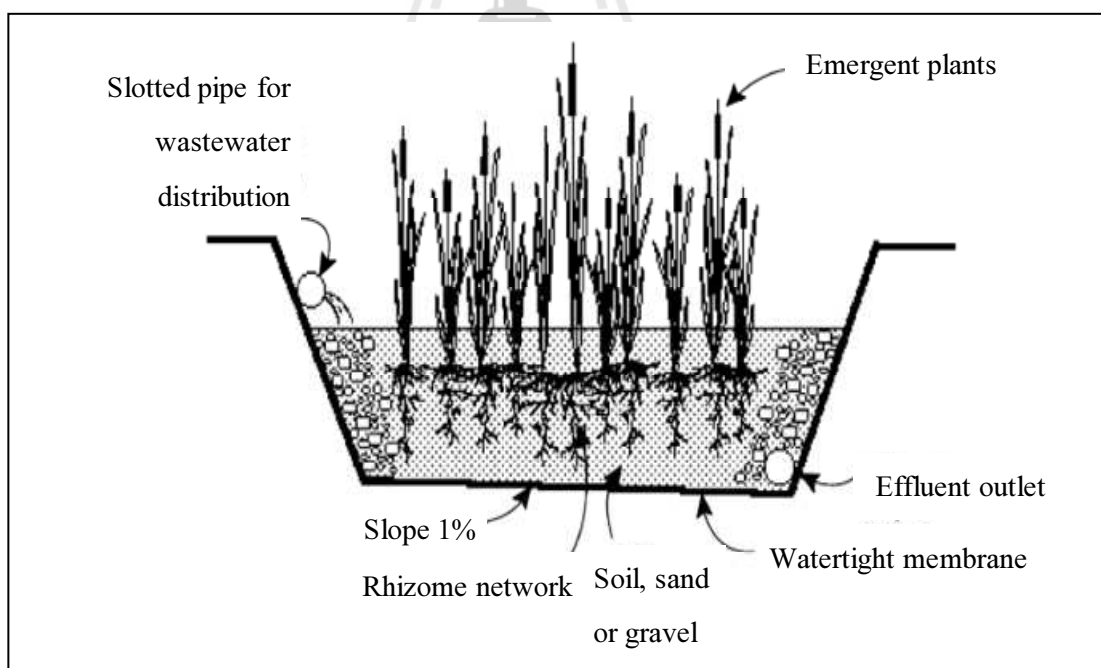
รูปที่ 2.3 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลท่วมผิวดินอย่างอิสระ

(Free Water Surface Systems : FWS) (Polprasert, 2004)

2.2.1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

(Subsurface Flow Constructed Wetland, SF)

เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยผ่านลงไปในพื้นที่ชุ่มน้ำที่ปลูกพืชน้ำไว้ ตัวกลางที่ใช้มักเป็นพวกหิน กรวด ทราย หรือดินชนิดต่าง ๆ ซึ่งตัวกลางอาจมีเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ ด้านล่างอัดด้วยดินเหนียวหรือวัสดุกันซึมเพื่อรักษาระดับน้ำ (ศุวสา กานตวนิชกูร, 2544) น้ำเสียจะเข้าระบบโดยไหลผ่านข้างใต้ชั้นตัวกลางในแนวนอนหรือแนวตั้ง (ระดับน้ำอยู่เท่ากันหรือต่ำกว่าผิวดิน) น้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ระบบนี้จะถูกบำบัดระหว่างสัมผัสพื้นผิวของตัวกลางและรากพืชที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่ โดยสารแขวนลอยหรือสารอินทรีย์จะตกตะกอนภายในตัวกลาง ส่วนสารที่ละลายได้จะถูกดูดซับที่ผิวของตัวกลาง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ธาตุอาหารในน้ำเสียจะลดลงเนื่องจากกลไกการดูดซับนำไปใช้ของพืช ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและชนิดของน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, 2548)



รูปที่ 2.4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

(Subsurface Flow Systems : SF) (Polprasert, 2004)

2.2.2 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Wetland Component)

2.2.2.1 พืช (Plant)

พืชมีหน้าที่หลัก คือ เป็นตัวช่วยปรับสภาวะแวดล้อมของบ่อ เพื่อช่วยให้การบำบัดน้ำเสียเป็นไปได้ด้วยดี สร้างสิ่งแวดล้อมให้กับจุลินทรีย์ โดยที่ใบและลำต้นของพืชช่วยชะลอความเร็วของการไหลของน้ำ ทำให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียตกตะกอน และยังเป็นที่ยึดเกาะอาศัยของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ส่วนของใบและลำต้นเมื่อพืชเจริญเติบโตและตายลงใบและลำต้นจะทับถมเหนือพื้นผิวดินทำให้เกิดชั้นของซากอินทรีย์วัตถุจากการที่เกิดการสะสมของมวลสิ่งมีชีวิตทำให้เป็นที่อยู่อาศัยและเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ นอกจากนี้พืชสามารถดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Reddy and Debussk, 1987; Chung et al., 2008) สำหรับชนิดของพืชน้ำที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถแบ่งเป็นพืชใต้น้ำ (Submerged Plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emerged Plant) พืชลอยน้ำ (Floating Plant) และพืชชายน้ำ (Marginal Plant) แต่ในปัจจุบันนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นิยมใช้พืชโผล่พ้นน้ำ ได้แก่ ฐูปฤณิก กก อ้อ และแห้วทรงกระเทียม เป็นต้น เนื่องจากมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้หลายประเภทและหาได้ง่ายในท้องถิ่น (Bragato et al., 2006; Calheiros et al., 2009) นอกจากนี้ส่วนรากของพืชโผล่พ้นน้ำสามารถลำเลียงออกซิเจนสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายและทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) มีการเจริญได้ดี และสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และความสามารถในการดูดซับตะกอนของฟอสฟอรัสด้วย (สุวศา กานตวนิชกูร, 2544) ซึ่งพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัสคิดเป็นร้อยละ 10-12 (Vohla et al., 2007) ส่วนประกอบของพืชในระบบบึงประดิษฐ์มีคุณสมบัติในการช่วยบำบัดน้ำเสียหลายอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

นอกจากนี้การใช้สารอาหารของพืชก็มีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และมลสารอื่น ๆ ในน้ำเสียด้วย อัตราการใช้สารอาหารของพืชถูกจำกัดโดยอัตราการเจริญเติบโตสุทธิ และความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อซึ่งจะมีค่าสูงในพืชที่มีอายุน้อย (มากกว่า 25 กรัมต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อ) และลดลงเมื่อโตเต็มที่ (กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ, 2544) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกพืชขึ้นมา 3 ชนิดโดยมีหลักการดังต่อไปนี้ เป็นพืชที่หาง่ายในท้องถิ่น มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีเป็นที่นิยมนำไปใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และมีปริมาณฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบในเนื้อเยื่อแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้คัดเลือกพืชดังต่อไปนี้

1) หญ้าแฝก

ชื่อพื้นเมือง : หญ้าแฝก

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Vetiveria* spp.

ชื่อวงศ์ : Family Poaceae หรือ Gramineae

ชื่อสามัญ : Vetiver grass

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหญ้าแฝก

หญ้าแฝกมีลำต้น (culm) ขึ้นเป็นกอ ลักษณะเป็นพุ่ม มีความสูงประมาณ 100-200 เซนติเมตร (จเร สดากร, 2535) กอแฝกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยกอจะเบียดกันแน่นซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะอันหนึ่งที่แตกต่างจากหญ้าชนิดอื่นค่อนข้างชัดเจน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) ใบ (leaf) ใบหญ้าแฝกแตกต่างจากโคนกอ ใบเรียวยาวประมาณ 75 เซนติเมตร กว้างประมาณ 8 มิลลิเมตร ขอบใบและเส้นกลางใบมีหนามละเอียดเช่นที่พบในแฝกหอม (กรมพัฒนาที่ดิน, 2536) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 4-9 และเป็นหญ้าที่ทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2547)

ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของพืช ใฝ่ล่พื้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ลดความเข้มข้นของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช - ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน - ช่วยให้ระบบดูสวยงาม - สะสมสารอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - กรองตะกอนขนาดใหญ่ - เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของเมือกจุลินทรีย์ - ลดความเร็วกระแสน้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน - ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ - ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน - ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตัวกลางใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ดูดซับสารอาหาร - ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบน้ำไหลแนวตั้ง - ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลายและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน - ปล่อยแอนติไบโอติก

หมายเหตุ : สุวศา กานตวนิชกูร (2544)

ราก (Root) หล้าแฝกเป็นพืชที่มีระบบรากลึก การเจริญเติบโตของรากเกิดในแนวตั้ง (Vertical) มากกว่าด้านข้าง รากจะประสานกันแน่น หยั่งลึกเป็นแนวตั้งลงในดินไม่แผ่ขนาน มีรากแกน รากแขนง และรากฝอยมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) หล้าแฝกที่มีอายุประมาณ 28 เดือน รากจะเจริญเติบโตเต็มที่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541) รากจะมีความยาวมากกว่า 3 เมตร (จร สดากร, 2535) รากหล้าแฝกจะมีความหอมเย็น เพราะมีน้ำมันหอมระเหยอยู่เฉลี่ยประมาณร้อยละ 1.4-1.6 ของน้ำหนักแห้ง

ช่อดอก (Inflorescence) หล้าแฝกมีช่อดอกตั้ง มีลักษณะเป็นรวง ก้านช่อดอกและรวงสูงประมาณ 100-150 เซนติเมตร ช่อดอกของหล้าแฝกส่วนใหญ่มีสีม่วง

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อของหล้าแฝกร้อยละ 2 (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2547) โดยมีการสะสมฟอสฟอรัสที่ส่วนรากมากกว่าลำต้น (จิตติณัฐ ศักรานุกิจ, 2549)

การใช้ประโยชน์ของหล้าแฝก

หล้าแฝกสามารถขึ้นได้ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ หรือดินกรด ดินเค็ม (ไพรัช พงษ์วิเชียร และคณะ, 2548; Klomjek and Nitisoravut, 2005) สภาพกรวดทราย ดินลูกรัง และดินที่มีแร่ธาตุบางชนิด เช่น อะลูมิเนียม ปะปนอยู่ขึ้นได้ในสภาพดินฟ้าอากาศที่แตกต่างกันมาก ในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝน 200-6,000 มิลลิเมตรต่อปี อุณหภูมิตั้งแต่ -9 ถึง 45 องศาเซลเซียส มีอายุหลายปี หล้าแฝกมีระบบรากฝอยที่แข็งแรงและแตกรากมาก สามารถชอนไชไปในดินและยึดเม็ดดินได้ลึก ส่วนโคนหรือฐานของต้นอยู่ใต้ดิน มีตาเป็นที่เกิดของต้นใหม่ หากส่วนบนถูกทำลายก็สามารถแตกเป็นต้นใหม่ได้ ทนทานต่อความแห้งแล้ง น้ำท่วม โรค และแมลง หรือแม้แต่ถูกไฟเผา (วีระชัย ณ นคร, 2537) การนำหล้าแฝกมาใช้ประโยชน์ทางด้านรักษาคุณภาพน้ำ และแหล่งน้ำ โดยนำหน่อหล้าแฝกมาปลูกรอบ ๆ บริเวณด้านข้างของแหล่งน้ำ หล้าแฝกจะมีการเจริญเติบโตแตกหน่ออย่างรวดเร็วเป็นกอชิดกันแน่นเป็นแนวรั้วแฝกที่หนาแน่นและถาวร ซึ่งจะช่วยกรองเศษพืชตะกอนดินรวมทั้งสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ มิให้ไหลลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้รากหล้าแฝกซึ่งมีจำนวนมากสานกันอย่างแน่นเป็นกำแพงใต้ดิน จะช่วยในการดูดซับสารเคมีก่อนที่จะไหลลงสู่แหล่งน้ำได้อีกด้วยช่วยให้แหล่งน้ำต่าง ๆ มีคุณภาพที่ดีขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

การใช้ประโยชน์ของหล้าแฝกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

หล้าแฝกสามารถดูดซับธาตุอาหาร และโลหะหนัก (แมงกานีส สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิลและโครเมียม) จากน้ำเสียได้ดี โดยหล้าแฝกมีการสะสมสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัสและโลหะหนักไว้ที่รากและลำต้น และยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอสร้อยละ

25-35 (จิตติณัฐ ศักรานุกิจ, 2549) นอกจากนี้หญ้าแฝกซึ่งมีระบบรากที่แข็งแรงและยาว ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และมีความคงทนต่อสภาพความเค็มได้ดี (Klomjek et al., 2005; Iamchaturapatr et al., 2006) จากผลการศึกษาของ Yang et al. (2003) นำหญ้าแฝกมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมพบว่าหญ้าแฝกมีการสะสมโลหะหนักไว้ที่ส่วนรากและยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีอีกด้วย และผลงานวิจัยของ Kong et al. (2009) ทำการศึกษาการกำจัดมลสารในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยกลไกการปล่อยเอนไซม์ของพืช พบว่าหญ้าแฝกมีการปล่อยเอนไซม์ที่สามารถย่อยฟอสฟอรัสได้ และยังมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียไนโตรเจน และซีโอดีในน้ำเสียได้อีกด้วย

2) ต้นอ้อ

ชื่อพื้นเมือง : หญ้าแฉม (ปราจีนบุรี) หญ้าลาโพ (ตรัง)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Phragmites* spp.

ชื่อวงศ์ : GRAMINEAE

ชื่อสามัญ : Common reed. Flute reed

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นอ้อ

พบในที่น้ำท่วม ลำต้นกลวง ตั้งตรง มีความสูงประมาณ 2.5-3.5 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 1.0-1.5 เซนติเมตร มีลำต้นใต้ดิน (Rhizome) ที่แข็งแรง ใบเป็นแบบใบหอก (Lanceolate) ใบเรียวยาวไปทีปลายใบ (Acuminate) ใบยาว 30-50 เซนติเมตร กว้าง 2.5-3.0 เซนติเมตร แผ่นใบมีริ้ว ใบเรียบ ขอบใบมีรอยหยักขนครุย (ciliate) และสาวมือ ลิ้นใบ (Ligule) เป็นแผ่นขอบลู่เป็นเส้น (Membranous Frayed) ยาวประมาณ 1.0 มิลลิเมตร มีหูใบ (Auricle) กาบใบเรียบสีเขียวเข้ม ยาว 12.0-25.0 เซนติเมตร เจริญเติบโตได้ดีในช่วงฤดูร้อน (The US. Department of Agriculture, 2005)

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อของต้นอ้ออยู่ในช่วงร้อยละ 0.2-0.3 (Reddy, 1987) มีอัตราการนำฟอสฟอรัสไปใช้ 0.0035 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อปี และมีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 0.01-0.06 ต้นต่อตารางเมตรต่อปี (US.EPA, 1993)

การใช้ประโยชน์ของต้นอ้อ

เป็นแหล่งอาหารสัตว์ตามธรรมชาติสำหรับแพะเล็มของโค กระบือ และสัตว์ป่า เนื่องจากอุดมไปด้วยธาตุอาหาร ได้แก่ ส่วนใบและยอดอ่อน มีโปรตีนร้อยละ 11.97

แคลเซียมร้อยละ 0.33 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.23 โปแตสเซียมร้อยละ 1.8 เยื่อใยส่วน ADF ร้อยละ 34.7 NDF ร้อยละ 64.4 แทนนินร้อยละ 0.13 และลิกนินร้อยละ 5.45

การใช้ประโยชน์ของต้นอ้อในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ต้นอ้อเป็นพืชที่นิยมนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อย่างแพร่หลาย เพราะมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี ซีโอดี ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน ของแข็งแขวนลอย โลหะหนัก และสีฟอกย้อม (Bulc and Ojstrsek, 2008) ต้นอ้อสามารถสะสมธาตุอาหารจำพวกสารอินทรีย์คาร์บอนจากน้ำเสียชุมชนไว้ในเนื้อเยื่อทั้งส่วนที่เป็นรากและลำต้นได้อีกด้วย (Edwards et al., 2006) จากการศึกษาของ Drizo et al. (1997) พบว่าต้นอ้อสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงถึงร้อยละ 98-100 และไนโตรเจนร้อยละ 85-98 นอกจากนี้ต้นอ้อยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Bragato et al. (2006) ได้นำต้นอ้อมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยโลหะหนักที่นำมาศึกษา ได้แก่ โครเมียม นิกเกิล ทองแดงและสังกะสี พบว่าต้นอ้อมีการสะสมโลหะหนักไว้ที่ส่วนเนื้อเยื่อของลำต้น (shoot) เป็นส่วนใหญ่ Kong et al. (2009) ศึกษาการกำจัดมลสารในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยกลไกการปล่อยเอนไซม์ของพืช พบว่าต้นอ้อมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยฟอสฟอรัสได้ มีชื่อว่า เอนไซม์ phosphatase และยังมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมไนโตรเจน และซีโอดีในน้ำเสียได้อีกด้วย และมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว ต้นอ้อมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 2-8 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 12-33 องศาเซลเซียส และมีความสามารถทนความเค็มได้น้อยกว่า 45 พีพีที (ppt) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; Brix, 1997)

3) รูปถ่าย

ชื่อพื้นเมือง : กกรูป รูปถ่าย เพื่อ (ภาคกลาง) ปรีอ (ภาคใต้)
หญ้าน้ำสาบหลวง (ภาคเหนือ)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *typha* spp.

ชื่อวงศ์ : TYPHACEAE

ชื่อสามัญ : Cat-tail Elephant Grass Lesser Reedmace

Narrow-leaved Cat-tial

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของรูปถ่าย

เป็นไม้ล้มลุก 2 ปี เหง้ากลม แทงหน่อขึ้นเป็นระยะสั้น ๆ ใบเดี่ยวเรียงสลับระนาบเดียว รูปแถบยาวประมาณ 2 เมตร แผ่นใบด้านบนโค้งเล็กน้อย ส่วนด้านล่างแบน ช่อดอกแบบช่อเชิงลด ดอกมีจำนวนมากติดกันแน่น สีน้ำตาลลักษณะคล้ายรูปดอกใหญ่ ก้านช่อดอกกลมแข็ง ดอกแยกเพศแบ่งเป็นตอนชัดเจน กลุ่มดอกเพศผู้อยู่ปลายก้าน รูปทรงกระบอก กลุ่มดอกเพศเมียรูปทรงกระบอกเช่นกันแต่ใหญ่กว่ากลุ่มดอกเพศผู้ ดอกแก่จะแตกเห็นเป็นขนขาวฟู ผลเล็ก

มากเมื่อแก่จะแตกตามยาว สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 4-10 มีความสามารถทนความเค็มได้น้อยกว่า 1 พีพีที รากมีความลึกเท่ากับ 0.30 เมตร และสามารถให้ออกซิเจนได้เท่ากับ 7.00 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (US.EPA, 1993)

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อของรูปถาวยี่ร้อยละ 30 (เกรียงศักดิ์อุดมสินโรจน์, 2547) มีอัตราการนำฟอสฟอรัสไปใช้อยู่ในช่วง 0.0075-0.0403 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อปีและมีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 0.0008-0.0061 ต้นต่อตารางเมตรต่อปี (US.EPA, 1993)

การใช้ประโยชน์ของรูปถาวยี่

ใบยาวและเหนียวนิยมใช้ทำเป็นเครื่องจักรสาน เช่น เสื่อ ตะกร้า ใช้มุงหลังคา และทำเชือก ดอกแก่จัดมีขนปุยและนุ่มมือคล้ายปุยนุ่นจึงนิยมนำมาใช้แทนปุยนุ่น ยอดอ่อนกินได้ทั้งสดและทำให้สุก ช่อดอกบึงกินได้ แบ่งที่ได้จากลำต้นใต้ดินและรากใช้บริโภคได้เช่นกัน ในอินเดียใช้ก้านดอกช่อทำปากกา และเชื่อว่าลำต้นใต้ดินและรากใช้เป็นยาบำบัดโรคบางชนิด เช่น ขับปัสสาวะ เยื่อ (Pulp) ของต้นนำมาใช้ทำใยเทียม (Rayon) และกระดาษได้ เพราะมีเส้นใย (Fiber) ถึงร้อยละ 40 เส้นใยนี้มีความชื้นร้อยละ 8.9 เซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 63 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ร้อยละ 8.7 ลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 9.6 ไข (Wax) ร้อยละ 1.4 และเถ้า (Ash) ร้อยละ 2 เส้นมีสีขาวหรือสีน้ำตาลอ่อน นำมาทอเป็นผ้าใช้แทนผ้าฝ้ายหรือขนสัตว์

การใช้ประโยชน์ของรูปถาวยี่ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

รูปถาวยี่เป็นพืชที่ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็ม และพีเอชอยู่ในช่วง 4-10 และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 16-27 องศาเซลเซียส (Brix, 1997; Klomjek, 2005) และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 66.9 (Akratos et al., 2007) รวมไปถึงการกำจัดโลหะหนักอีกด้วย Sasmaz et al. (2008) ได้นำรูปถาวยี่มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำพบว่ารูปถาวยี่จะมีการสะสมโลหะหนักไว้ที่เนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ เช่น ที่บริเวณรากมีการสะสมแคดเมียมไว้ดีกว่าส่วนอื่น ส่วนที่ใบมีการสะสมของสังกะสี และนอกจากนั้นรูปถาวยี่ยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังอีกด้วย (Calheiros et al., 2009)

2.2.2.2 จุลินทรีย์ (Microbial Organisms)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะสร้างสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์เจริญเติบโต ซึ่งจุลินทรีย์ที่พบได้โดยทั่วไปในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย โปรโตซัว และจุลินทรีย์จำพวกที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น จุลินทรีย์ Nitrifying เป็นต้น โดยจะยึดติดกับพื้นผิวของ

ส่วนที่อยู่ใต้น้ำของพืช (ราก ลำต้น) ซากพืช รุพุนของตัวกลาง หรือชั้นตะกอนที่อยู่ล่างสุด จุลินทรีย์เหล่านี้จะเปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหารและพลังงาน เพื่อดำเนินวงจรชีวิต และยังมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากทำให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ คือ การดูดซึม การเปลี่ยนรูปและการหมุนเวียนของสารในน้ำเสีย

2.2.2.3 ตัวกลาง (Media Substrate)

ชั้นตัวกลางที่เลือกนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ คือ หิน กรวด ทราย และดิน ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไปโดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใดหรือใช้รวมกันก็ได้ (US.EPA, 2000) ช่องว่างในชั้นตัวกลางเหล่านี้จะใช้เป็นช่องทางการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นอกจากนี้จะเป็นที่อยู่ของพืชและที่ยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์แล้วชั้นตัวกลางยังเป็นพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่าง ๆ ด้วย ลักษณะทางกายภาพของชั้นกรองมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ชั้นกรองที่เป็นทรายหรือกรวดนิยมนำมาใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย เพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบ และพืชสามารถยึดเกาะได้ (Vymazal et al., 2002) นอกจากนี้ปัจจัยในการเลือกใช้ตัวกลางยังต้องคำนึงถึงค่าความพรุน และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Akratos et al., 2006) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นชนิดของตัวกลางที่นิยมใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั่วไป บริเวณของชั้นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ตามปริมาณออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังต่อไปนี้

บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ บริเวณนี้ น้ำเสียสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้

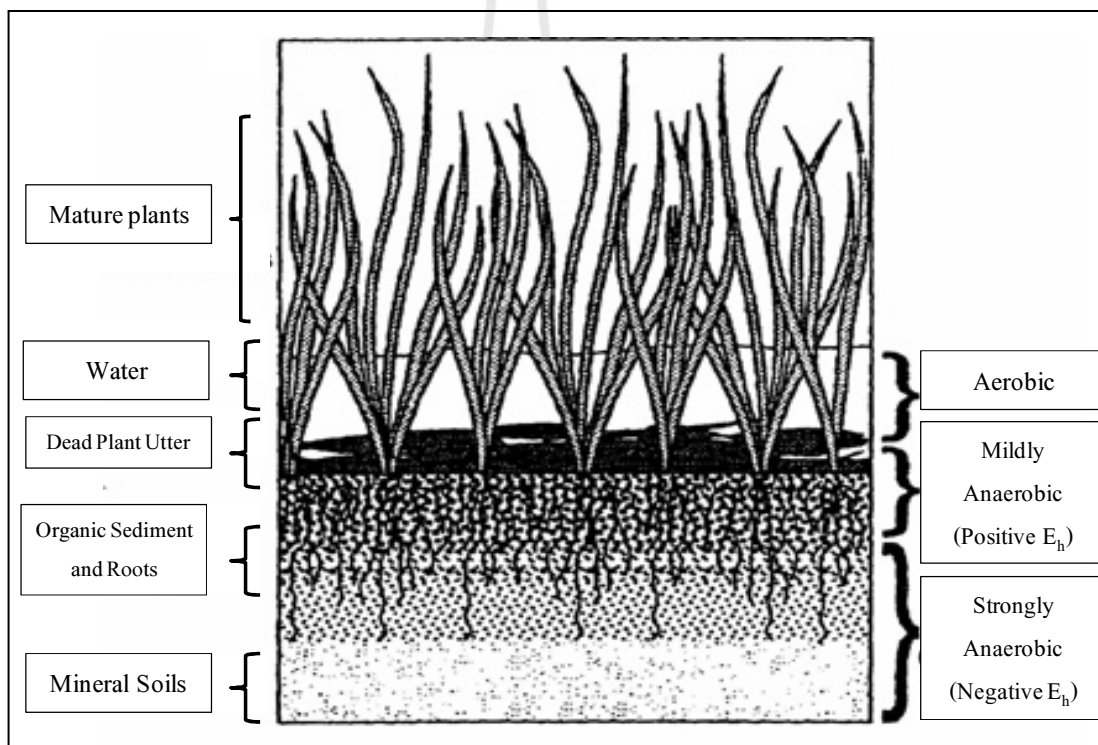
บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Mildly Anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อยเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตามระบบรากของพืชที่ยึดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ชั้นตัวกลางได้บางส่วน

บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly Anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นสุดท้ายหรือล่างสุดของชั้นตัวกลาง และในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้อากาศ

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของตัวกลางที่ใช้สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดตัวกลาง (mm.)	ค่าความพรุน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (m d ⁻¹)
ทรายหยาบ	2	0.28-0.32	100-1000
หินทราย	8	0.30-0.35	500-5000
หินเล็ก	16	0.35-0.38	1000-10000
หินกลาง	32	0.36-0.40	10000-50000
หินใหญ่	128	0.38-0.45	50000-250000

หมายเหตุ : US.EPA (1993); Brix (1997); Pi'riz et al. (2000)



รูปที่ 2.5 ชั้นของตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Kadlec and Knight, 1996)

Cooper et al. (1996) ได้แนะนำว่าตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกพืชประเภทอ้อ ควรมีความลึก 80 เซนติเมตร และชั้นบนเป็นทรายหยาบ 10 เซนติเมตร และจากการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษและสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (2548) ได้มีการกำหนดชั้นกรองสูงเท่ากับ 65 เซนติเมตร เนื่องจากความยาวของรากพืชจำพวกธูปฤาษี มีความยาวอยู่ในช่วง 30-40 เซนติเมตร ซึ่งสั้นกว่าความยาวของรากพืชพวกอ้อ (50-60 เซนติเมตร) โดยในแบบจำลองแต่ละบ่อของการศึกษาจะประกอบไปด้วยชั้นของทรายละเอียดสูง 10 เซนติเมตร ชั้นของกรวดขนาดเล็กสูง 15 เซนติเมตร และชั้นของกรวดขนาดใหญ่สูง 40 เซนติเมตร เรียงจากชั้นบนลงไปชั้นล่าง และเหลือพื้นที่ว่างเหนือผิวชั้นกรอง 1 เมตร สำหรับใช้เป็นที่เก็บตะกอนของเสียที่ถูกรีดน้ำออกแล้ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าความลึกของชั้นกรองที่กำหนดในการออกแบบระบบจะแปรผันกับความยาวของรากพืช

1) หน้าที่ของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

หน้าที่ของตัวกลางเป็นที่สำหรับให้รากของพืชที่ปลูกในระบบยึดเกาะ ช่วยให้เกิดการกระจายของน้ำเสียที่เข้าระบบและช่วยรวบรวมน้ำที่ก่อก่อนระบายออก เป็นที่สำหรับให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ และสำหรับใช้กรองสารแขวนลอยต่าง ๆ ที่เข้ามาพร้อมกับน้ำเสียรวมไปถึงเชื้อโรคต่าง ๆ (US.EPA, 2000)

2) ชนิดของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ชนิดของตัวกลางที่เลือกนำมาใช้ในพื้นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ คือ หิน กรวด ทรายและดิน ซึ่งสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูก (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547)

ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นมีบทบาทสำคัญในการช่วยกำจัดสารอาหาร โดยเฉพาะฟอสฟอรัส อาจจะเป็นกลไกในการกำจัดโดยการตรึงหรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดซับและการตกตะกอน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของตัวกลางชนิดนั้น ๆ (Zhu et al., 1997) เช่น วัสดุนั้นอาจจะประกอบด้วยแร่ที่เป็นพวกสารประกอบเหล็ก อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ หรือมีหมู่ของออกไซด์บนพื้นผิวของตัวกลางนั้น หรืออาจเป็นวัสดุพวก Calcareous ที่สามารถทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตได้ (Drizo et al., 1997; Zhu et al., 1997) ซึ่งอัตราการดูดซับระหว่างแร่ธาตุที่อยู่บนผิวของตัวกลางกับฟอสเฟต จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าพีเอช Redox Potential อุณหภูมิ ขนาดความพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับของตัวกลางนั้น ๆ ซึ่งตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะมีความสามารถในการดูดซับได้มากเช่นกัน และชนิดของตัวกลาง (Vaymazal et al., 1998)

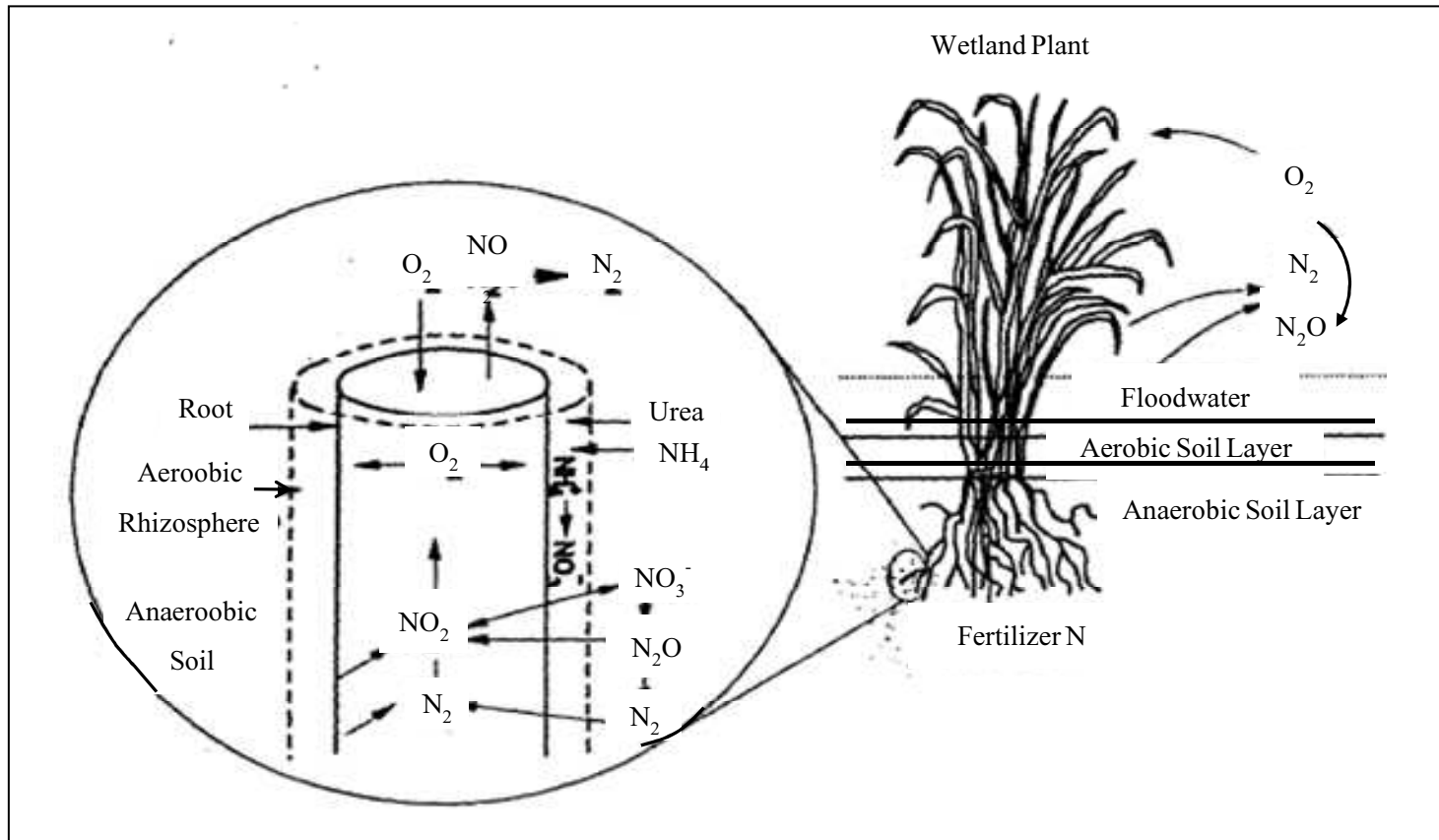
จากการที่หิน กรวด ททราย และดิน มีข้อจำกัดในด้านความสามารถในการดูดซับสารอาหารได้น้อย และเกิดการอุดตันของระบบเร็ว ดังนั้นจึงได้มีการศึกษานำเอาวัสดุชนิดอื่น มาใช้เป็นตัวกลางเพื่อดูดซับสารอาหารให้คงอยู่ในระบบได้นาน ซึ่งตัวกลางที่ใช้ในการดูดซับนี้มีผลต่อช่วงอายุของระบบ ถ้าเกิดชั้นกรองหรือตัวกลางในระบบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวในการดูดซับ ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าโดยทั่วไปแล้วช่วงอายุของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กรวดและทรายเป็นตัวกลางจะมีช่วงอายุระหว่าง 2-5 ปี (Zhu et al., 1997; Vaymazal et al., 1998) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่สนับสนุนการกำจัดฟอสฟอรัส (Kadlec and Knight, 1996; Gray et al., 2000; Bubba et al., 2003; Forbes et al., 2005) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าดินจึงมีโอกาสเกิดการอุดตันน้อยกว่า และผลการศึกษาคาดการณ์ว่าหินดินดานมีอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี (Drizo et al., 1997; 1999; 2000; Daothaisong and Yimrattanabovorn, 2008)

2.2.2.4 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีแหล่งกำเนิดมาจากการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer) จากบรรยากาศสู่น้ำและการดึงออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเกิดขึ้นที่ใบพืชผ่านไปยังก้านพืช และเข้าสู่ระบบรากพืช ในส่วนของตัวกลางซึ่งสัมผัสกับรากและไรโซมสามารถเกิดทั้งสภาวะแอโรบิกและแอนแอโรบิกได้ (Reed et al., 1988) ออกซิเจนจากรากจะถูกถ่ายออกสู่บริเวณรอบ ๆ ราก (Root Zone) ทำให้เกิดสภาวะแอโรบิก ดังนั้นสภาวะแอโรบิกและสภาวะแอนแอโรบิกจึงเป็นส่วนประกอบของชั้นตัวกลาง Reed et al. (1988) ได้รายงานว่าพืชโพล์พื้นที่ชุ่มน้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนจากพื้นผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ 5-45 กรัมออกซิเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับความเค็มของดิน (Soil Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

2.2.2.5 อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อการทำงานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น ถ้ามีอุณหภูมิสูง การระเหยและการคายน้ำของพืชจะมากทำให้ความเข้มข้นของมลสารเพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำมากจนทำให้น้ำเป็นน้ำแข็ง กรณีอุณหภูมิสูงอาจทำให้การบำบัดเป็นไปได้ไม่ดีเพราะความร้อนจะทำลายพืชบางชนิดหรือเพิ่มอัตราการย่อยสลายอาหารของแบคทีเรีย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2538) ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชและจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์



รูปที่ 2.6 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์ (US.EPA., 2000)

2.2.2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอชมีผลต่อลักษณะทางเคมีของน้ำและสิ่งมีชีวิตในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์ เนื่องจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการชีววิทยาจะเกิดในช่วงพีเอชที่จำกัด นอกจากนี้พีเอชยังเป็นสิ่งสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ด้วย โดยเฉพาะกลไกในการจำกัดฟอสฟอรัสที่เกิดการดูดซับกับองค์ประกอบธาตุของตัวกลาง เช่น อะลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งตกตะกอนดีที่สุดในช่วงพีเอช 6.3 (Kadlec and Knight, 2006) ค่าพีเอชมีผลต่อรูปของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำโดยในช่วงพีเอช 0-2 จะพบในรูป H_3PO_4 ช่วงพีเอช 2-7 จะพบในรูป $H_2PO_4^-$ ช่วงพีเอช 7-12 จะพบในรูป HPO_4^{2-} และช่วงพีเอช 12-14 จะพบในรูป PO_4^{3-} (Sawyer et al., 2003) ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อยู่ในช่วง 3-10 (US.EPA., 2000) และจากการศึกษาของอมราวาดูไรตง (2550) ศึกษาพบว่าดินดานมีความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่พีเอชมากกว่า 6

2.3 กลไกในการกำจัดมลสารในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาศัยกลไกทางกายภาพ เคมีและชีวภาพในการกำจัดมลสาร ดังแสดงในตารางที่ 2.4 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 สรุปกลไกในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

มลสาร	กลไกการบำบัด
สารอินทรีย์	<ul style="list-style-type: none"> - การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Microbial Degradation) - การตกตะกอน (Sedimentation)
ของแข็งแขวนลอย	<ul style="list-style-type: none"> - การตกตะกอน (Sedimentation) - การกรอง (Filtration)
ไนโตรเจน	<ul style="list-style-type: none"> - แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) - ไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ - การสะสมในพืช (Plant uptake)
ฟอสฟอรัส	<ul style="list-style-type: none"> - การดูดซับในตัวกลาง (Adsorption) โดยการตกตะกอนผลึก - การสะสมในพืช
เชื้อโรค	<ul style="list-style-type: none"> - การตกตะกอน (Sedimentation) - การกรอง (Filtration) - การตายตามธรรมชาติ (Natural Die-off) - รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Radiation) - การปล่อยสารปฏิชีวนะจากรากพืช

หมายเหตุ : กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ (2544)

2.3.1 สารอินทรีย์

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืช และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งการกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิบัติการบำบัดสำหรับกรณีที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง โดยออกซิเจนสามารถถ่ายเทผ่านได้ง่าย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544; Kadlec and Knight, 1996)

2.3.2 ของแข็งแขวนลอย

โดยทั่วไปพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำหลายวัน การลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีผลมาจากกระบวนการที่ซับซ้อนหลายกระบวนการรวมถึงการเคลื่อนย้ายของของแข็งโดยสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย โดยเฉพาะเมื่อน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความเร็วของน้ำต่ำ มีพืชปกคลุม มีดินที่เหมาะสมจะช่วยให้การกรองและการตกตะกอน การกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นกระบวนการที่ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ระยะเวลาเก็บกักเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย หากมีระยะเวลาเก็บกักนานการไหลของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไหลค่อนข้างช้า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทางกายภาพของของแข็งแขวนลอย นอกจากนี้ความหนาแน่นของพืชจะเพิ่มการจมตัวของของแข็งแขวนลอยโดยการตกตะกอน เนื่องจากพืชจะจับของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นผิวดินที่มีการสะสมของซากพืชและซากสัตว์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินสามารถกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กผ่านชั้นของผิวดิน ซึ่งช่วยป้องกันการปนออกมานอกระบบของของแข็งแขวนลอย (Kadlec and Knight, 1996; US.EPA, 2000)

2.3.3 ไนโตรเจน

การกำจัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีหลายกลไก คือ การนำไปใช้โดยพืช การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนในดิน การระเหยในรูปของแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งการบำบัดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ เช่น แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่มีออกซิเจน และไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน โดยออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันมาจากทั้งการถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ และที่ซึมผ่านจากรากพืช (กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ, 2544; Gottschall et al., 2007) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนซึ่งจะเกิดในชั้นออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของตัวกลางหรือผิวน้ำของรากฝอยเรียกว่า Root zone effect ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดสภาวะมีออกซิเจน (Kadleck and Knight, 2006) และส่วนของพืชที่จมอยู่ใต้ตัวกลางนั้น สารอินทรีย์ในโตรเจนจะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของชั้นตัวกลาง โดยที่ชั้นของการออกซิไดซ์และส่วนที่อยู่ใต้ตัวกลางของพืชเป็นตำแหน่งสำคัญสำหรับไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ที่แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรียและเปลี่ยนเป็นไนเตรทในที่สุดโดยแบคทีเรีย ที่ระดับพีเอชสูงแอมโมเนียจะอยู่ในรูปก๊าซแอมโมเนีย และสูญหายไปในบรรยากาศโดยกระบวนการระเหย ไนเตรทในชั้นรีดิวซ์จะลดลงโดยผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การกรองและบางส่วนถูกพืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป (วิทิต ขอสันติวิวัฒน์, 2545)

2.3.4 เชื้อโรค

การกำจัดเชื้อโรคด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เกิดจากการตายลงเองตามธรรมชาติ การล่า การตกตะกอน การตายที่เกิดเองตามธรรมชาติเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการขยายพันธุ์ของเชื้อโรค เป็นต้น และจะถูกกำจัดเมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางและพืชโดยอาศัยกลไกการกรอง การดูดซับ การตกตะกอน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548; US.EPA., 2000)

2.3.5 ฟอสฟอรัส

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง การย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการดูดซึมโดยพืช ซึ่งส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวกลาง โดยการทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมที่ประกอบอยู่ในตัวกลาง (Zhu et al., 1997; Bubba et al., 2003) ซึ่งฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางตามลำดับความแรงของชั้นอิเล็กตรอน ดังนี้ $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ (Wu et al., 2006) จากนั้นพืชจะดูดซึมผ่านทางราก และ

นำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป โดยเมื่อฟอสฟอรัสยึดติดกับตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว จากนั้นจะเกิดการดูดซับและตกตะกอนผลึก โดยความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของของตัวกลางชนิดนั้น ๆ ฟอสฟอรัสประมาณร้อยละ 10-20 จะถูกดูดซึมโดยพีชและแบคทีเรีย ซึ่งพีชจะมีความต้องการฟอสฟอรัสในปริมาณมากในช่วงของฤดูกาลเจริญเติบโตของพีช และจะมีฟอสฟอรัสหมุนกลับเวียนใช้มาใหม่เมื่อพีชนั้นตายลง เกิดการทับถมฟอสฟอรัสในดินต่อไป และการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ของพีชจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ (Vymazal et al., 2001) ฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในตัวกลางส่วนใหญ่จะถูกสะสมในรูปสารอนินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งเป็นรูปที่พีชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ทันที (Kvamström et al., 2004) โดยรูปถ่ายิยะสะสมฟอสฟอรัสได้ 0.5-4 กรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมของพีช ดินออสสะสมฟอสฟอรัสได้ 2-3 กรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมของพีชและหญ้าทรงกระเทียมสะสมฟอสฟอรัสได้ 1-3 กรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมของพีช (US.EPA., 1993) จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดของฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีส่วนประกอบที่สำคัญหลายอย่างได้แก่ น้ำ พีช สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก อนุภาคต่าง ๆ ในระบบ และตัวกลางฟอสฟอรัสตามธรรมชาติที่เข้าสู่ระบบมาจากน้ำที่เข้าสู่ระบบทั้งในรูปสารละลายและรูปของแข็ง ส่วนฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจะปนไปกับน้ำออก และซึมลงไปสะสมในชั้นตัวกลางและชั้นตะกอน ฟอสฟอรัสบางส่วนระเหยไปในอากาศ รวมไปถึงการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ของพีชและจุลินทรีย์ (US.EPA., 2000)

2.4 การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดิน

โดยทั่วไปในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จะพยายามทำให้เสมือนเป็นบึงธรรมชาติ กระบวนการต่าง ๆ ภายในระบบเป็นสิ่งที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยการออกแบบจะออกแบบให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา ใช้พลังงานจากธรรมชาติ สามารถรองรับสภาพอากาศแปรปรวนได้ สามารถรองรับการต่อขยายได้ในอนาคต มีรูปแบบอื่น ๆ ที่สามารถปรับและประยุกต์ใช้งานได้ เกณฑ์พิจารณาของค่าตัวแปรในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประกอบไปด้วย

2.4.1 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อวัน เช่น ค่าบีโอดี เป็นกิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์ต่อวัน เป็นมวลของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่อหน่วยพื้นที่ผิวของระบบต่อหน่วยวัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียและขนาดของพื้นที่ที่ต้องใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

สูงสุดจะขึ้นอยู่กับอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของรากพืชซึ่งมีค่าประมาณ 20 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน (Reed et al., 1988)

2.4.2 อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)

อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์มีหน่วยเป็นปริมาณน้ำที่ถูกบำบัดต่อพื้นที่ต่อเวลา ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องอย่างกับประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

2.4.3 ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT)

ระยะเวลาการกักเก็บเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมระบบประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ซึ่งจะส่งผลถึงการเจริญเติบโตของพืชและจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

2.4.4 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ

มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล ค่าความพรุน อัตราการย่อยสลายฟอสฟอรัส และขนาดของตัวกลาง

2.4.5 ขนาดของตัวกลาง

มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึม (เมตรต่อวัน) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของระบบหากตัวกลางมีค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมต่ำอายุการใช้งานของระบบจะลดลง และยังเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสอีกด้วย

2.4.6 ค่าความพรุน

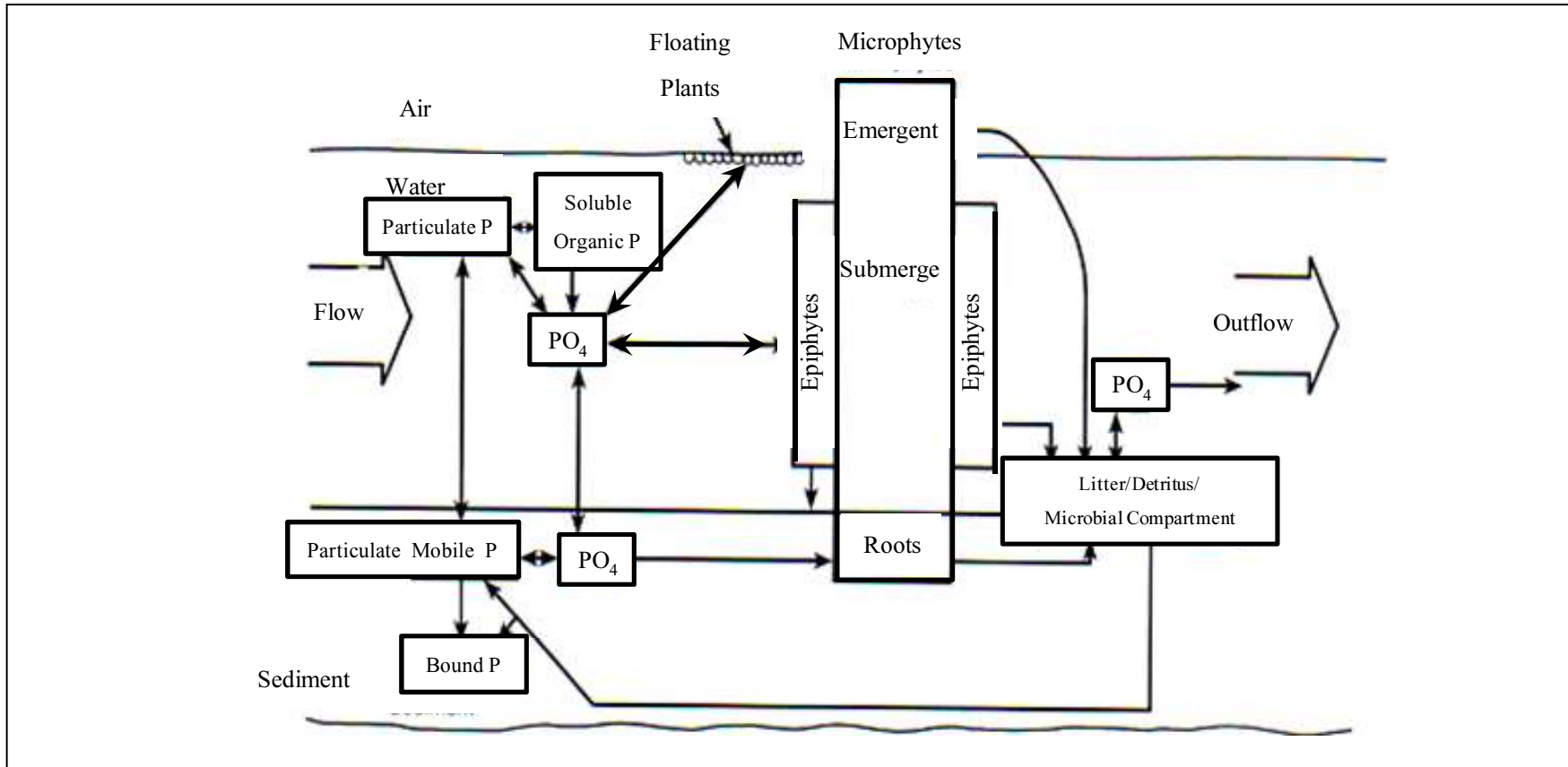
มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบหากตัวกลางที่เลือกใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าความพรุนสูงประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงด้วย และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยลงเมื่อเทียบกับตัวกลางที่มีค่าความพรุนต่ำ

2.4.7 อัตราการย่อยสลายฟอสฟอรัส

มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวัน มีความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส หากระบบมีอัตราการย่อยสลายช้าจะใช้พื้นที่มาก และนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการอุดตันของระบบ เพราะกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดการตกตะกอนและดูดซับที่ตัวกลาง

2.4.8 ปัจจัยสถานะแวดล้อม (อุทกวิทยาและสภาพอากาศ)

เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบโดยตรงแต่มีผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืชและการดำรงชีพของจุลินทรีย์ในระบบ เช่น ปริมาณน้ำฝน การซึมการระเหยและการใช้น้ำของพืช กระแสลมที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายให้แก่พืชในระบบได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการปฏิกิริยาต่าง ๆ ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพ



รูปที่ 2.7 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (US.EPA., 2000)

2.5 หินดินดาน (Shale)

หินดินดาน (Shale) หมายถึง หินชั้นหรือหินตะกอนที่เกิดจากการเรียงตัวหรือสะสมของดินตะกอน (Silt) และแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) เป็นส่วนใหญ่ ถูกอัดตัวด้วยแรงดันผนวกกับเวลาที่ยาวนานจึงแข็งเป็นหิน ส่วนใหญ่แร่ดินนี้ เป็นสารผสมของอะลูมิเนียม ซิลิกอนและเหล็ก ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และคุณสมบัติมีสีเทาผสมสีแดง เนื่องจากแร่เหล็กปฏิกิริยากับน้ำแล้วเหนียวติดมือ โดยทั่วไปสภาพธรณีวิทยาของแหล่งหินดินดาน โดยปกติเกิดเป็นชั้น ๆ มักจะมีชั้นหินประเภทอื่น ๆ แทรกสลับอยู่ด้วย เช่น หินทราย (Sandstone) หินทรายแป้ง (Siltstone) หรือหินปูน (Limestone) หินดินดานมีทรายปะปนอยู่มาก เรียก Arenaceous หากมีดินเหนียวปะปนอยู่มาก เรียก Argillaceous แต่หากมีอินทรีย์วัตถุปะปนมาก เรียก Carbonaceous และหากมีหินปูนปะปน เรียก Calcareous หินดินดานมักเป็นแหล่งสะสมของปิโตรเลียมหรือถ่านหิน (Coal) ย่างไฟแล้วให้น้ำมัน และเมื่อนำไปกลั่นจะได้น้ำมันคุณภาพต่าง ๆ กัน จึงเรียกหินดินดานนั้นว่าหินน้ำมัน (Oil shale) (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) ส่วนประกอบทั่วไปทางเคมีของหินดินดาน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งองค์ประกอบหลักของหินดินดานจะประกอบไปด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4-5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	Martin Marietta (2004)	เสรีวัฒน์ สมิทร์ปัญญา (2538)	อมรา ดาว ไชสง (2550)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	58-60	58.10	54.42
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	14-16	15.40	11.49
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	4-5	4.02	4.68
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	2-3	2.45	2.30
แมกนีเซียออกไซด์ (MgO)	2-3	2.44	2.00
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	3-4	3.11	10.97
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1-2	1.30	0.38
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	3-4	3.24	1.79

2.5.1 ปริมาณและแหล่งหินดินดานในประเทศไทย

แหล่งหินดินดาน มักจะพบอยู่ไม่ไกลจากแหล่งหินปูน เพราะในยุคที่มีการเกิดหินปูน เช่น ยุคเพอร์เมียน (Permian) ยุคออร์โดวิเซียน (Ordovician) หรือยุคไทรแอสสิก-จูแรสสิก (Triassic-Jurassic) ก็ตามจะมีการเปลี่ยน โคมตะกอนที่ตกในท้องทะเล (Facies Change) ระหว่างตะกอนปูนกับตะกอนทรายอยู่เสมอ ดังนั้น ในลำดับชั้นหิน (Stratigraphic Succession) ของยุคดังกล่าวจะพบบางตอนเป็นช่วงของหินปูนล้วน ๆ บางตอนเป็นช่วงของหินดินดานล้วน ๆ หรือบางช่วงเป็นชั้นหินปูนและหินดินดานสลับกัน แหล่งของหินดินดานในประเทศไทย ในภาคกลางมีแหล่งผลิตที่จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี ราชบุรี ส่วนภาคใต้มีแหล่งผลิตที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และสงขลา ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ใกล้กับโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตหินดินดานเป็นการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศเท่านั้น ดังนั้นปริมาณการผลิตหินดินดานจึงสอดคล้องกับปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ภายในประเทศเช่นกัน ซึ่งปริมาณและมูลค่าการผลิตพร้อมทั้งการใช้หินดินดานของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544-2549 แสดงในตารางที่ 2.6 ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2544-2549) โดยในปี 2545 มีปริมาณการใช้หินดินดานมากที่สุด 6.20 ล้านเมตริกตัน มูลค่า 556.10 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 32.80 ของปริมาณการผลิตในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 98.06 เทียบกับปี 2544 รองลงมาได้แก่ ปี 2542 ปริมาณการใช้ 3.2 ล้านเมตริกตัน มูลค่า 288.40 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 16.93 ของปริมาณการใช้ในช่วงปี 2544-2549

2.5.2 การใช้ประโยชน์หินดินดาน

การใช้ประโยชน์หินดินดานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.5.2.1 อุตสาหกรรมการถลุงปิโตรเลียม

หินดินดานมีคุณสมบัติที่สามารถถลุงให้ปิโตรเลียมเหลวและแก๊สได้จะเรียกว่า หินน้ำมัน (Oil Shale) โดยคุณสมบัติของหินน้ำมันจะมีสีน้ำตาลไหม้ถึงดำ แข็งและเหนียว มีความถ่วงจำเพาะต่ำ มีอัตราส่วนของสารอินทรีย์ต่อสารอนินทรีย์ ไม่เกิน 1 : 4 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำกว่าถ่านหิน สีของหินน้ำมันอาจมีสีเขียวออกน้ำตาล เมื่อเอาไฟลนจะได้กลิ่นน้ำมันระเหยออกมา ตัวอย่างที่พบจากการสำรวจหินน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.6-2.8 ยังมีความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีคุณภาพดี หินน้ำมันที่น่าสนใจในเชิงพาณิชย์นั้นควรให้น้ำมันมากกว่า 10-15 แกลลอนต่อหนึ่งตันหิน (น้ำมันที่สกัดได้มีคุณสมบัติและลักษณะเช่นเดียวกับน้ำมันดิบ) หินน้ำมันเกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์จำพวกพืชและสัตว์ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยเวลานับล้านปี โดยอินทรีย์สารเหล่านั้นถูกเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่เรียกว่า เคอโรเจน ซึ่งผสมคลุกเคล้ากับตะกอนกลายเป็นหินน้ำมัน (วิวัฒน์ ไตริภกุล, 2547) แหล่งหินน้ำมันกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโลกและพบทุกช่วงอายุทางธรณีวิทยา บางแหล่งเกิดขึ้นเมื่อ 500 ล้านปีก่อน ในขณะที่บางแหล่งเพิ่งเกิด

ขึ้นมาเมื่อประมาณ 25 ล้านปี แหล่งหินน้ำมันขนาดใหญ่พบที่สหรัฐอเมริกา บราซิล แคนาดา อิตาลี และสาธารณรัฐประชาชนจีน แหล่งขนาดกลางพบในประเทศไทย อาร์เจนตินา ออสเตรเลีย ฝรั่งเศส บุลกาเรีย และนิวซีแลนด์ แหล่งหินน้ำมันขนาดเล็กพบได้ที่ออสเตรเลีย ซิลี อิสราเอล จอร์แดน มาร์ดากาสกา โปแลนด์ และตุรกี

2.5.2.2 อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

หินดินดานเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้ประมาณร้อยละ 15.18 ของวัตถุดิบทั้งหมด จึงนับได้ว่าหินดินดานที่ผลิตได้ในประเทศไทยเป็นการผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศเท่านั้น หินดินดานสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ มีปริมาณสำรองประมาณ 706.2 ล้านเมตริกตัน

2.5.2.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

นอกจากอุตสาหกรรม 2 ประเภทข้างต้น ยังมีการนำหินดินดานไปใช้ประโยชน์อีกด้านหนึ่งที่น่าสนใจ ก็นำไปใช้เป็นวัสดุอุดซบในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในโตรเจน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก และโลหะหนักชนิดต่าง ๆ และนอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจน และฟอสฟอรัสร้อยละ 70-100 ที่ช่วงพีเอช 6-10 (อมรา ดาวไชสง, 2550; Drizo et al., 1999)

ตารางที่ 2.6 ปริมาณและมูลค่าการผลิต การใช้หินดินดาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544-2549

ปี	การผลิต		การใช้	
	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2544	3364211	302.80	3183096	286.50
2545	5016774	451.50	6179167	556.10
2546	2981504	268.30	2641279	237.70
2547	3621631	326.0	3631565	326.80
2548	369500	332.6	3905637	351.5
2549	5589794	503.1	5486302	493.8

หมายเหตุ : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม (2548)

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.6.1 ความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ปัจจุบันมีการนำแบบจำลองมาใช้มาใช้ในการเดินระบบและในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อย่างแพร่หลายเพื่อเป็นประโยชน์ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ และช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม (US.EPA., 2000; Diederik et al., 2003; Park et al., 2008) แต่แบบจำลองที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบจำลองที่ยังไม่สมบูรณ์แบบเนื่องมาจากการขาดข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณลักษณะของน้ำเสียที่เหมาะสมกับแบบจำลอง หรือพารามิเตอร์ที่ต้องการกับที่แบบจำลองใช้อาจไม่ตรงกัน ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ขึ้นเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดที่กลไกในการกำจัดในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น ไม่สามารถระบุได้ว่ากลไกใดเป็นกลไกหลัก ซึ่งในการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากการทำงานของกลไกหลักหลายกลไกด้วยกัน ได้แก่ การย่อยสลายของจุลินทรีย์ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง และการดูดซึมและนำไปใช้โดยพืช เพราะการกำจัดมลสารนั้นต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของกลไกหลักอย่างน้อย 2-3 กลไก เช่น การดูดซับที่ตัวกลางและการนำไปใช้โดยพืชหรือจุลินทรีย์ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารยังขึ้นอยู่กับสภาพทางกายภาพ เคมี ชีวภาพของระบบ (Drizo et al., 1997; US.EPA, 2000; Kadlec and Knight, 2006)

การพัฒนาแบบจำลองจะเป็นการศึกษาในรูปแบบชุดจำลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในระบบจริง แต่อย่างไรก็ตามการนำแบบจำลองไปใช้จริงจะต้องมีความน่าเชื่อถือของชุดข้อมูลที่ทำการศึกษา รวมไปถึงการวิเคราะห์ข้อมูล แต่ทั้งนี้ผู้ที่นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ควรทำความเข้าใจในรายละเอียด เงื่อนไขของแบบจำลองให้ชัดเจน รวมไปถึงต้องทราบว่าแบบจำลองนั้นมีกลไกในการกำจัดมลสารอย่างไรในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อความถูกต้องในการนำไปใช้และประโยชน์ในการพัฒนาแบบจำลอง (US.EPA., 2000)

2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีทั้งแบบที่เป็นสมการพื้นฐานไปจนถึงสมการขั้นสูง ซึ่งการจะนำแบบจำลองใดมาใช้ขึ้นจะขึ้นกับข้อมูลที่ศึกษาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ หรือแม้กระทั่งสภาวะแวดล้อมที่ทำการศึกษา (US.EPA, 2000; Diederik, 2003) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้มีดังนี้

2.6.2.1 แบบจำลองหลักการพื้นฐาน (*Rules of thumb*) เป็นการใช้สมการหรือสูตรพื้นฐานของเกณฑ์การออกแบบมาใช้ในการทำนายผลต่าง ๆ จากการศึกษาของ Wood (1995); Kadlec and Knight (1996) ได้ศึกษารวบรวมเกณฑ์ในการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล

ได้ผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ได้ว่าค่าที่นำมาใช้ไม่มีการจำเพาะต่อสภาพภูมิอากาศ ประเภทของน้ำเสีย จึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความแปรปรวนสูง เมื่อนำไปใช้งานลักษณะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้จึงเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานทั่วไป เช่น ระยะเวลาเก็บกัก อัตราการทางชลศาสตร์และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Diederik, 2003)

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

Criterion	Value range	
	Wood (1995)	Kadlec and Knight (1996)
ระยะเวลาเก็บกัก (d)	2-7	2-4
อัตราการบรรทุกอินทรีย์ (kg BOD ha ⁻¹ day ⁻¹)	75	-
อัตราการทางชลศาสตร์ (cm d ⁻¹)	0.2-0.3	8-30
พื้นที่ที่ใช้ในการสร้างระบบ (ha m ⁻³ d)	0.001-0.007	-

2.6.2.2 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (First order models) เป็นแบบจำลองที่มีการพัฒนามาจากสมการการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ภายใต้สภาวะคงที่และเป็นการไหลแบบ plug flow จะได้สมการ ดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$\ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*}\right) = -\frac{k_v h \varepsilon A}{Q} = -\frac{kA}{Q} \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- C_0 = ความเข้มข้นมลสารที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - C_i = ความเข้มข้นมลสารที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - k_v = ค่าคงที่ของระบบ (ต่อวัน)
 - ε = ปริมาตรรวมของช่องว่างของตัวกลาง
 - A = พื้นที่หน้าตัดบ่อ (ตารางเมตร)
 - Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - h = ความลึกของน้ำ (เมตร)
 - C^* = background concentration (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ซึ่งพารามิเตอร์ค่า k และ C^* เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของสมดุลมวลสาร (I/O) นอกจากนี้แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดที่ว่า สมมติฐานของการสร้างแบบจำลองนี้ต้องสร้างภายใต้สภาวะคงที่และเป็นการไหลแบบ plug flow หากจะนำแบบจำลองนี้ไปใช้กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีสภาวะที่ต่างจากสมมติฐานจะไม่สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ได้ และแบบจำลองนี้เหมาะกับการศึกษาการกำจัดบีโอดีเพราะมีการคิด C^* ซึ่งจะเกิดขึ้นกับกลไกการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีจุลินทรีย์เข้าร่วม นอกจากนี้หากนำไปประยุกต์ใช้แล้วพบว่าระบบที่ทำการศึกษาไม่เป็นไปตามสมมติฐานคือไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะคงที่และเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้นจะไม่สามารถใช้แบบจำลองนี้ได้ (Diederik, 2003)

2.6.2.3 *Variable-order or Monod-type models* จากการศึกษาของ Mitchell (2001) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยใช้ first-order model ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลง โดยเปลี่ยนคุณลักษณะทางกายภาพที่ศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ คือเมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์มากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมากไปด้วย ซึ่ง first-order model ไม่สามารถใช้กับกรณีนี้ได้ จึงทำการศึกษาโดยใช้ Monod-type models เพื่อใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (2.8) นอกจากนี้ Monod-type models สามารถใช้กับทุกอันดับการเกิดปฏิกิริยาและไม่จำกัดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่เข้าระบบ (Diederik, 2003)

$$r = \frac{k_{0,A}}{qZ} \frac{C}{K + C} \quad (2.8)$$

- เมื่อ
- C = ความเข้มข้นมลสาร (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - $k_{0,A}$ = ค่าคงที่ของระบบ (ต่อวัน)
 - Z = ความยาวของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (เมตร)
 - q = อัตราการทางชลศาสตร์ (เมตรต่อวัน)
 - K = half-saturation constant (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - C' = background concentration (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.6.2.4 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยา (Mechanistic compartmental models)

จากการศึกษาของ Wynn (2001) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองซึ่งเป็นการศึกษากลไกภายในของการไหลใต้ผิวดิน เช่น การกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนและวัฏจักรไนโตรเจน อัตราการเจริญเติบโต การย่อยสลาย กระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเป็นการศึกษากลไกทางชีวภาพ แต่กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสที่เป็นกลไกทางกายภาพและเคมีจึงไม่สามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ แบบจำลองอาศัยหลักการสมดุลมวล โดยสารขาเข้า (Input) ของแบบจำลองประกอบด้วย อุณหภูมิ ระยะเวลาสัมผัส การตกตะกอน อัตราการไหลและความเข้มข้นสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่เข้าสู่ระบบ ส่วนสารขาออก (Output) ของแบบจำลองเป็นผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ออกจากระบบ และอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ แบบจำลองนี้มีข้อเสียที่นำอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มาตั้งสมมติฐานว่าให้ชั้นของจุลินทรีย์ที่เคลือบผิวเป็นการเคลือบแบบชั้นเดียว (Monolayer) (Diederik, 2003)

2.6.2.5 สมการสมดุลมวล (Mass balance)

เป็นสมการแบบจำลองขั้นพื้นฐานที่สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเป็นสมการขั้นสูงได้ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่เข้าและออกจากระบบ (I/O) (Diederik, 2003) หรือโดยหลักการคิดสมดุลมวลสาร (Material Balance) ยึดหลักเบื้องต้นทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ กฎทรงมวล (the thermodynamic principle of the conservation of mass) จากหลักการดังกล่าวสามารถสร้างสมการ ดังแสดงในสมการที่ (2.9) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงมวลสารใด ๆ โดยอาศัยหลักการที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของมวลสารใด ๆ ในระบบจะไม่มีสูญหายไปจากระบบ (Boundary System) โดยอัตราการไหลเข้าของมวลสารลบกับอัตราการไหลออกของมวลสารและบวกหรือลบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Process)

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{อัตราการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลง} \\ \text{ของมวลสาร} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{อัตราการ} \\ \text{ไหลเข้าของ} \\ \text{มวลสาร} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{อัตราการ} \\ \text{ไหลออก} \\ \text{ของมวลสาร} \\ \hline \end{array} \pm \begin{array}{|c|} \hline \text{อัตราการ} \\ \text{เกิดปฏิกิริยา} \\ \hline \end{array} \quad (2.9)$$

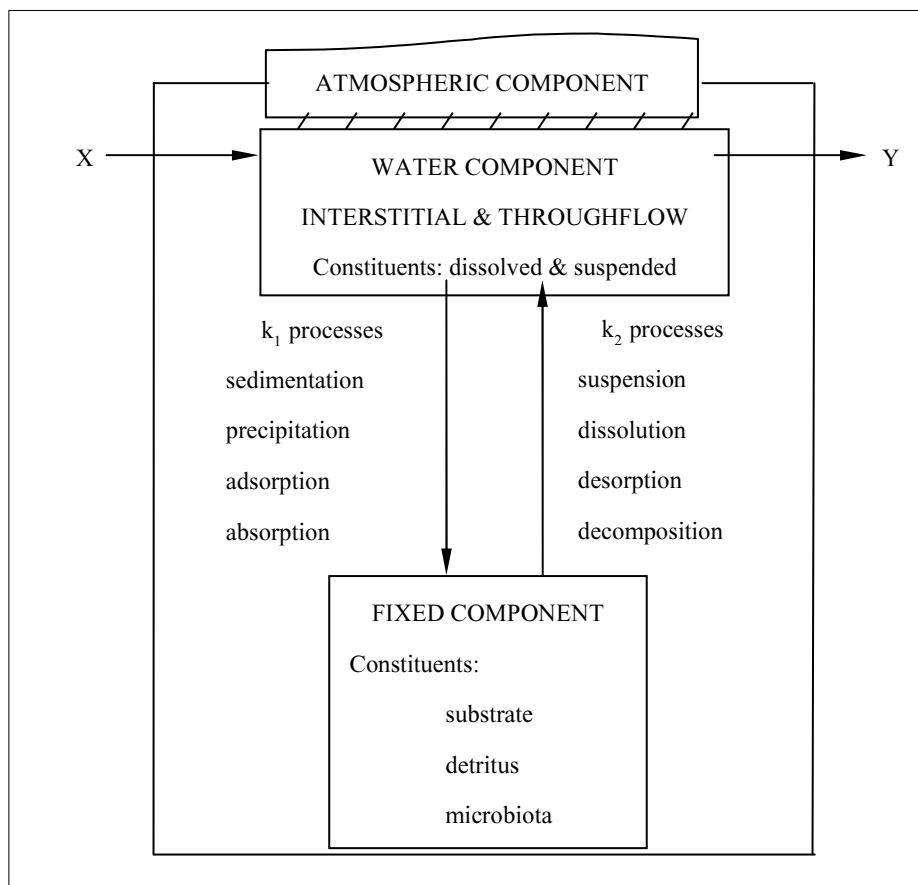
การนำหลักการสมดุลมวลสารมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์เพียง 2-3 ค่า เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจโดยตัดปัจจัยด้านสภาพอากาศ ชนิดของตัวกลาง ขนาดพื้นที่ซึ่งง่ายต่อการศึกษากลไกในการกำจัดมลสารแต่ยังขาดความเชื่อมั่นของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตาม สมการเชิงถดถอยยังมีข้อดีตรงที่สามารถทำนายความ

เข้มข้นของสารที่ออกจากระบบโดยใช้ข้อมูลจากสารที่เข้าและอัตราภาระทางชลศาสตร์ ซึ่งเราสามารถกำหนดหรือปรับเปลี่ยนค่าเองเพื่อให้ได้ตามค่ามาตรฐาน (Diederik, 2003)

จากการศึกษาของ Howard (1985); Breen (1990) ได้สรุปไดอะแกรมของแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร เพื่อนำไปใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสารที่เข้า-ออกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) โดยสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (2.10) (Howard, 1985; Breen, 1990)

$$y = x - (k_1 - k_2)x \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- y = ปริมาณสารขาออกจากระบบ
 - x = ปริมาณสารขาเข้าระบบ
 - k_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการเกิดปฏิกิริยาของการนำสารอินทรีย์ไปใช้ (เช่น การสะสมในตัวกลาง การนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อของพืช)
 - k_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยของส่วนประกอบคองที่ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (เช่น การทับถมของเศษซากพืชซากสิ่งมีชีวิตในระบบการผันกลับของปฏิกิริยาต่าง ๆ)



รูปที่ 2.8 ไคอะแกรมของแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร (Howard, 1985; Breen 1990)

จากรูปที่ 2.8 จากการศึกษาของ Howard (1985); Breen (1990) ได้สรุปไคอะแกรมของแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้หลักการสมดุลมวลสารเพื่อนำไปใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสารที่เข้าและออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เมื่อฟอสฟอรัสเข้ามาในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดกลไกการตกตะกอน การก่อก้อนผลึกและการดูดซับที่ตัวกลาง จากนั้นจะถูกพืช จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ นำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำหินดินดานมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

อมรา คาวไรสง (2550) ได้นำหินดินดานมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสและไนโตรเจน พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 510-4850 กรัมต่อกิโลกรัม ปัจจัยที่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ได้แก่ อุณหภูมิของระบบเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส พีเอชของระบบมากกว่า 6 และความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำหินดินดานมาทดลองในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนกับตัวกลาง กรวดและทราย พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 64.74-93.50 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ทรายและกรวดเป็นตัวกลาง

Drizo et al. (1997; 2000) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดาน โดยใช้น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 98-100 สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ และกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 85-95 ส่วนระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ไม่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 98-100 กำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 40-75 และกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 45-75 และยังพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ โดยมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและระบบรากได้เป็นอย่างดี

Drizo et al. (1999) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Buxite Light Expanded Clay Aggregate (LECA) หินปูน หินน้ำมันที่ผ่านการเผาไหม้แล้ว จี้เถ้าลอย หินดินดาน และซีโอไลต์ พบว่าหินดินดานและ Bauxite มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด 730 และ 350 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากบริเวณผิวของหินดินดานประกอบไปด้วยออกไซด์อะลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็ก ซึ่งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตได้ และในรายงานยังได้คาดการณ์อายุของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่จะใช้หินดินดานเป็นตัวกลางพบว่าจะมีอายุของระบบสูงถึง 20 ปี นอกจากนี้ยังพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีในหินดินดานและมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและระบบรากได้เป็นอย่างดี

Sovik et al. (2005) นำหินดินดานมาใช้ในการกำจัดมลสารในน้ำเสียชุมชน โดยทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสทั้งแบบคอลัมน์และในระบบชุดจำลองพื้นที่

ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินพบว่า อัตราส่วนระหว่างหินดินดานและน้ำเสียมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Distribution coefficient, K_d) โดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่ากับหินดินดาน 50 กรัมต่อปริมาณน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 800 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมหินดินดาน นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกในการดูดซับฟอสฟอรัสเกิดการสร้างพันธะระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในตัวกลาง โดยฟอสฟอรัสสร้างพันธะกับแคลเซียม (Ca-P) ร้อยละ 37-57 สร้างพันธะกับอะลูมิเนียม (Al-P) ร้อยละ 8-23 และสร้างพันธะกับธาตุอื่น ๆ ร้อยละ 1.4-3

Adam et al. (2007) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสระหว่างหินดินดาน และ Filtralite P โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ขนาดของหินดินดานอยู่ในช่วง 3-7 มิลลิเมตร และขนาดของ Filtralite P อยู่ในช่วง 0.5-4 มิลลิเมตร พบว่า หินดินดานมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่า Filtralite P ร้อยละ 92 และร้อยละ 54 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี พบว่าหินดินดานมีองค์ประกอบของเหล็ก แคลเซียม อะลูมิเนียม แมกนีเซียมมากกว่า Filtralite P ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญการกำจัดฟอสฟอรัส

Kořiv et al. (2010) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยมี hydrated oil shale ash เป็นตัวกลาง ในน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบ 0.13-17.0 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำชะขยะมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบ 3.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส เท่ากับร้อยละ 99 โดยฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับแคลเซียมเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟต

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของพืช ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กรมพัฒนาที่ดิน (2539) ได้ทำการศึกษาและพบว่ารูปธาตุสามารถดูดซับไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเฉลี่ย 760 และ 60 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ และสุภาพร จันรุ่งเรือง และ พิสนุย์ จิตวาพรวิษ (2539) ได้ศึกษาศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียของรูปธาตุ พบว่ารูปธาตุมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียค่อนข้างสูง โดยดูจากการเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารในส่วนต่าง ๆ ของต้นรูปธาตุ นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณมากอีกด้วย นอกจากนี้รูปธาตุยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบทำเครื่องจักรสาน เชื้อเพลิง และปุ๋ยหมัก

วราวุฒิ จิตหมายเกษม (2547) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนของพืช 3 ชนิด คือ รูปธาตุ พุทธรักษา ธรรมรักษา โดยมีระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 3 วัน 1.5 วัน และ 0.75 วัน โดยใช้อัตราส่วนดินต่อดินทรายแตกต่างกัน ได้แก่ 75 : 25 50 : 50 และ 25 : 75 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของดินในตัวกลางเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส พีชที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่นสูงสุด คือ ฐปฤทัยคิดเป็นร้อยละ 88.76 ที่ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 1.5 วัน นอกจากนั้นยังพบว่า ฐปฤทัยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกอัตราส่วนของตัวกลาง

ฐิติณัฐ ศักรานุกิจ (2549) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียชุมชนของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ของหญ้าแฝก 4 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ (1) สุราษฎร์ธานี (2) อินโดนีเซีย (3) สงขลา 3 และ (4) ศรีลังกา พบว่าหญ้าแฝกสามารถดูดซับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโลหะหนัก (แมงกานีส สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิลและโครเมียม) จากน้ำเสียชุมชนได้ดี โดยหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อินโดนีเซียมีการสะสมไนโตรเจนที่รากสูงสุดเท่ากับ 23.027 มิลลิกรัมต่อต้น หญ้าแฝกพันธุ์สงขลา 3 มีการสะสมไนโตรเจนที่ต้นสูงสุดเท่ากับ 11.242 มิลลิกรัมต่อต้น หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีสะสมฟอสฟอรัสสูงสุดในส่วนของลำต้นและส่วนรากเท่ากับ 5.019 และ 2.983 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ การดูดซับโลหะหนักของหญ้าแฝก พบว่าหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อินโดนีเซียสามารถดูดซับโลหะหนักไว้ในต้นได้สูงสุด ในขณะที่หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีสามารถดูดซับโลหะหนักไว้ในรากได้สูงสุด

Akratos et al. (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกัก ชนิดของพีช ความพรุนและชนิดของตัวกลาง ในการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินในแนวนอน โดยเปรียบเทียบตัวกลางสองชนิด ได้แก่ fine gravel และ cobble ส่วนพีชที่ใช้ได้แก่ ต้นอ้อ และ ฐปฤทัย พบว่าระบบที่ปลูกฐปฤทัยและตัวกลาง fine gravel มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีเท่ากับร้อยละ 89 ที่เคเอ็นเท่ากับร้อยละ 65 และออร์โธฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 60 โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส พบว่าต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่ากลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสจะขึ้นอยู่กับชนิดของพีชชนิดของตัวกลาง ความพรุนของตัวกลาง อุณหภูมิ และระยะเวลาเก็บกัก

Kong et al. (2009) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของพีช 4 ชนิด *Vetiveria zizanioides* (หญ้าแฝก) *Phragmites australis* (ต้นอ้อ) *Hymenocallis littoralis* และ *Cyperus flabelliformis* โดยการปล่อยเอนไซม์รอบบริเวณราก พบว่าหญ้าแฝกและต้นอ้อปล่อยเอนไซม์ Urease และ Protease ซึ่งสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน เอนไซม์ Phosphatase สามารถกำจัดฟอสฟอรัส และเอนไซม์ Cellulase ในการกำจัดชีโอดีได้สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วน *Cyperus flabelliformis* สามารถปล่อยเอนไซม์ที่กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ชีโอดี ได้น้อยกว่า *Vetiveria zizanioides* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลาง ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Bubba et al. (2003) ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของทราย จาก 13 แหล่ง ในประเทศเคนมาร์ก โดยอาศัยไอโซเทอร์มของ Langmuir มาใช้ในการอธิบาย เพื่อจะนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าทรายมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลเซียม อะลูมิเนียมและเหล็ก โดยทรายมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดอยู่ในช่วง 0.14-0.27 มิลลิกรัมต่อกรัม

Prochaska and Zouboulis (2006) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำทราย และ dolomite มาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดิน เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ โดยมีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 8 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร พบว่า dolomite มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนทรายประกอบด้วยซิลิกอน แคลเซียม อะลูมิเนียมและเหล็ก มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าร้อยละ 45 และอธิบายการดูดซับโดยใช้ Freundlich ไอโซเทอร์มได้ K_f เท่ากับ 0.011 และ 0.051 และ n เท่ากับ 1.73 และ 3.14 สำหรับทรายและ dolomite ตามลำดับ

Gustafsson et al. (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำ Filtra P Polonites natural wollastonite และ water-cooled blast furnace slag (WCBFS) ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นอัลคาไลน์มาใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสและศึกษารูปที่เกิดขึ้น พบว่า Filtra P และ Polonites มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าร้อยละ 95 และมากกว่า natural wollastonite และ WCBFS โดยฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่อยู่ใน Filtra P ในรูปของ amorphous tricalcium phosphate (ATCP, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และ dibasic calcium phosphate (DCP, CaHPO_4) ได้ดีในสภาพระบบที่เป็นอัลคาไลน์

Guan et al. (2009) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอา layered loess cinder และ Limestone มาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยมีระยะเวลาในการเดินระบบ 44 วัน ตัวกลางมีขนาด 0.8-1.6 มิลลิเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกอน แคลเซียม ซัลเฟอร์ อะลูมิเนียมและเหล็ก โดยใช้ Langmuir ไอโซเทอร์มมาใช้ในการอธิบาย พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด เท่ากับ 1.256 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดในวันแรกของการเดินระบบเท่ากับร้อยละ 48 และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเดินระบบเท่ากับร้อยละ 41

Babatunde and Zhao (2010) นำอะลัมสลัดจ์มาศึกษาหาสมการการดูดซับ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ และสมการการดูดซับ โดยระบบมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-9 เพื่อนำมาอธิบายความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสและการนำอะลัมสลัดจ์ไปใช้ พบว่าไอโซเทอร์มของ

Freundlich สามารถอธิบายการดูดซับได้ พบว่ามีค่า K_f อยู่ในช่วง 0.41-0.67 ลิตรต่อกรัม มีค่า n อยู่ในช่วง 1.13-1.24 และมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.88-0.93 จากการศึกษาสรุปได้ว่าอะตัมสัดจ์มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสฟอรัส และสามารถที่จะนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

Kotti et al. (2010) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกัก ชนิดของพืช *Phragmites australis* (ต้นอ้อ) *Arundo donax* และ *Typha latifolia* (ธูปฤาษี) โดยมีทรายและดินเป็นตัวกลาง และรูปแบบของระบบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ในโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสในน้ำเสียน้ำชุมชนสังเคราะห์ พบว่าระบบที่ปลูกธูปฤาษีบนตัวกลางดินมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นและฟอสฟอรัสสูงกว่าตัวกลางทรายคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 69.9 57.5 และ 52.4 ตามลำดับ และ 65.3 59.3 และ 42.4 ของตัวกลางทรายตามลำดับ ส่วนระบบที่ปลูกต้นอ้อบนตัวกลางดินมีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 63.9 57.5 และ 47.7 ตามลำดับ

Yousefi and Mohseni-Bandpei (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสในน้ำเสียน้ำชุมชนสังเคราะห์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน โดยปลูก *Iris pseudacorus* และทำการเปรียบเทียบขนาดของตัวกลางที่ใช้ พบว่าระบบที่มีกรวดละเอียดเป็นตัวกลางและปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงกว่าระบบที่มีกรวดหยาบเป็นตัวกลางและปลูกพืชมีค่าเท่ากับร้อยละ 67.6 และ 51.8 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าพืชมีส่วนช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบคิดเป็นช่วงร้อยละ 3-12 ในรูปออร์โธฟอสเฟตและช่วงร้อยละ 7.4-9 ในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดพบว่าระบบที่มีกรวดละเอียดเป็นตัวกลางและปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่าระบบที่มีกรวดหยาบเป็นตัวกลางและปลูกพืชมีค่าเท่ากับร้อยละ 49.4 และ 43.4 ตามลำดับ

2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สมมูลมวลในการกำจัดฟอสฟอรัส

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ (2544) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำเสียน้ำชุมชนสังเคราะห์ รวมถึงการสะสมของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินของตัวกลางดินปนทรายและทรายปนหินชนวน พืชที่ใช้คือธูปฤาษี พบว่าการสะสมฟอสฟอรัสของตัวกลางหินชนวนปนทรายมีค่าเท่ากับร้อยละ 41.10 ซึ่งมากกว่าตัวกลางดินปนทรายโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.0 และตัวกลางหินชนวนปนทรายมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับร้อยละ 74.67

Lantzke et al. (1999) ศึกษาสมมูลมวลในการกำจัดออร์โทฟอสเฟตในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง โดยใช้กรวดเป็นตัวกลาง ปลูกธูปฤาษี *Baumea articulata* และต้นกก พบว่าสัดส่วนในการสะสมออร์โทฟอสเฟตในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาเก็บกัก เมื่อมีระยะเวลาเก็บกักน้อยสัดส่วนในการสะสมออร์โทฟอสเฟตจะเกิดการสะสมที่ตัวกลาง > จุลินทรีย์นำไปใช้ > พืชนำไปใช้ ในช่วงแรกเมื่อของฟอสฟอรัสที่เข้ามาในระบบพืชยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีเพราะต้องอาศัยการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสโดยจุลินทรีย์ก่อน แต่เมื่อระยะเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้นจะพบว่า สัดส่วนในการสะสมออร์โทฟอสเฟตจะเกิดการสะสมที่ตัวกลาง > พืชนำไปใช้ > จุลินทรีย์นำไปใช้ ดังนั้นกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จึงเป็นการทำงานร่วมกันของกลไกหลัก ๆ ได้แก่ การดูดซับและตกตะกอนผลึกที่ตัวกลางพืชและจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเซลล์

Dierberg et al. (2002) ศึกษาการสะสมฟอสฟอรัสในพืช โดยมีอัตราการระบรทุกฟอสเฟตอยู่ในช่วง 4.5-19.7 กรัมต่อตารางเมตรต่อปี ทำการเดินระบบ 8 เดือน เมื่อระยะเวลาเก็บกักในระบบเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.5 3.5 และ 7 วัน พบว่าการสะสมฟอสฟอรัสของพืชจะลดลงมีค่าเท่ากับ 1.63 1.11 และ 0.41 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในระบบ (ตัวกลางและพืช) เท่ากับ 2.74 1.68 และ 0.85 กรัมต่อตารางเมตร โดยระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 50-79

Meuleman et al. (2003) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวตั้งในการกำจัดน้ำเสียจากชุมชน ปลูกต้นอ้อ โดยมีฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 335.60 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อเฮกแตร์ต่อปี โดยมีฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบเท่ากับ 326.40 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อเฮกแตร์ต่อปี พบว่าฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในรูปแบบของการตกตะกอนและสะสมในตัวกลางเท่ากับ 2.80 และ 46.00 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อเฮกแตร์ต่อปี สะสมในพืชเท่ากับ 33.00 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อเฮกแตร์ต่อปี ในรูปของน้ำใต้ดิน 7.40 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อเฮกแตร์ต่อปี และในรูปอื่น ๆ ที่ไม่สามารถวัดอีกคิดเป็นร้อยละ 23 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ

Chung et al. (2008) ศึกษาสมมูลมวลของการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินของน้ำเสียชุมชนในฮ่องกง โดยใช้กรวดและดินร่วนปนทรายเป็นตัวกลาง พบว่ากลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นพืชมีส่วนสำคัญในการดึงออร์โทฟอสเฟตไปใช้ในการสร้างเซลล์ ส่วนฟอสฟอรัสในรูปอื่นพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที แต่จะนำไปใช้ได้เมื่อมีระยะเวลาเก็บกักที่เพิ่มขึ้นซึ่งฟอสฟอรัสจะเปลี่ยนรูปไปเป็นออร์โทฟอสเฟต เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 และ 5 วัน พบว่าสามารถ

กำจัดออร์โทฟอสเฟตได้ร้อยละ 79 และร้อยละ 72 ส่วนฟอสฟอรัสทั้งหมดกำจัดได้ร้อยละ 67 และร้อยละ 52 ตามลำดับ โดยฟอสฟอรัสมีการสะสมในตัวกลางอยู่ในช่วง 3.94-9.51 กรัม สะสมในเนื้อเยื่อพืชอยู่ในช่วง 0.03-0.81 กรัม และเกิดการสะสมในรูปอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0-7.01 กรัม

2.7.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.8



ตารางที่ 2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผลการศึกษา	อ้างอิง
<p>การนำหินดินดานมาใช้ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์</p>	<p>- ตัวกลางที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีอะลูมิเนียม แคลเซียมและเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากกลไกการดูดซับทางเคมี-กายภาพ</p>	<p>อมรา ดาวไธสง (2550); Drizo et al. (1997); Drizo et al. (1999); Forbes et al. (2005); Sovik et al. (2005)</p>
	<p>- หินดินดานสามารถดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีการพัฒนาของลำต้นและระบบรากบนหินดินดานได้</p>	<p>อมรา ดาวไธสง (2550); Drizo et al. (1997); Drizo et al. (1999)</p>
	<p>- ปัจจัยที่ผลทำให้ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดได้แก่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พีเอชของระบบมากกว่า 6 และความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร</p>	<p>อมรา ดาวไธสง (2550)</p>
<p>การกำจัดฟอสฟอรัส ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของพืช</p>	<p>- พืชสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้โดยการดึงฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตจากตัวกลางและน้ำเสียเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์</p>	<p>กรมพัฒนาที่ดิน (2539); วารวุฒิ จิตหมายเกษม (2547); ฐิติณัฐ ศักรานุกิจ (2549); Chung et al. (2007)</p>
	<p>- หญ้าแฝกจะมีการสะสมฟอสฟอรัสไว้ที่ส่วนรากมากกว่าลำต้น</p>	<p>ฐิติณัฐ ศักรานุกิจ (2549)</p>

ตารางที่ 2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผลการศึกษา	อ้างอิง
การกำจัดฟอสฟอรัส ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของพืช (ต่อ)	- ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของรูปถาษีขึ้นอยู่กับระยะเวลา เก็บกัก	Chung et al. (2007)
การใช้สมมูลมวล ในการกำจัดฟอสฟอรัส ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	- การใช้สมมูลมวลในการศึกษาการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง พบว่ากลไกในการ กำจัดออร์โธฟอสเฟตในช่วงระยะเวลาเก็บกักสั้น ๆ จะเกิดการดูดซับ ที่กลางมากกว่าจุลินทรีย์มากกว่าพืชนำไปใช้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกัก พบว่าเกิดการดูดซับที่ตัวกลางมากกว่าพืชนำไปใช้และมากกว่ามาก ๆ สำหรับจุลินทรีย์นำไปใช้	Lantzke et al. (1999)
	- การใช้สมมูลมวลสารในการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินของน้ำเสียชุมชน พบว่าพืชนี กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัส	Chung et al. (2007);

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อให้ทราบถึงกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางโดยอาศัยหลักทฤษฎีสมดุลมวลสาร เพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่การศึกษาวิจัย

ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทำการติดตั้งและเดินระบบที่บริเวณด้านข้างของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ณ อาคารศูนย์เครื่องมือและเทคโนโลยี 4 และ 5 (F4 และ F5) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

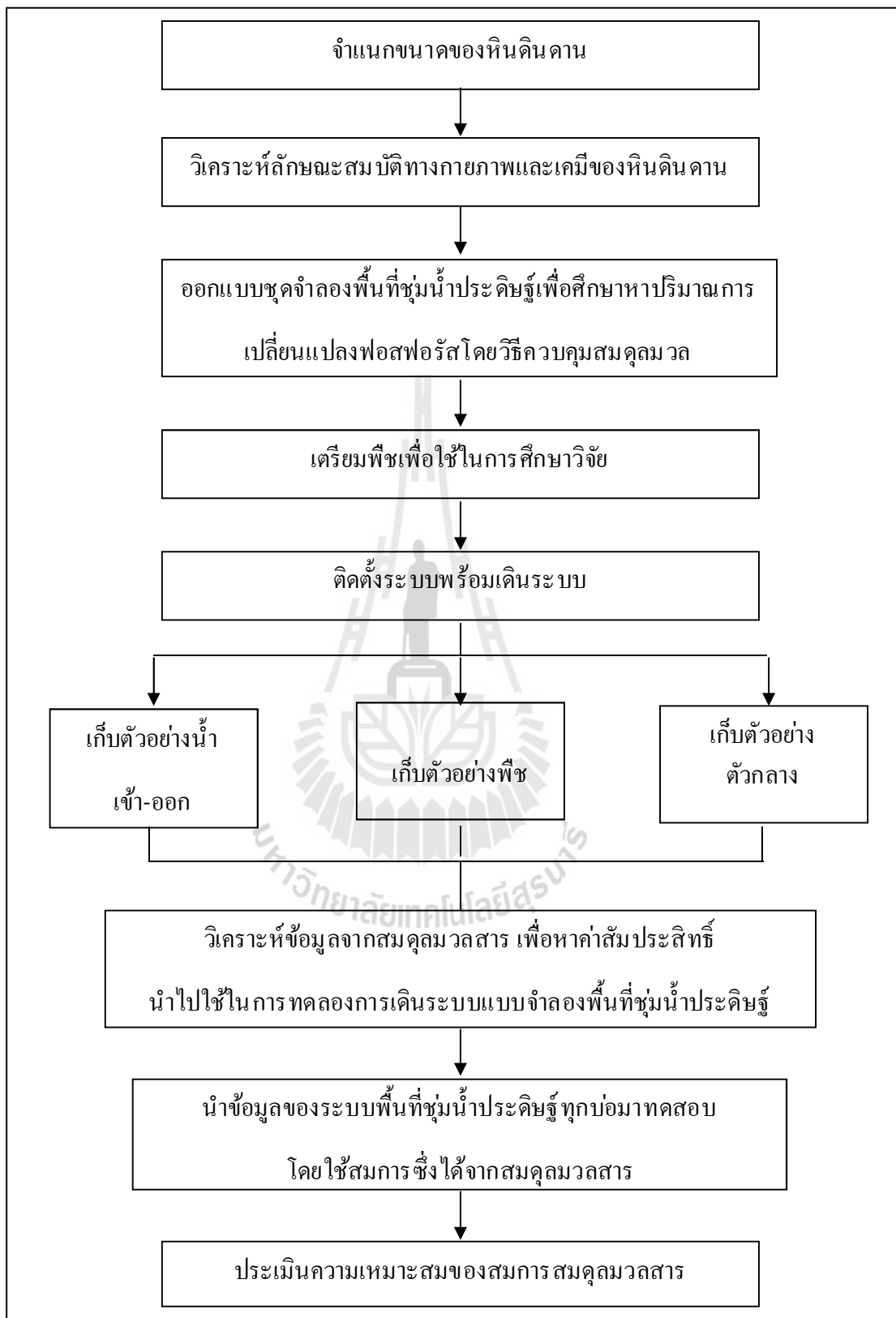
ขั้นตอนการศึกษาวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในระบบ

ตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในการศึกษานี้มีแหล่งที่มาอยู่ใกล้บริเวณที่ตั้งของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (แ่งคอย) ตำบลบ้านป่า อำเภอแ่งคอย จังหวัดสระบุรี

3.2.2 การจำแนกขนาดของหินดินดาน

นำตัวอย่างหินดินดานมาจำแนกขนาดตั้งแต่ 0.25-4.00 มิลลิเมตร โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) การเลือกใช้ขนาดของหินดินดานเลือกตามข้อกำหนดการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; US.EPA., 2000) ประกอบกับผลการศึกษาความสามารถของการดูดซับฟอสเฟตของหินดินดานจากการศึกษาของ Daothaisong and Yimrattanabovorn (2008)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.2.3 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินดินดาน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน พื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าความพรุน โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.2.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของตัวอย่างหินดินดาน ได้แก่ ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) และองค์ประกอบของแร่ธาตุในหินดินดาน โดยอ้างอิงวิธีและเครื่องมือวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างหินดินดาน

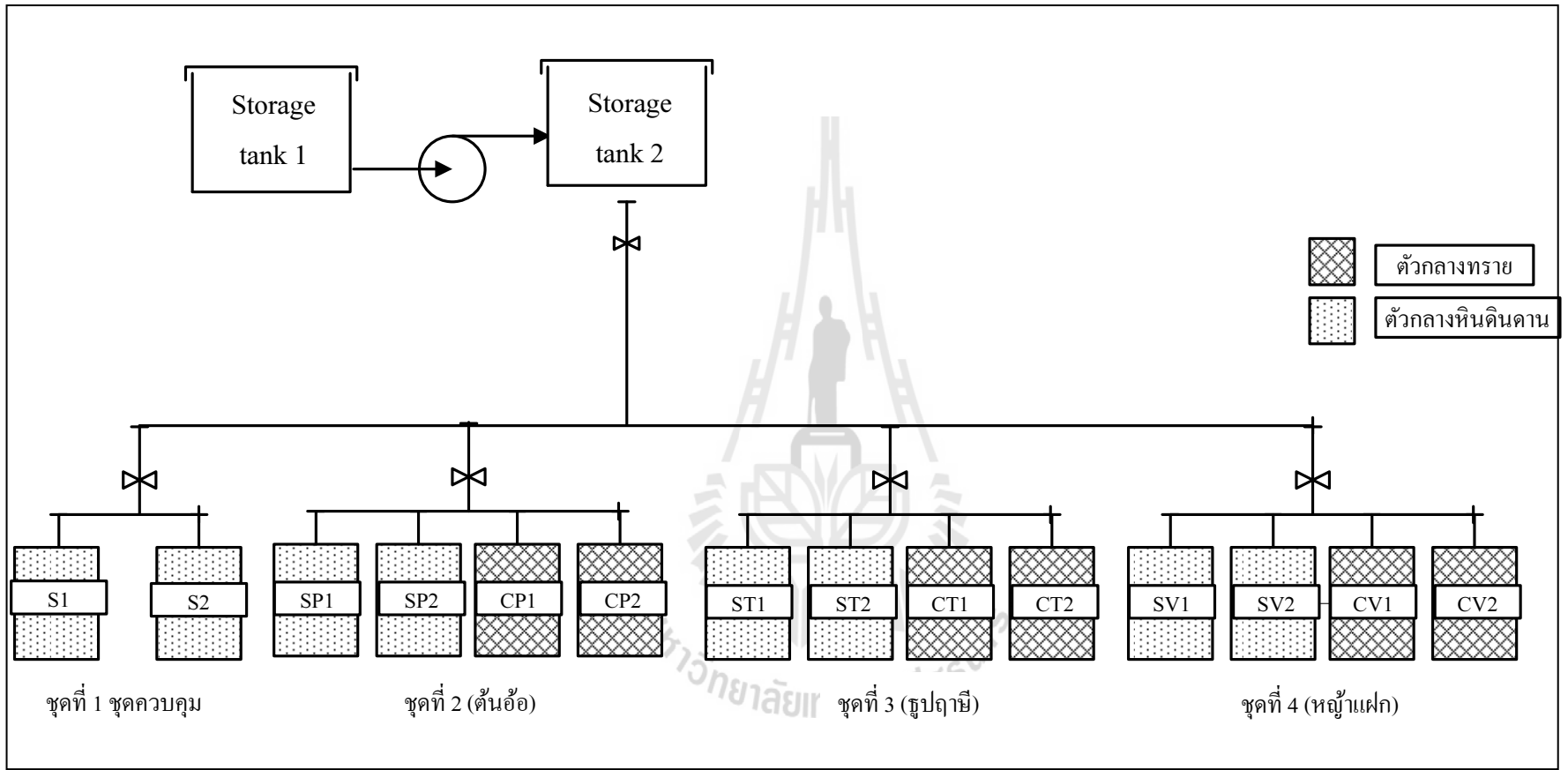
ลักษณะสมบัติ	วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์	อ้างอิง
ขนาด	Sieve Analysis Method	ASTM (2004)
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	Constant Head Method	ASTM D 2434-68 (2000)
พื้นที่ผิวจำเพาะ	BET method/ ยี่ห้อ MiCPomeritrics รุ่น ASAP 2010	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543)
ความพรุน	ASTM D 4612-03	ASTM (2004)
องค์ประกอบของแร่ธาตุ	X-Ray Fluorescence Spectrometry/ ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED 2000	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543)
CEC	Ammonium Acetate Method pH 7	กรมวิชาการเกษตร (2546)

3.2.5 การออกแบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

รายละเอียดการออกแบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวมีดังต่อไปนี้

3.2.5.1 ชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประกอบไปด้วยชุดจำลองทั้งหมด 4 ชุด ชุดที่ 1 เป็นชุดควบคุมมีจำนวน 2 บ่อ ชุดที่ 2-4 เป็นชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นดินมีชุดละ 4 บ่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดของแต่ละชุดดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนผังจุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ 3.2 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า
ระยะเวลาเก็บกัก	d	2.30
อัตราการไหล	m ³ d ⁻¹	0.036-0.039
อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์	m d ⁻¹	0.0766
อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์	kg COD ha ⁻¹ d ⁻¹	229.80
อัตราการบรรทุกฟอสเฟตแปรผัน	kg P ha ⁻¹ d ⁻¹	3.83 11.75 22.98
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	-	2 : 1

หมายเหตุ : อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบจาก US.EPA. (2000)

ชุดที่ 1 เป็นชุดควบคุม มีจำนวน 2 บ่อ มีหินดินดาน (Shale) เป็นตัวกลางและไม่ปลูกพืชชนิดใด ๆ ในบ่อได้แก่ บ่อ S 1 และ บ่อ S 2

ชุดที่ 2 เป็นชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินพืชที่ใช้คือ ต้นอ้อ (*Phragmites* spp.) มีจำนวน 4 บ่อ ได้แก่ บ่อ SP 1 และบ่อ SP 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือ ต้นอ้อ ส่วนอีก 2 บ่อ ประกอบไปด้วย บ่อ CP 1 และบ่อ CP 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินกรวดและดินปนทรายเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือ ต้นอ้อ

ชุดที่ 3 เป็นชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินพืชที่ใช้คือ ฐปถายี (*Typha* spp.) มีจำนวน 4 บ่อ ได้แก่ บ่อ ST 1 และบ่อ ST 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือ ฐปถายี ส่วนอีก 2 บ่อ ประกอบไปด้วย บ่อ CT 1 และบ่อ CT 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินกรวดและดินปนทรายเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือ ฐปถายี

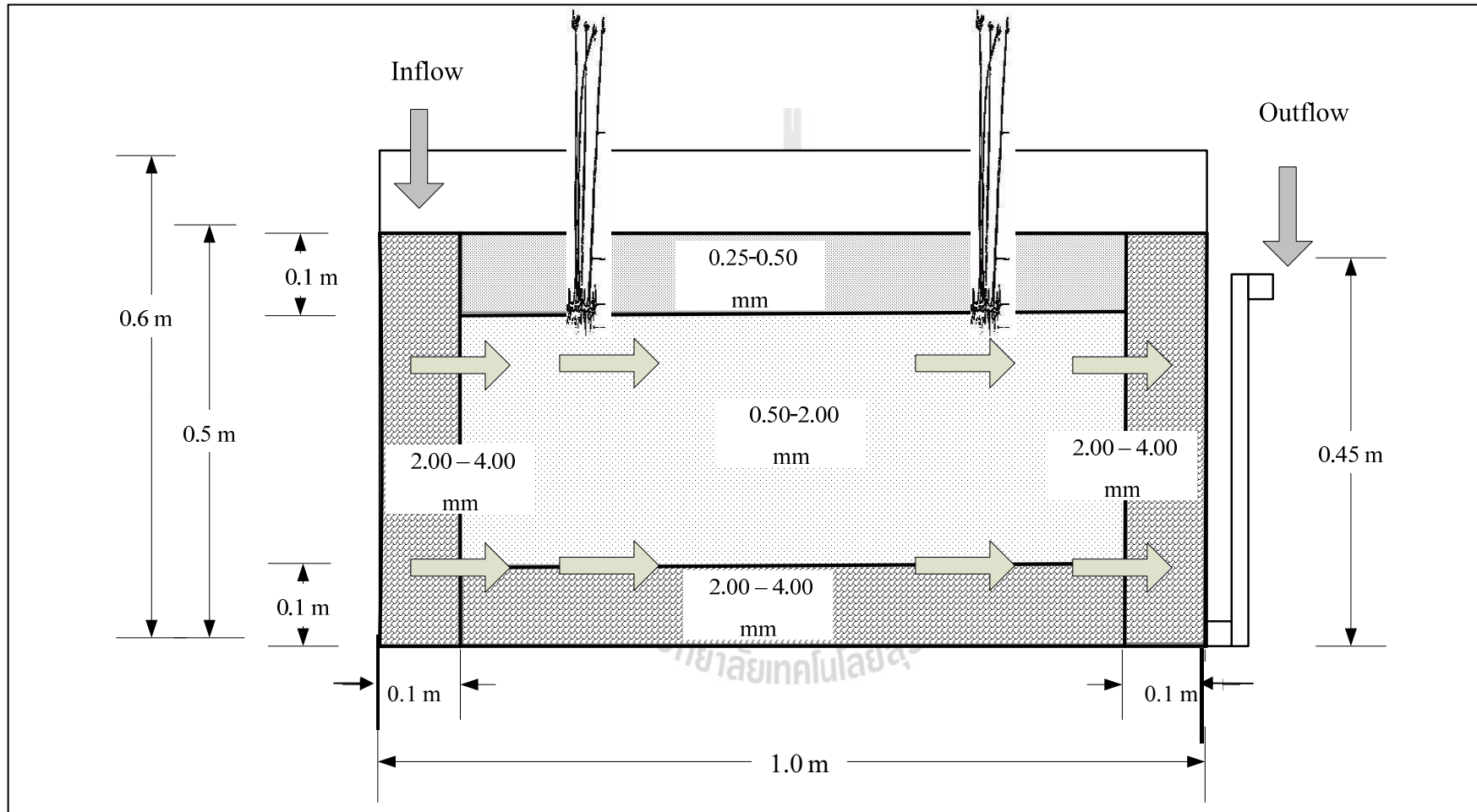
ชุดที่ 4 เป็นชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์พืชแบบไหลใต้ผิวดินพืชที่ใช้คือ หญ้าแฝก (*Vetiveria* spp.) มีจำนวน 4 บ่อ ได้แก่ บ่อ SV 1 และบ่อ SV 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือ หญ้าแฝก ส่วนอีก 2 บ่อ ประกอบไปด้วย บ่อ CV 1 และ บ่อ CV 2 จำนวน 2 บ่อ ใช้หินกรวดและดินปนทรายเป็นตัวกลางและพืชที่ใช้คือหญ้าแฝก

3.2.5.2 รายละเอียดการบรรจุตัวกลางในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

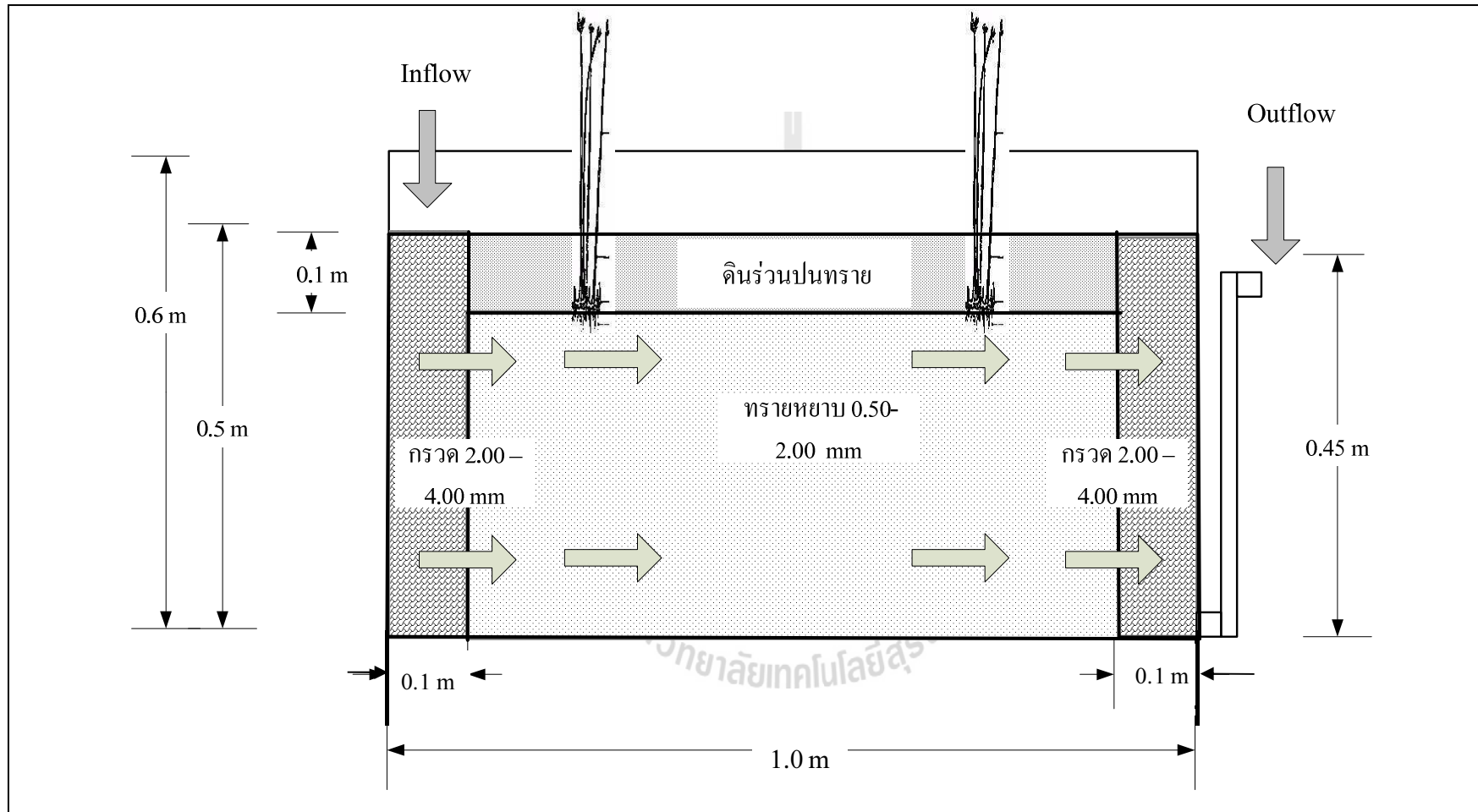
ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จำนวนทั้งหมด 14 บ่อ มีขนาดกว้าง x ยาว x สูงเท่ากับ 0.50 x 1.00 x 0.60 เมตร โดยมีรายละเอียดการบรรจุตัวกลางดังต่อไปนี้

1) ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 บริเวณที่มีน้ำเสียเข้า (Inlet Zone) และออกจากระบบ (Outlet Zone) ของชุดจำลองบรรจุหินดินดานขนาด 2.00-4.00 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 769.8 เมตรต่อวัน บริเวณที่มีการบำบัดน้ำเสีย (Treatment Zone) บรรจุหินดินดานที่มีขนาด 0.50-2.00 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 435.5 เมตรต่อวัน บริเวณส่วนบนสุดของบ่อ (Top soil) เป็นบริเวณที่ยึดเกาะสำหรับพืชบรรจุหินดินดานขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 101.1 เมตรต่อวัน และบริเวณส่วนด้านล่างของบ่อบรรจุหินดินดานขนาด 2.00-4.00 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 769.8 เมตรต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 การออกแบบชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว อ้างอิงตามข้อเสนอแนะของ US.EPA. (2000); เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2547)

2) ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กรวด ทรายและดินร่วนปนทรายเป็นตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 บริเวณที่มีน้ำเสียเข้าและออกจากระบบของชุดจำลอง บรรจุกรวดขนาดเล็กที่มีขนาด 2.00-4.00 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ในช่วง 100-1000 เมตรต่อวัน บริเวณที่มีการบำบัดน้ำเสียบรรจุทรายหยาบที่มีขนาด 0.50-2.00 มิลลิเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้อยกว่า 100 เมตรต่อวัน บริเวณส่วนบนสุดของบ่อบรรจุดินร่วนปนทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การออกแบบชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว อ้างอิงตามข้อเสนอแนะของ US. EPA (2000); เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2547)



รูปที่ 3.3 รูปตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางของตัวกลางหินดินดาน



รูปที่ 3.4 รูปตัดขวางพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางของทราย

3.2.5.3 องค์ประกอบของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1) การคัดเลือกพืช

พืชที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้พืชชนิดโผล่พื้นน้ำ (Emergent Plant) ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยทั่วไป ชนิดพืชที่เลือกใช้มักเลือกพืชที่พบได้เกือบทุกแห่งในประเทศไทย เป็นพืชที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะแวดล้อมค่อนข้างกว้าง และมีผลการศึกษาวินิจฉัยว่าถูกนำไปใช้เป็นพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และพบว่ามีความสามารถในการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโต ฟอสฟอรัสมีผลต่อพืชในด้านช่วยให้พืชออกดอกและผลได้ดี (สมบุญณ์ เตชะภิญญวัฒน์, 2548) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพืชโผล่พื้นน้ำซึ่งมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่

- ต้นอ้อ หรือ Reeds (*Phragmites* spp.) มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชร้อยละ 0.20-0.30 (Reddy, 1987)

- หญ้าแฝก หรือ Vetiver grass (*Vetiveria* spp.) มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชร้อยละ 2.0-10.0 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

- ฐูปฤายี หรือ Cattail (*Typha* spp.) มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชร้อยละ 15.0-30.0 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2) ตัวอย่างน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์โดยมีลักษณะสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	หน่วย	ค่า			
		ค่าที่ใช้ในการทดลอง	เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์* (2547)	Prochaska** (2009)	Rottiers et al.* (1999)
COD	mg l ⁻¹	285.67-354.63	192.5-770	458 (± 1.16)	460 (± 200)
TKN	mg l ⁻¹	15.44-21.12	20-85	49 (±0.41)	7 (± 3)
TP	mg l ⁻¹	5.37-29.23	4-15	8.18 (± 0.19)	25 (± 7)
อุณหภูมิ	°C	25.12-30.21	-	-	-
pH	-	6.06-7.21	-	7.07 (± 0.06)	6.90-7.50

หมายเหตุ : * เป็นค่าน้ำเสียชุมชนจริง

** เป็นค่าน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

3.2.5.4 การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)

การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) ในระบบชุดจำลองเพื่อนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะการกระจายการไหลของมลสารและระยะเวลาการเก็บกักของมลสารในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยทำการวิเคราะห์สารติดตามด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4198.69 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง 0.036-0.039 m³/d เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C/C₀ กับเวลา พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยในช่วงแรกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด และความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเรื่อยๆ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาระยะเวลาเก็บกักน้ำ (T_{mean}) ค่าความแปรปรวนของพื้นที่ใต้กราฟ (σ²) ค่าตัวประกอบการกระจาย (d) และลักษณะการไหลในระบบชุดจำลองโดยใช้สมการของ Levenspiel (1972) ดังแสดงในสมการที่ (3.1)-(3.4)

ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} \quad (3.1)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \quad (3.2)$$

ดังนั้น

$$\sigma^2 \theta = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.3)$$

ค่ากระจายการไหล (d)

$$\sigma^2\theta = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.4)$$

- โดยที่ t_i = ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ (ชั่วโมง)
 C_i = ความเข้มข้นของคลอรีนที่ออกจากระบบที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 Δt = ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ (ชั่วโมง)
 D = สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแนวนอน
 u = อัตราการเร็วไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 L_1 = ระยะทางของการไหลจากทางเข้าถึงทางออก (เมตร)

3.2.6 การติดตั้งและเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.2.6.1 การติดตั้งระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ทำการคัดเลือกพืชแต่ละชนิดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยตัดให้มี ความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร และปลูกพืชให้มีความหนาแน่น 30 ต้นต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อทำการปลูกพืชเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการเดินระบบโดยปล่อยน้ำประปาเข้าระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ เพื่อให้พืชสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ในตัวกลาง จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง โดยปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรเข้าสู่ระบบชุดจำลอง (run I run II และ run III ตามลำดับ) โดยควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง 0.036-0.039 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



รูปที่ 3.5 ลักษณะการปลูกพืชในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.2.6.2 การเดินระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

โดยการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ชุดจำลองทั้ง 14 บ่อ โดยควบคุมให้ระดับน้ำในชุดทดลองมีความสูงประมาณ 0.45 เมตร (US.EPA., 2000) ทำการควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง 0.036-0.039 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ 3 ค่าความเข้มข้น โดยความเข้มข้นแรกอยู่ในช่วง 4.60-6.51 มิลลิกรัมต่อลิตร จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-State) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 5 (Metcalf and Eddy, 2004) แล้วจึงทำการเพิ่มความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเป็นช่วงความเข้มข้นที่ 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 13.23-15.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 27.86-30.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของระบบใช้เวลานานกว่าที่คาดการณ์ไว้จากเดิม ในการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษากำหนดความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ 3 ค่าความเข้มข้น

3.2.7 การเก็บตัวอย่าง

3.2.7.1 ตัวอย่างน้ำ

1) เก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรน้ำที่เข้า-ออกจากระบบทุก ๆ 2 วัน เพื่อทำสมดุลมวลของน้ำ เพื่อไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่หายไปเนื่องจากการระเหยไปในอากาศและการคายน้ำของพืช (Evatranspiration)

2) วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เข้าและออกจากระบบ ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 2 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดี ทีเคเอ็นและ ฟอสฟอรัส (TP) วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำและเครื่องมือวิเคราะห์อ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยในแต่ละความเข้มข้นของฟอสฟอรัสมีจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 30 ตัวอย่าง

3.2.7.2 ปัจจัยสถานะแวดล้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในขณะที่ทำการเดินระบบทำการตรวจวัดค่า ORP พีเอช และอุณหภูมิ ของน้ำในระบบของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทุกบ่อ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการควบคุม ปัจจัยสถานะแวดล้อมในบ่อขณะเดินระบบ โดยอ้างอิงเครื่องมือวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 วิธีการวิเคราะห์และเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำ

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์
COD	Close Reflux Method
TKN	TKN method
Total Phosphorus	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method
ORP	Electronic ORP meter with Platinum electrode รุ่น YSI 556 MPS ยี่ห้อ YSI
ความเป็นกรด-ด่าง	Electronic pH Meter with glass electrode meter รุ่น YSI 556 MPS ยี่ห้อ YSI
อุณหภูมิ	Thermometer Method รุ่น YSI 556 MPS ยี่ห้อ YSI

หมายเหตุ : APHA et al. (2006)

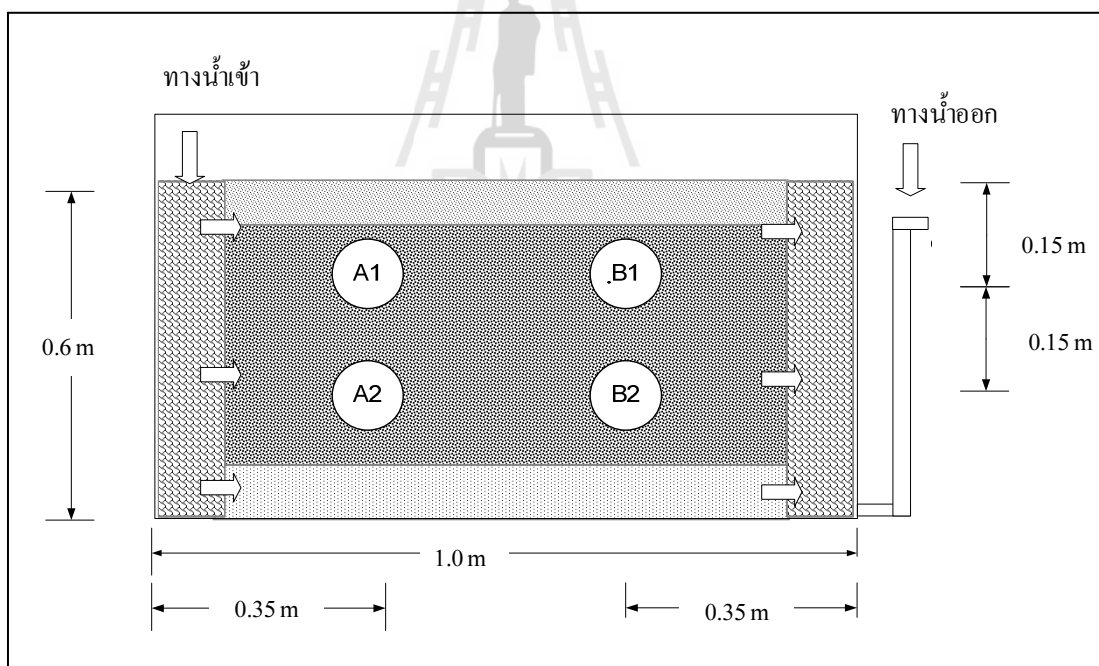
3.2.7.3 ตัวอย่างพืช

1) การเก็บตัวอย่างพืช ทำการเก็บตัวอย่างพืชก่อนเริ่มเดินระบบและ หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองในแต่ละช่วงความเข้มข้นของฟอสฟอรัส โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างพืช ในแต่ละชุดจำลอง นำตัวอย่างพืชแยกส่วนออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นราก (Root) และส่วนที่ เหนือจากส่วนที่เป็นรากทั้งหมด (Shoot) นำตัวอย่างพืชมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักแห้งของพืช (Biomass) ในแต่ละส่วน หลังจากนั้นนำตัวอย่าง พืชมาบดให้เป็นผงมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และเก็บไว้ในขวดแก้ว (Nelson and Sommers, 1973) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชก่อนและหลังการเดินระบบโดยอ้างอิง วิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

2) การวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืชทำการวัด 2 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยทำการวัดความสูงและสังเกตอาการการเจริญเติบโตทางกายภาพ เช่น สีของใบ จำนวนใบ ลักษณะการแตกใบใหม่ของต้นไม้ม การออกดอกและผล และลักษณะของลำต้นเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดินปกติบริเวณใกล้เคียงกับชุดจำลอง

3.2.7.4 ตัวอย่างตัวกลาง

ทำการเก็บตัวอย่างตัวกลางที่ใช้ในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ก่อนและหลังเดินระบบในแต่ละช่วงความเข้มข้นของฟอสฟอรัส โดยมีจุดเก็บตัวอย่างที่จุด A1 รวมทั้ง B1 ที่ระดับความลึกประมาณ 15 เซนติเมตรจากระดับผิวตัวกลางด้านบน และ จุด A2 รวมทั้ง B2 ที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตรจากระดับผิวตัวกลางด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางและหาค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 รูปตัดขวางจุดเก็บตัวอย่างตัวกลาง

ตารางที่ 3.5 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชและตัวกลาง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อ้างอิง
ปริมาณฟอสฟอรัส ที่สะสมพืช	สกัดตัวอย่างพืชด้วย Na_2SO_4 และ H_2SO_4 Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method	กรมวิชาการเกษตร (2546)
ปริมาณฟอสฟอรัส ที่สะสมตัวกลาง	วิธี Bray P1 Extraction Ascorbic acid Colorimetric Method	

3.2.8 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร

จากสมการที่ 3.5 นำหลักการสมดุลมวลของถังปฏิกรณ์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลาง จะได้สมการในการศึกษาการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$\text{Accumulation} = \text{Inflow} - \text{Outflow} + \text{Generation} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Accumulation} &= \text{Input} - \text{Output} - \text{Physical Mechanism} - \text{Biochemical Mechanism} \\ &\quad - \text{etc. Mechanism} \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดย

$$\begin{aligned} \text{Accumulation} &= V \frac{dC}{dt} \\ \text{Input} &= Q_{in} C_{in} \\ \text{Output} &= Q_{out} C_{out} \\ \text{Physical Mechanism} &= W_s k_s \\ \text{Biological Mechanism} &= W_p k_p \\ \text{etc. Mechanism} &= W_e k_e \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้สมการสมดุลมวล ดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$V \frac{dC}{dt} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} - W_s k_s - W_p k_p - W_e k_e \quad (3.7)$$

ที่สภาวะสมดุล (Steady state) $V \frac{dC}{dt} = 0$ จากสมการที่ 3.7 จะได้

$$0 = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} - W_s k_s - W_p k_p - W_e k_e$$

เมื่อ $Q_{in} = Q_{out} = Q$ จัดรูปสมการที่ 3.7 ใหม่ จะได้ดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$QC_{in} - QC_{out} = W_s k_s + W_p k_p + W_e k_e \quad (3.8)$$

โดย Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

C_{in} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{out} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

W_s = น้ำหนักตัวกลางหินดินดาน (กรัม หรือ กิโลกรัม)

k_s = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

W_p = น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีช (กรัม หรือ กิโลกรัม)

k_p = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพีช (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

W_e = ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดด้วยกลไกอื่น ๆ (กรัม)

k_e = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกลไกอื่น (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

จากสมการที่ 3.8 สามารถอธิบายขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

1) ฟอสฟอรัสที่เข้าระบบสามารถหาได้จากข้อมูลปริมาณน้ำที่เข้าระบบต่อวันมีค่าอยู่ในช่วง 0.036-0.039 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าในระบบแต่ละช่วงความเข้มข้น

2) ฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบสามารถหาได้จากข้อมูลปริมาณน้ำที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.036-0.039 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบแต่ละความเข้มข้น

3) ฟอสฟอรัสที่กำจัดโดยหินดินดาน (Physical Mechanism) ในระบบ

การหาค่าอัตราการทำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดาน (k_d) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในตัวกลางก่อนเริ่มเดินระบบ และหาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในตัวกลางหลังจากเดินระบบของแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส (5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในแต่ละความเข้มข้นมีระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดานที่วิเคราะห์ได้หลังจากเดินระบบแต่ละความเข้มข้นจะถูกหักออกด้วยปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในหินดินดานก่อนเดินระบบ เพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่จริงในตัวกลางของระบบแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส

สร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x เพื่อให้ได้สมการเชิงเส้นตรง โดยค่า k_d ที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการแทนค่า x (ระยะเวลาในการเดินระบบ) ในสมการเชิงเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 60 120 และ 180 วัน ตามลำดับ โดย k_d มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งการหาค่าน้ำหนักตัวกลางหินดินดาน (W_s) หาได้จาก

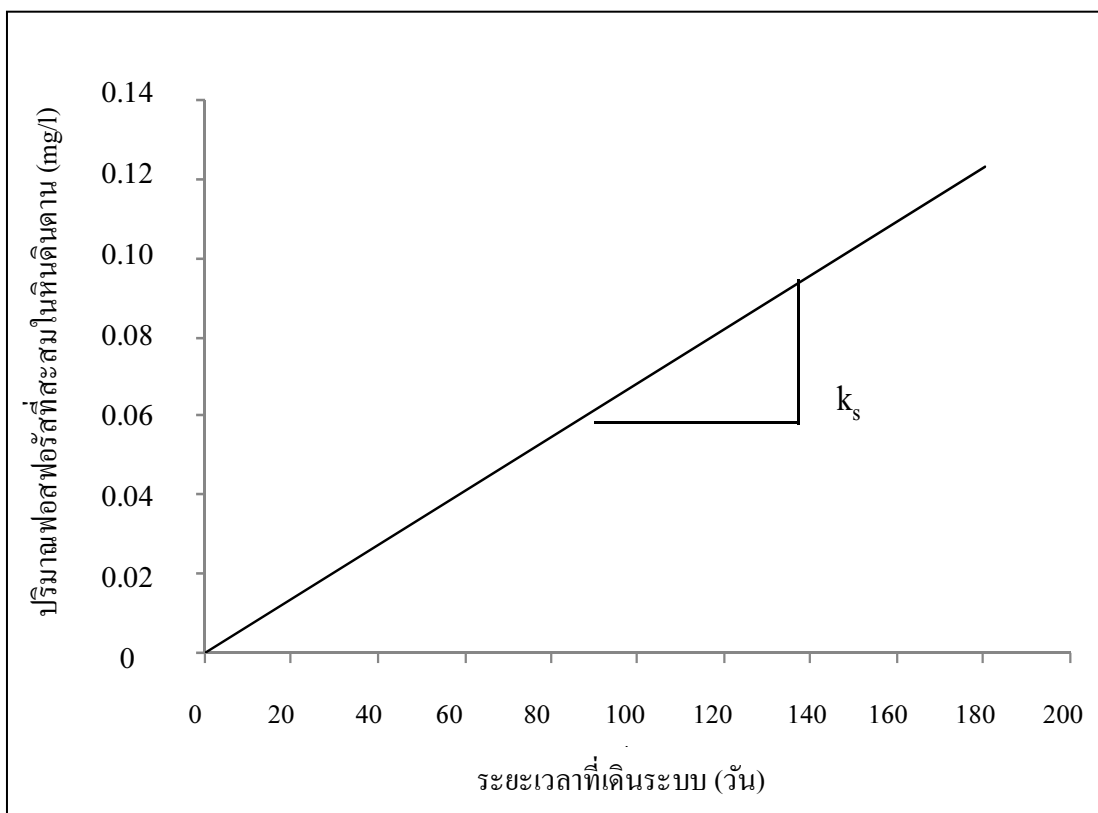
$$D = \frac{W_s}{V}$$

โดย D = ความหนาแน่นของหินดินดานมีค่าเท่ากับ 1.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

V = ปริมาตรของตัวกลางหินดินดานในระบบชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 0.225 ลูกบาศก์เมตร

W_s = น้ำหนักตัวกลางหินดินดาน

หมายเหตุ : ตัวกลางหินดินดานที่ใช้มีค่าอัตราส่วนช่องว่างอยู่ในช่วง 0.3-0.35

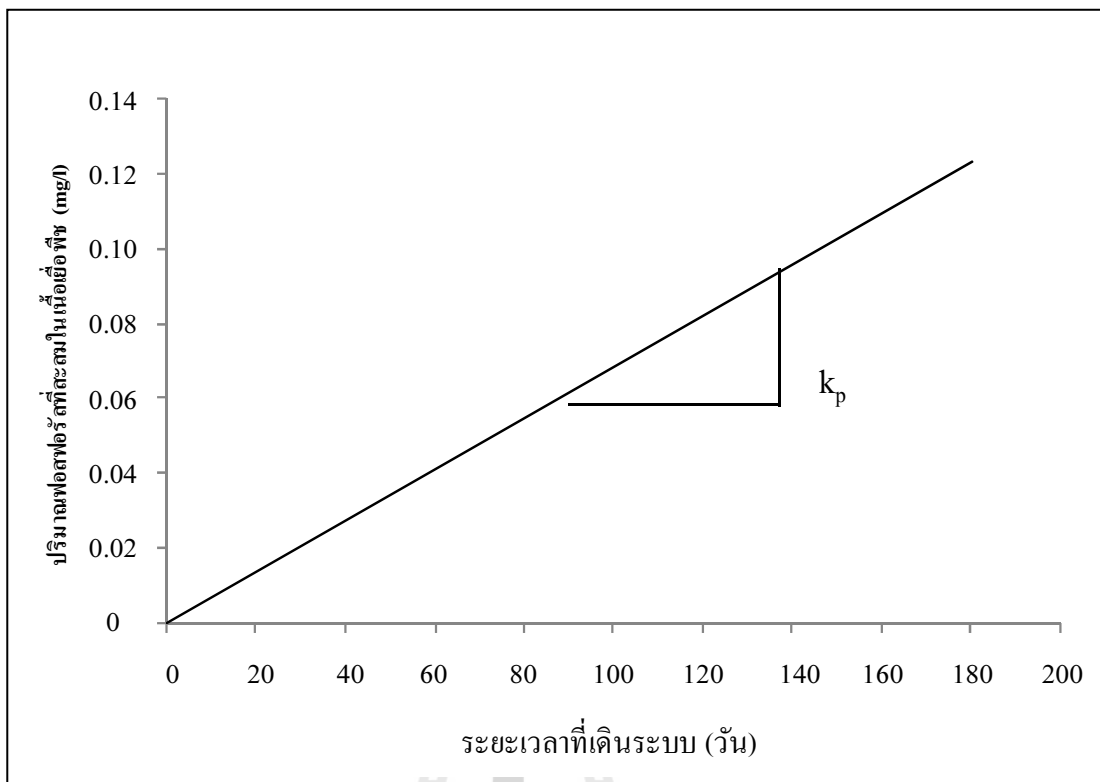


รูปที่ 3.7 การหาค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดาน (k_s)

4) ฟอสฟอรัสที่กำจัดโดยพืช (Biochemical Mechanism) ในระบบ

การหาค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช (k_p) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อพืชก่อนเริ่มเดินระบบ และหาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในเนื้อเยื่อพืชหลังจากเดินระบบของแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส (5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในแต่ละความเข้มข้นมีระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชที่วิเคราะห์ได้หลังจากเดินระบบแต่ละความเข้มข้นจะถูกหักออกด้วยปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในเนื้อเยื่อพืชก่อนเดินระบบ เพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืชจริงของแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส

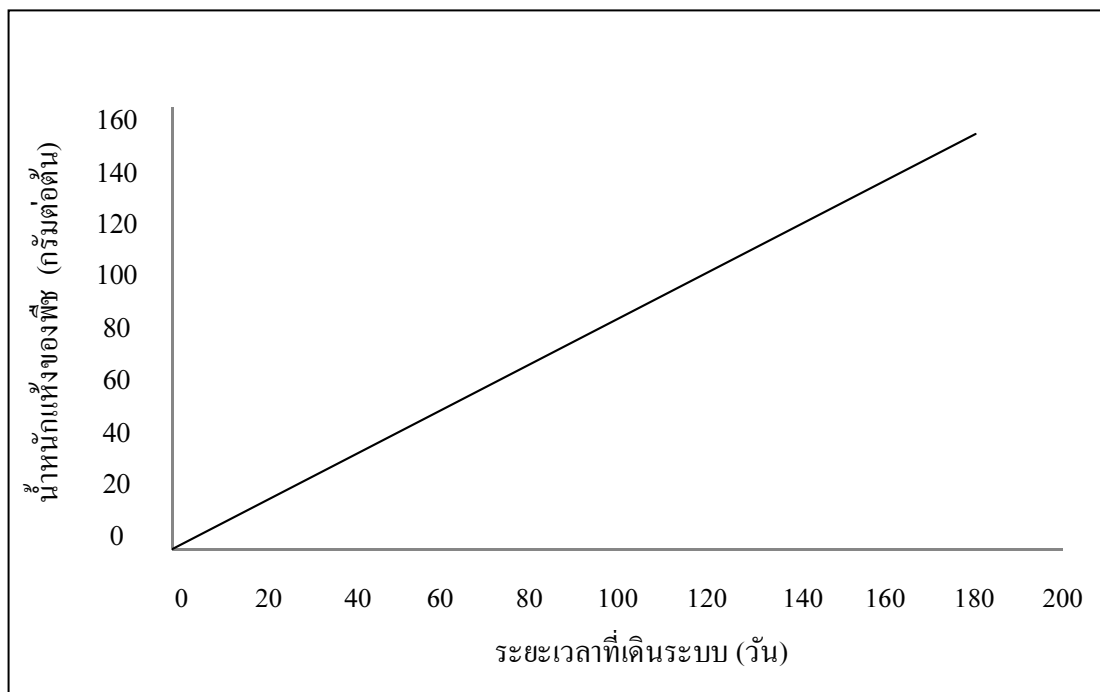
สร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช (มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x เพื่อให้ได้สมการเชิงเส้นตรง โดยค่า k_p ที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการแทนค่า x (ระยะเวลาในการเดินระบบ) ในสมการเชิงเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 60 120 และ 180 วัน ตามลำดับ โดย k_p มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การหาค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช (k_p)

การหาค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืช (W_p) ในระบบหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชในระบบ (กรัมต่อต้น) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x เพื่อให้ได้สมการเชิงเส้นตรง โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชในระบบที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการแทนค่า x (ระยะเวลาในการเดินระบบ) ในสมการเชิงเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 60 120 และ 180 วัน ตามลำดับ โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชในระบบมีหน่วยเป็นกรัมต่อต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยความหนาแน่นของพืชในระบบมีค่าเท่ากับ 30 ต้นต่อตารางเมตร และขนาดพื้นที่ของบ่อทดลองมีค่าเท่ากับ 0.5 ตารางเมตร ดังนั้น ค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืช (W_p) หาได้จาก

$$W_p = \text{ค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืช (กรัมต่อต้น)} \times \text{ความหนาแน่นของพืช (ต้นต่อตารางเมตร)} \\ \times \text{ขนาดพื้นที่ของบ่อ (ตารางเมตร)}$$



รูปที่ 3.9 การหาค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีช (W_p)

4) ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดด้วยกลไกอื่น ๆ ได้แก่ การสะสมในเนื้อเยื่อจุลินทรีย์ การย่อยสลายของซากพืชและสิ่งมีชีวิตในระบบ และการระเหยของน้ำไปในบรรยากาศ หาได้จากสมการสมดุลมวลสารของฟอสฟอรัส โดยเป็นปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่หลังจากหักปริมาณฟอสฟอรัสที่กำจัดด้วยตัวกลางและพืชออกไปแล้ว (Kadlec and Knight, 2006) ดังนั้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลสมการสมดุลมวลสารสามารถสรุปได้ ดังแสดงในสมการที่ 3.9

$$C_{out} = \frac{QC_{in} - (k_s \times D_s \times V) - (k_p \times W_p \times D_p \times A) - (W_e k_e)}{Q} \quad (3.9)$$

โดย Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 C_{in} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_{out} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 D_s = ความหนาแน่นของหินดินดาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 V = ปริมาตรของระบบ (ลูกบาศก์เมตร)
 k_s = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

- W_p = น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีช (กรัม หรือ กิโลกรัม)
 D_p = ความหนาแน่นของพีช (ตันต่อตารางเมตร)
 A = ขนาดพื้นที่ของบ่อ (ตารางเมตร)
 k_p = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพีช (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)
 W_c = ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดด้วยกลไกอื่น ๆ (กรัม)
 k_c = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกลไกอื่น (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

3.2.9 การประเมินผลการแทนค่าของสมการสมดุลมวลสาร

ทำการประเมินผลของสมการที่ได้จากทฤษฎีสมดุลมวลสาร โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส (5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในแต่ละความเข้มข้นมีระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน ลงในสมการที่ (3.9) ซึ่งจะได้ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจากสมการแล้วทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจากการเดินระบบจริง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จำลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยทำการศึกษาดังนี้

3.3.1 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาดังนี้

3.3.1.1 ผลลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินดินดาน

3.3.1.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำที่เข้าและออกจากระบบจำลองทุกชุด

3.3.1.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในพีชก่อนและหลังการเดินระบบ

3.3.1.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางก่อนและหลังการเดินระบบของชุดควบคุมที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางโดยไม่ปลูกพีช เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและปลูกพีช

3.3.1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสของระบบที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและระบบที่ใช้กรวดและทรายเป็นตัวกลาง

3.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดจำลองที่มีตัวกลางต่างชนิดกันแต่ปลูกพืชชนิดเดียวกัน นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-Way Anova และ Paired-T Test



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 ลักษณะสมบัติของตัวกลางหินดินดาน

4.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ ดังสรุปในตารางที่ 4.1 โดยสามารถจำแนกขนาดของหินดินดานออกเป็น 3 ขนาด ดังนี้ (1) หินดินดานขนาด A มีขนาด 2.00-4.00 มิลลิเมตร (2) หินดินดานขนาด B มีขนาด 0.50-2.00 มิลลิเมตร และ (3) หินดินดานขนาด C มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร พบว่าตัวอย่างหินดินดานมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะเรียงจากมากไปหาน้อยดังต่อไปนี้ $C > B > A$ โดยมีค่าเท่ากับ 5.22 4.63 และ 3.41 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวกลางที่นิยมใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั่วไป อาทิเช่น กรวด ทราช จะมีความพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 0.80-11.00 ตารางเมตรต่อกรัม (Tokunaga et al., 2003; Prochaska and Zoubulis, 2005) ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวอย่างหินดินดานมีอยู่ในช่วง 1.86-1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินกำหนดค่าความพรุนของตัวกลางอยู่ในช่วงร้อยละ 30.0-54.4 (US.EPA., 2000) และผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างหินดินดานมีค่าเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังต่อไปนี้ $A > B > C$ โดยมีค่าเท่ากับ 769.8 435.5 และ 101.1 เมตรต่อวัน ตามลำดับ โดยตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั่วไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตั้งแต่ 100-250,000 เมตรต่อวัน (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2547; Metcalf and Eddy, 2004) จะเห็นได้ว่าตัวกลางหินดินดานที่ใช้ในการศึกษามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ในช่วงของตัวกลางที่กำหนดสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีค่าความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีและยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจนอีกด้วย (Kadleck and Knight, 2006) จากการศึกษาของ Stottmeister et al. (2003) พบว่าตัวกลางที่มีขนาดตั้งแต่ 0.06-10.00 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมในการพัฒนาระบบรากของพืช และสามารถช่วยลดการไหลล้นของระบบอีกด้วย จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าหินดินดานขนาด A มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่ากับกรวดซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้สูง ในขณะที่หินดินดานขนาด B และ C มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่ากับทรายหยาบ ซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้ปานกลาง (มณเฑียร กังคศิเทียม, 2539; สถาพร คูวิจิตรจรรู, 2542) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่มีค่ามาก

แสดงให้เห็นถึงการมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้สูง ช่วยลดการอุดตันของระบบกรอง (Metcalf and Eddy, 2004) ดังนั้นจากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพจะเห็นได้ว่าหินดินดานสามารถนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

หินดินดาน	ขนาด (mm)	ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ($m^2 g^{-1}$)	ความหนาแน่น ($g cm^{-3}$)	ความพรุน (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ($m d^{-1}$)
A	2.00-4.00	3.411	1.86	30	769.8
B	0.50-2.00	4.624	1.87	33	435.5
C	0.25-0.50	5.221	1.88	35	101.1

4.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

ผลการศึกษาร่องประกอบทางเคมีของตัวอย่างหินดินดานที่ใช้เป็นตัวกลางในระบบดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินดินดานประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 60.01 เฟอริกออกไซด์ร้อยละ 16.72 อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 10.58 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5.25 และโพแทสเซียมไดออกไซด์ร้อยละ 5.26 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของอมรา คาว ไชสง (2551) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ และจากผลการศึกษาของ Drizo et al. (1999); Bubba et al. (2003) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวกลางจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส โดยจะเกิดพันธะระหว่างฟอสฟอรัสกับเฟอริก อะลูมิเนียม และแคลเซียม จะทำให้เกิดสารประกอบ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ $FePO_4$ และ $AlPO_4$ และจากการศึกษาของ Wu et al. (2006) ได้จัดลำดับความสำคัญของธาตุโลหะใน zeolite ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยที่มีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟต พบว่าออร์โธฟอสเฟตจะเข้าทำปฏิกิริยากับ $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ ตามลำดับ ดังนั้นในการเลือกตัวกลางสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสได้ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้นานขึ้น จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดานพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับออร์โธฟอสเฟตได้ และหินดินดานมีผลการวิเคราะห์ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในช่วง 3.49-3.95 มิลลิ

อีกิวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับสารละลาย ซึ่งสารดูดซับที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมากจะมีผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่ประจุเป็นบวกมากตามไปด้วย (ชิตารัตน์ บุญศิริ, 2543)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน

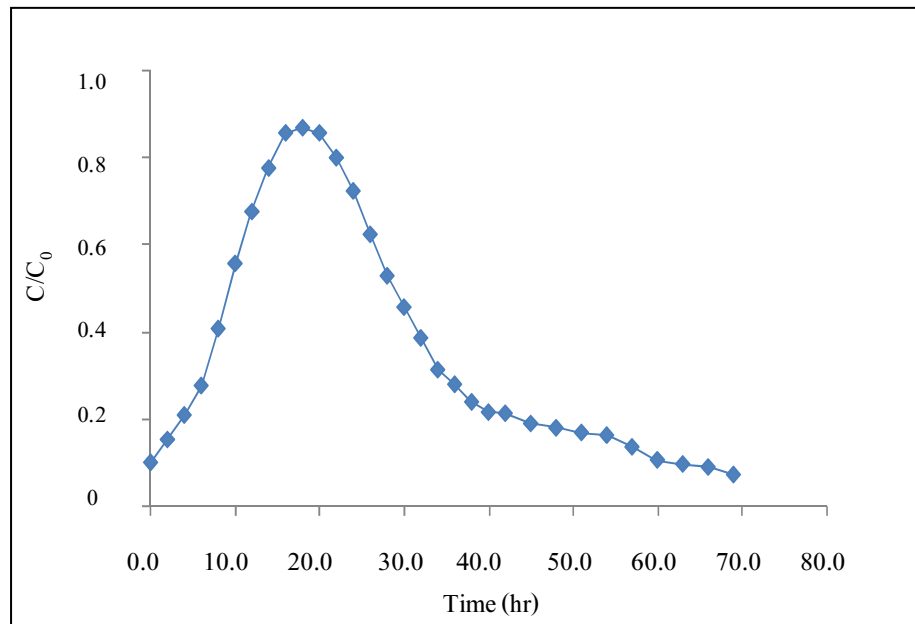
ส่วนประกอบ	ร้อยละ	ส่วนประกอบ	ร้อยละ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	60.01	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.17
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	10.58	ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO ₂)	1.93
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	16.72	โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.38
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	5.25	ซีโรเนียมออกไซด์ (ZrO ₂)	0.08
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	5.26		

4.2 ผลการศึกษาชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

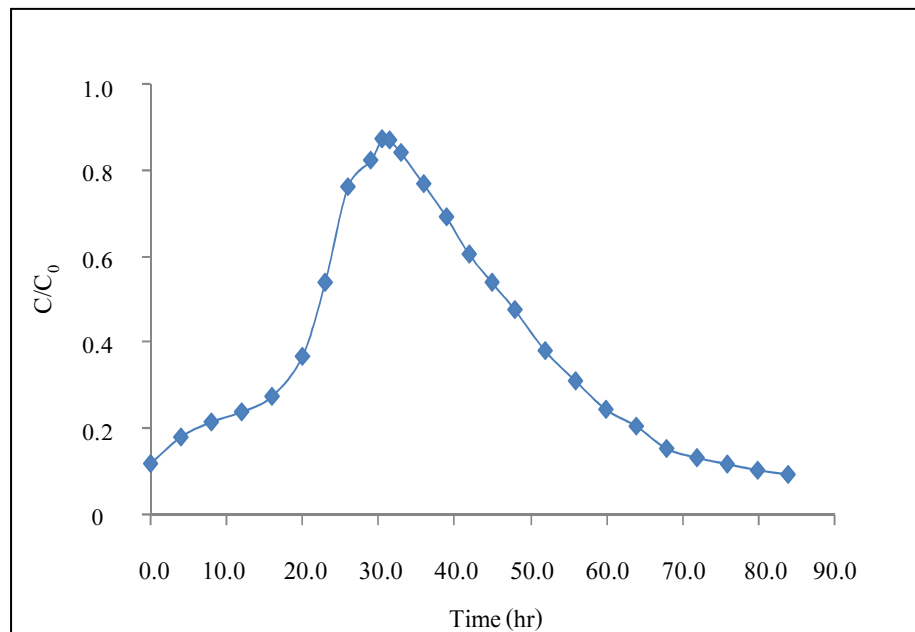
ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ทำการศึกษารวมไปด้วยชุดจำลองจำนวน 4 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมมีจำนวน 2 บ่อ และเป็นชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินที่มีการปลูกพืช 3 ชุด ชุดละ 4 บ่อ แบ่งเป็นตัวกลางหินดินดานจำนวน 2 บ่อ และตัวกลางกรวดและทรายจำนวน 2 บ่อ พืชที่ปลูกได้แก่ ต้นอ้อ ฐฤทัย และหญ้าแฝก ทำการเดินระบบโดยใช้น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ โดยมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.036-0.039 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเดินระบบเป็นระยะเวลา 180 วัน

4.2.1 ผลการศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)

จากผลการศึกษาสารติดตาม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.) พบว่าระยะเวลาเก็บกักที่ได้จากการคำนวณค่า T_{mean} มีค่าเท่ากับร้อยละ 40-50 ของ T_{theory} โดยทั่วไปการหาระยะเวลาเก็บกักในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์พบว่า ค่า T_{mean} ส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 40-80 ของ T_{theory} (US.EPA., 2000) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดได้จากค่าความพรุนของตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลาง ความหนาแน่นของพืชและรากพืชในระบบ ทำให้มีผลต่อการไหลของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำได้ (Metcalf and Eddy, 2004) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายการไหลของทุกบ่อ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.24-0.25 โดยลักษณะการไหลในระบบมีลักษณะการไหลแบบกระจัดกระจายค่อนข้างมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของน้ำในระบบทำให้เกิดการกวนแบบสมบูรณในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ผลการศึกษาสารติดตาม (ก) ป่องตัวกลางหินดินดาน และ (ข) ป่องตัวกลางกรวดและทราย

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสารติดตาม

บ่อ	ระยะเวลาเก็บกัก (d)		σ^2	ค่าการกระจาย การไหล (d)
	T_{theory}	T_{mean}		
S	1.97	1.07	-636.82	0.24
ST	1.97	0.97	-518.14	0.24
SP	1.97	1.03	-584.88	0.24
SV	1.97	0.99	-545.44	0.24
CT	2.53	1.40	-1097.01	0.24
CP	2.53	1.54	-1331.74	0.25
CV	2.53	1.45	-1169.08	0.24

4.2.2 ผลการศึกษาปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากผลการศึกษาปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่า ORP ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง + 60.3 มิลลิโวลต์ ถึง + 71.7 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าเป็นบวก แสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะมีออกซิเจน (Suthersan et al., 2002) จากการศึกษาของ Aldous et al. (2005) พบว่าในสภาวะที่ระบบมีออกซิเจนฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับ Fe^{3+} ในตัวกลางที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบทางเคมีในรูปของ $FePO_4$ และจากการศึกษาของ Ong et al. (2010) พบว่าค่า ORP มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของพืชและจุลินทรีย์ และในช่วงที่พืชมีการเจริญเติบโตจะส่งผลให้ค่า ORP ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ลดลง เพราะออกซิเจนในระบบจะถูกพืชและจุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายและหายใจ (Li et al., 2010) ผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิของการเดินระบบพบว่าอยู่ในช่วง 27-28 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จากการศึกษาของ Bachand and Horne (1999) พบว่าประสิทธิภาพในการทำงานของจุลินทรีย์ Denitrifying จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบลดต่ำลง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อยู่ในช่วง 10-30 องศาเซลเซียส (US.EPA., 1988) ดังนั้นจากผลการศึกษาปัจจัยสภาวะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ พบว่ามีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชและจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะมีการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน และผลการตรวจวัดค่าพีเอชของระบบพบว่าอยู่ในช่วง 9-10 ซึ่งค่าพีเอชจะมีผลต่อรูปของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ โดยในช่วงพีเอช 9-10 ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป HPO_4^{2-} (Sawyer et al., 2003) และการทำปฏิกิริยากับโลหะ โดยช่วงพีเอช 7-10 ฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากับซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม (ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ, 2547) นอกจากนี้ค่าพีเอชมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ

พืชทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ในช่วง 3-10 (US.EPA., 2000) จากการศึกษาของ Batty and Younger (2004) พบว่าต้นอ้อมีการเจริญเติบโตลดลงเมื่อได้รับน้ำเสียจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และรูปธาตุไม่สามารเจริญเติบโตและมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนลดลง เมื่อพีเอชของระบบมีค่าเท่ากับ 3.5 และจากการศึกษาของ Orupöld et al. (2000) พบว่าช่วงพีเอชที่เป็นอัลคาไลน์จะมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังนั้นปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้มีปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบเป็นแบบมีออกซิเจน มีช่วงอุณหภูมิและพีเอชของระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชที่ใช้ในการศึกษา และเหมาะกับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และมลสารในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ อีกทั้งพืชยังมีผลต่อรูปและการเกิดปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสในระบบ

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาค่าเฉลี่ย (Mean \pm SD) ปัจจัยสภาวะแวดล้อม
ในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

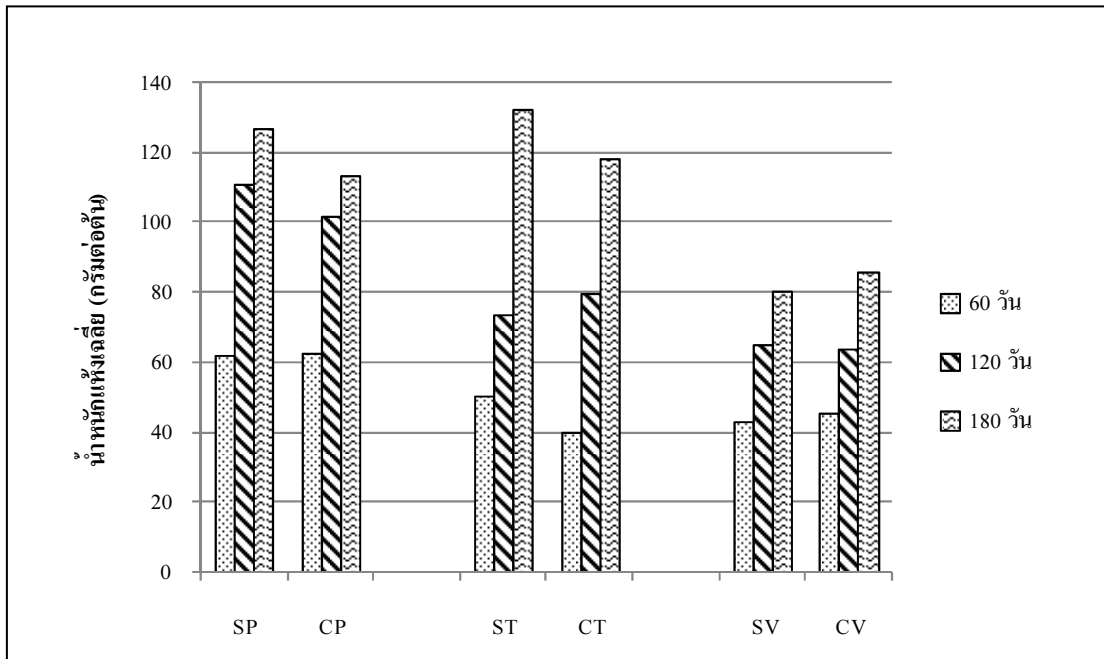
ค่าพารามิเตอร์	ปัจจัยสภาวะแวดล้อมของระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์						
	S	SP	ST	SV	CP	CT	CV
ORP	60.30 \pm 7.14	71.74 \pm 7.22	65.97 \pm 7.04	68.08 \pm 6.87	62.16 \pm 6.01	63.26 \pm 6.14	64.57 \pm 5.35
อุณหภูมิ	27.51 \pm 1.61	27.19 \pm 1.38	27.44 \pm 1.65	27.37 \pm 1.58	27.32 \pm 1.55	27.45 \pm 1.64	27.38 \pm 1.63
pH	9.25 \pm 0.46	9.28 \pm 0.43	9.21 \pm 0.67	9.04 \pm 0.64	9.24 \pm 0.44	9.26 \pm 0.54	9.26 \pm 0.59

หมายเหตุ : S = หินดินดาน
 SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ
 ST = หินดินดาน และ รูปธาตุ
 SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก
 CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ
 CT = กรวด/ทราย และ รูปธาตุ
 CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

4.2.3 ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืช

โดยทั่วไปอัตราการเจริญเติบโตของพืชจะเป็นแบบซิกมอยด์ (Sigmoid growth curve) โดยในช่วงแรกของการเจริญเติบโตจะมีการเจริญเติบโตช้า หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกกระยะการเจริญเติบโตในช่วงนี้ว่า Linear Phase จนมีค่าสูงสุดหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ (เฉลิมพร แซมเพชร, 2535) จากผลการศึกษาของพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดง

ในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นอ้อและรูปฤาษีที่ปลูกในบ่อที่มี หินดินดานเป็นตัวกลางจะมีน้ำหนักมากกว่าพืชชนิดเดียวกันที่เจริญเติบโตอยู่บนตัวกลางกรวดและ ทราย ส่วนหญ้าแฝกพบว่ามีค่าน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกันทั้งในบ่อตัวกลางหินดินดานและบ่อตัวกลาง กรวดและทราย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Drizo et al. (1997) พบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ดิบบนตัวกลางหินดินดาน รวมทั้งมีการพัฒนาระบบรากและลำต้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อ การเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหาร อุณหภูมิ พีเอช และความหนาแน่นของพืช (Kadleck and Knight (2006) พบว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณธาตุอาหาร C : N : P ที่เหมาะสมจะทำให้ พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีและทำให้มีความหลากหลายทางชีวภาพในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ด้วยปริมาณธาตุอาหาร C : N : P ที่เหมาะสมของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีค่าเท่ากับ 106 : 16 : 1 หรือ 41 : 7 : 1 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้สอดคล้องกับการเพิ่มความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ อัตราการเจริญเติบโตของพืชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเริ่มคงที่ เช่นเดียวกับผลการศึกษากการ เจริญเติบโตของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของ Mueleman et al. (2002) ซึ่งพบว่าพืชจะมีการ เจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารในช่วง 0-60 วันอย่างช้า ๆ และมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในช่วง 60-100 วันและจะเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารได้เต็มที่ในช่วง 100-250 วัน ดังนั้นใน งานวิจัยนี้พืชทั้ง 3 ชนิดจะอยู่ในช่วงที่มีการเจริญเติบโตเต็มที่และการสะสมธาตุอาหารสูงสุดและ หลังจากนั้นการเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารจะลดลงและตายในที่สุดในช่วง 270-360 วัน และ ตลอดระยะเวลาการเดินระบบของงานวิจัยนี้พบว่าลักษณะทางกายภาพของพืชทั้ง 3 ชนิดในระบบมี การเจริญเติบโตและแตกหน่อได้ดี และไม่พบความผิดปกติของใบและลำต้นของพืชทั้ง 3 ชนิด และ จากผลของการวัดค่าความสูงของพืชพบว่าพืชทั้ง 3 ชนิดมีการพัฒนาความสูงของลำต้นได้ดี ดังแสดง ในรูปที่ 4.3 (ก)-(ค) (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข.)



รูปที่ 4.2 จำนวนหน้กเลี้ยงของฟิชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



ตารางที่ 4.5 น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชทั้ง 3 ชนิดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

บ่อ	ส่วนพืช	น้ำหนักแห้งเฉลี่ย (กรัมต่อต้น)		
		0-60 วัน	60-120 วัน	120-180 วัน
SP	ต้น	40.4	79.3	89.2
	ราก	21.5	31.4	37.8
	รวม	61.9	110.65	127.0
CP	ต้น	46.9	69.55	73.2
	ราก	15.3	31.85	39.95
	รวม	62.2	101.4	113.15
ST	ต้น	40.8	44.7	88.23
	ราก	9.3	29.0	44.23
	รวม	50.1	73.73	132.46
CT	ต้น	30.6	47.7	75.97
	ราก	8.9	31.75	42.37
	รวม	39.6	79.45	118.34
SV	ต้น	27.7	42.2	52.3
	ราก	15.3	22.9	27.7
	รวม	43.0	65.1	80.0
CV	ต้น	28.8	36.65	56.5
	ราก	16.5	27.35	29.3
	รวม	45.4	64.0	85.8

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

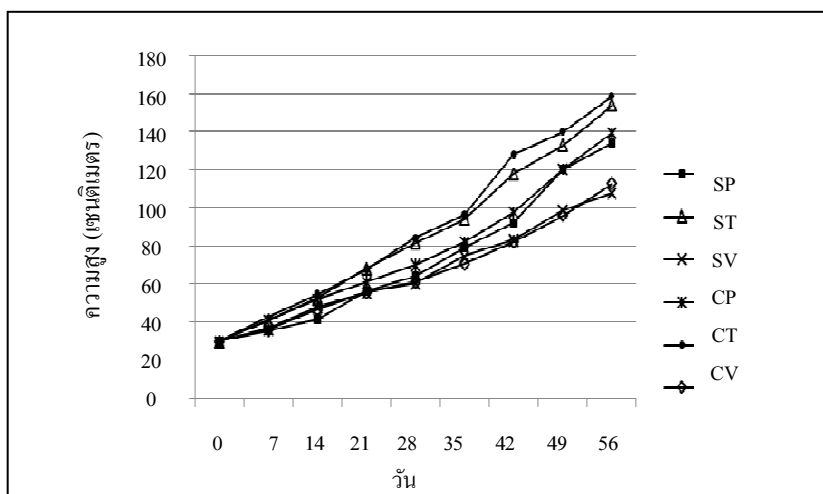
ST = หินดินดาน และ รุปลำยี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

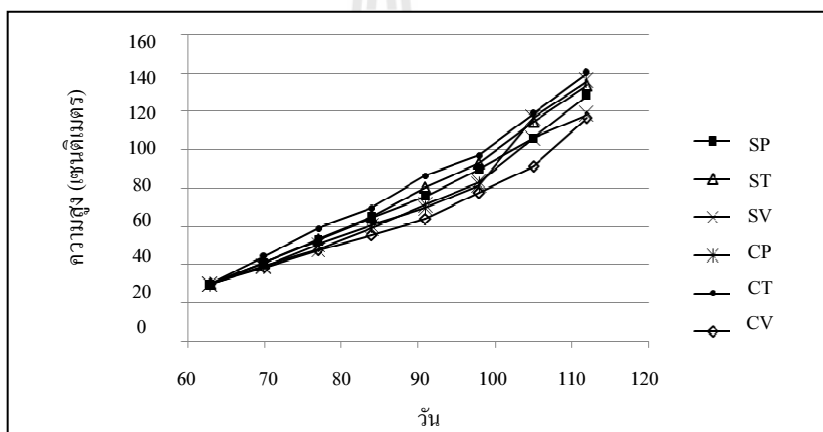
CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ รุปลำยี่

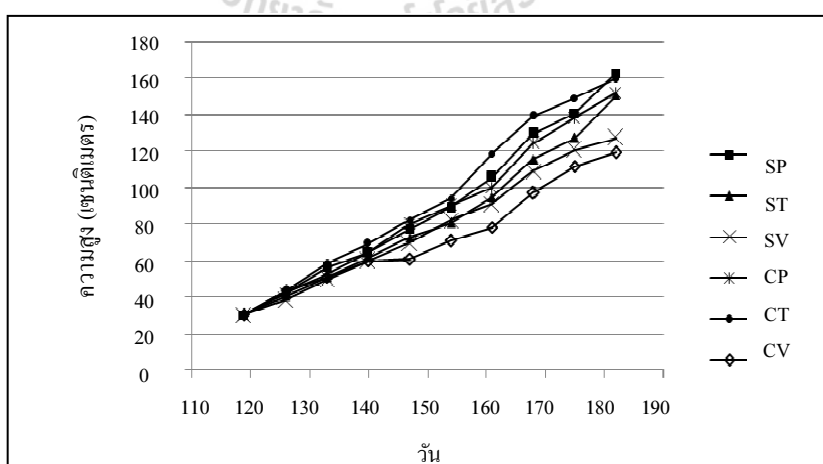
CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก



(ก) ความสูงเฉลี่ยของระยะเวลา 0-60 วัน



(ข) ความสูงเฉลี่ยของพืชระยะเวลา 60-120 วัน



(ค) ความสูงเฉลี่ยของพืชระยะเวลา 120-180 วัน

รูปที่ 4.3 แสดงความสูงเฉลี่ยของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ระยะเวลาตั้งแต่ 0-180 วัน

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

ในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ โดยทำการเดินระบบ 3 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 60 วัน เป็นระยะเวลา 180 วัน และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เข้าและออกจากระบบทุก ๆ 2 วัน

ตารางที่ 4.6 ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่เข้าและออกในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ลักษณะน้ำเสีย	บ่อ	ความเข้มข้นน้ำเข้า			ความเข้มข้นน้ำออก		
		Mean (Max-Min) (mg l ⁻¹) n = 90			Mean (mg l ⁻¹) n = 30		
		0-60 วัน	60-120 วัน	120-180 วัน	0-60 วัน	60-120 วัน	120-180 วัน
ซีโอดี	S	320.15 (285.67-354.63)			75.79	84.77	84.23
	SP				67.14	69.84	68.51
	ST				64.26	68.21	69.68
	SV				77.7	82.12	80.49
	CP				109.83	115.45	115.64
	CT				114.27	126.84	120.96
	CV				126.97	142.11	143.61
ทีเคเอ็น	S	18.28 (15.44-21.12)			8.62	7.28	7.94
	SP				8.02	7.36	7.23
	ST				7.17	6.97	6.80
	SV				8.11	6.68	7.69
	CP				10.07	8.96	10.03
	CT				9.65	8.66	10.45
	CV				9.88	8.99	10.33
ฟอสฟอรัส	S	0-60 วัน	60-120 วัน	120-180 วัน	0.93	3.58	8.08
	SP				0.96	2.67	4.45
	ST	5.04	14.98	28.72	0.83	2.05	3.77
	SV	(4.39-6.41)	(13.29-16.03)	(27.0-31.75)	1.03	3.11	6.77
	CP				1.73	5.00	10.05
	CT				1.71	5.09	9.87
	CV				1.99	5.32	11.06

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ รูปฤาษี

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ รูปฤาษี

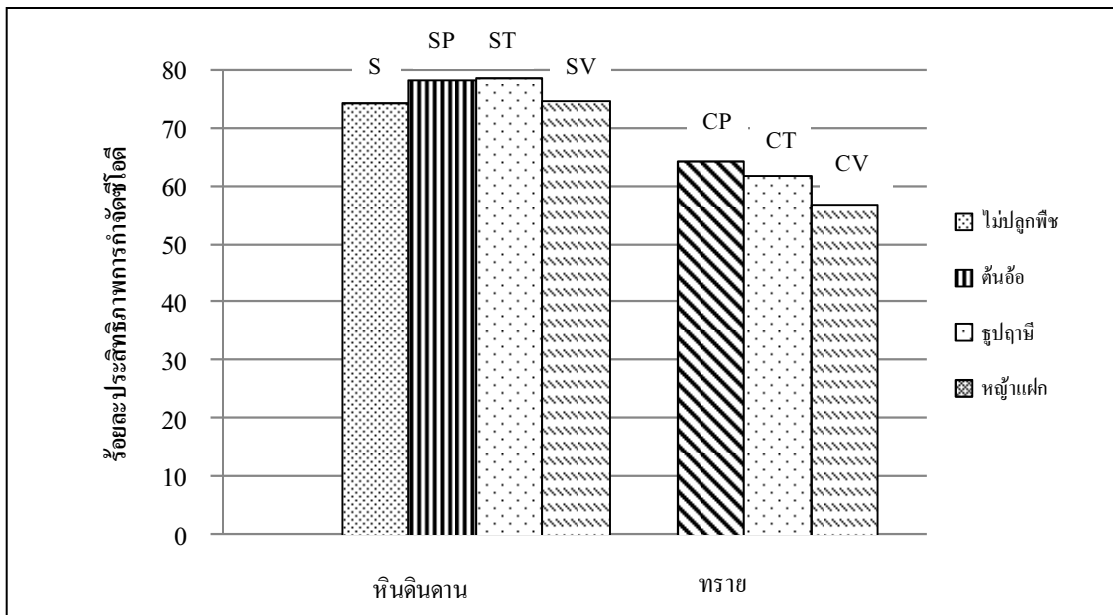
CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

n = จำนวนตัวอย่าง

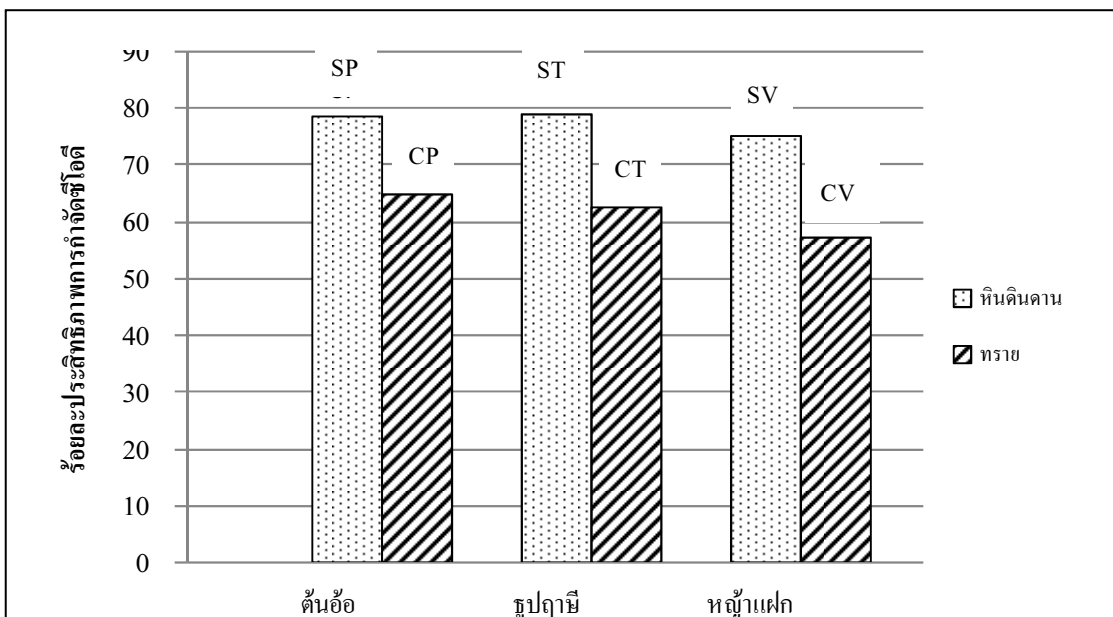
จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าและออกในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัส ของลักษณะน้ำเสียที่เข้าและออกของแต่ละช่วงการเดินระบบนั้น เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบไปทดสอบค่าความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One Way ANOVA พบว่าพบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยมีรายละเอียดการทดสอบค่าดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ค. โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสของระบบตัวกลางกรวดและทรายจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น ส่วนตัวกลางหินดินดานเมื่อนำค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบไปทดสอบค่าความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One Way ANOVA พบว่าไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลจึงเป็นการนำค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 180 วัน มาเปรียบเทียบและนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัด ดังสรุปในตารางที่ 4.7

4.3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางและบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง พบว่าบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางจะมีค่าสูงกว่าบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง และเมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวก ค.) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยของบ่อ S SP ST และ SV ซึ่งมีหินดินดานเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 74.49 78.51 78.92 และ 74.93 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกธูปฤาษี (ST) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด ส่วนบ่อ CP CT และ CV มีกรวดและทรายเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 64.42 62.13 และ 57.01 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกต้นอ้อ (CP) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของตัวกลางต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พารามิเตอร์	ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของบ่อที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน (Mean \pm SD)															
	บ่อ S				บ่อ SP				บ่อ ST				บ่อ SV			
	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย
TP	81.87	75.67	71.88	76.36	81.31	81.77	84.49	82.54	83.63	86	86.88	85.54	79.82	78.82	76.45	78.34
	± 8.69	± 4.48	± 4.58	± 7.34	± 5.37	± 2.72	± 2.53	± 3.94	± 5.62	± 2.29	± 2.32	± 3.89	± 6.88	± 3.40	± 3.91	± 4.98
COD	76.67	73.27	73.69	74.49	64.44	78.01	78.5	78.51	80.09	78.62	78.15	78.92	75.76	74.19	74.89	74.93
	± 6.44	± 0.75	± 1.24	± 3.97	± 8.15	± 1.30	± 2.17	± 3.95	± 5.19	± 2.26	± 1.99	± 3.47	± 5.25	± 1.20	± 2.22	± 3.31
TKN	56.45	58.75	57.19	57.49	56.79	58.34	60.92	58.72	62.25	60.51	63.24	61.98	57.37	62.05	58.39	59.34
	± 5.98	± 6.57	± 3.52	± 5.55	± 4.99	± 4.79	± 3.22	± 4.67	± 5.20	± 6.26	± 4.78	± 5.53	± 6.05	± 2.78	± 3.72	± 4.76

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ รูปถาวยี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ รูปถาวยี่

CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

Run I = ระยะเวลาเดินระบบ 0-60 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Run II = ระยะเวลาเดินระบบ 60-120 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

Run III = ระยะเวลาเดินระบบ 120-180 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ต่อ)

พารามิเตอร์	ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของบ่อที่ใช้ตัวกลางกรวดและทราย (Mean และ SD)											
	บ่อ CP				บ่อ CT				บ่อ CV			
	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย	Run I	Run II	Run III	ค่าเฉลี่ย
TP	65.79	65.89	65.08	65.59	66.01	65.25	65.67	65.63	62.35	63.66	61.57	62.54
	± 9.69	± 7.27	± 6.78	± 7.89	± 8.63	± 6.93	± 5.62	± 7.06	± 12.26	± 7.75	± 8.51	± 9.57
COD	65.82	63.65	63.9	64.42	64.44	60.12	62.03	62.13	61.04	55.12	55.18	57.01
	± 6.88	± 1.81	± 1.78	± 4.13	± 8.15	± 1.90	± 1.38	± 5.05	± 10.39	± 1.01	± 1.27	± 6.47
TKN	47.65	49.04	57.19	48.91	47.51	49.22	60.92	47.51	47.95	50.92	63.24	46.96
	± 5.45	± 7.79	± 3.55	± 7.77	± 6.62	± 6.07	± 3.22	± 5.86	± 6.06	± 8.17	± 4.78	± 6.19

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ ฐปฤายี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ ฐปฤายี่

CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

Run I = ระยะเวลาเดินระบบ 0-60 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Run II = ระยะเวลาเดินระบบ 60-120 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

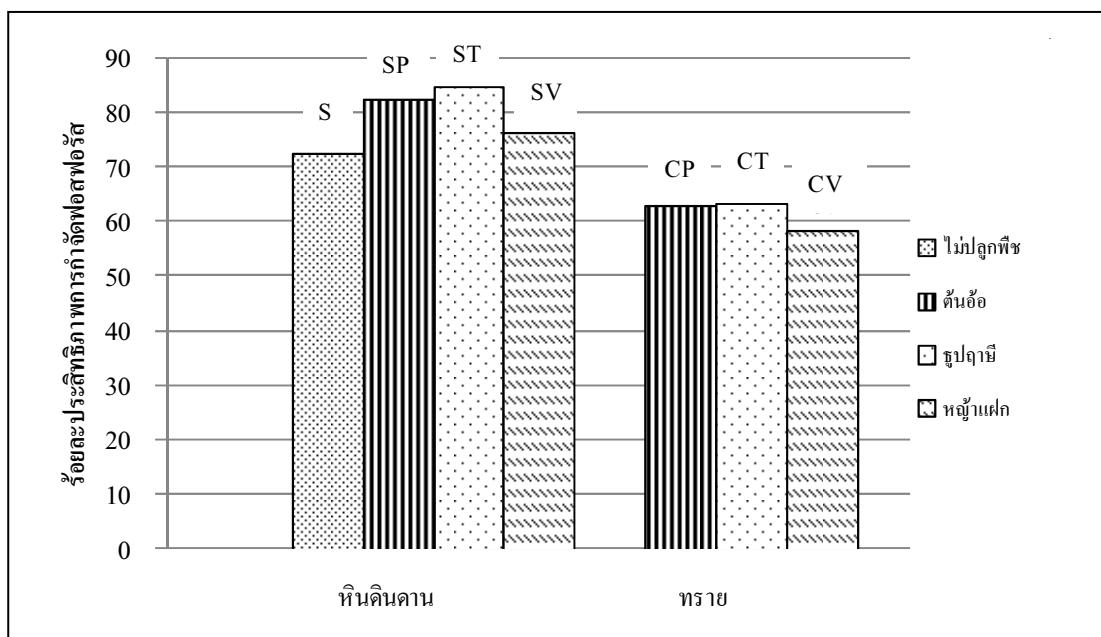
Run III = ระยะเวลาเดินระบบ 120-180 วัน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของบ่อที่ปลูกพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าบ่อที่ปลูกพืชบนตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการศึกษาของ Akratos et al. (2007); Chung et al. (2008) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินทั่วไปซึ่งใช้ทราย กรวด และดิน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 20.00-70.50 และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีดินเหนียวเป็นตัวกลางพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 67.9-73.5 (Kotti et al., 2010) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มี Alum sludge เป็นตัวกลางพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 71.8 ± 10.2 (Babatunde et al., 2010) โดยทั่วไปกลไกในการกำจัดซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในระบบให้เป็นการ์บอนไดออกไซด์และมีเทนให้แก่พืชเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการหายใจระดับเซลล์และสร้างเซลล์เนื้อเยื่อ (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544; Fukao and Bailey-Serres, 2004; Kadleck and Knight, 2006) โดยจะมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในบริเวณรอบ ๆ ราก ซึ่งพืชที่มีความหนาแน่นของรากมากจะปริมาณออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Das and Uchimiya, 2002) นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะทางกายภาพของตัวกลางต่างชนิดกันมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าตัวกลางหินดินดานมีค่าความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าตัวกลางกรวดและทรายจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า เพราะจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและยึดเกาะได้ดี (U.S.EPA., 2000) โดยตัวกลางทรายมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.08 ตารางเมตรต่อกรัม (Prochaska and Zouboulis, 2005) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของหินดินดานในหัวข้อ 4.1.1 พบว่าตัวกลางหินดินดานมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลางหินดินดานในหัวข้อ 4.1.1 พบว่าหินดินดานมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ในช่วง 101.10-769.80 น้อยกว่าตัวกลางกรวดและทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ในช่วง 100.00-1,000.00 เมตรต่อวัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547; Metcalf and Eddy, 2004) ซึ่งตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเพราะมีระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่าทำให้ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบน้อยกว่าตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ (U.S.EPA., 2000)

4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

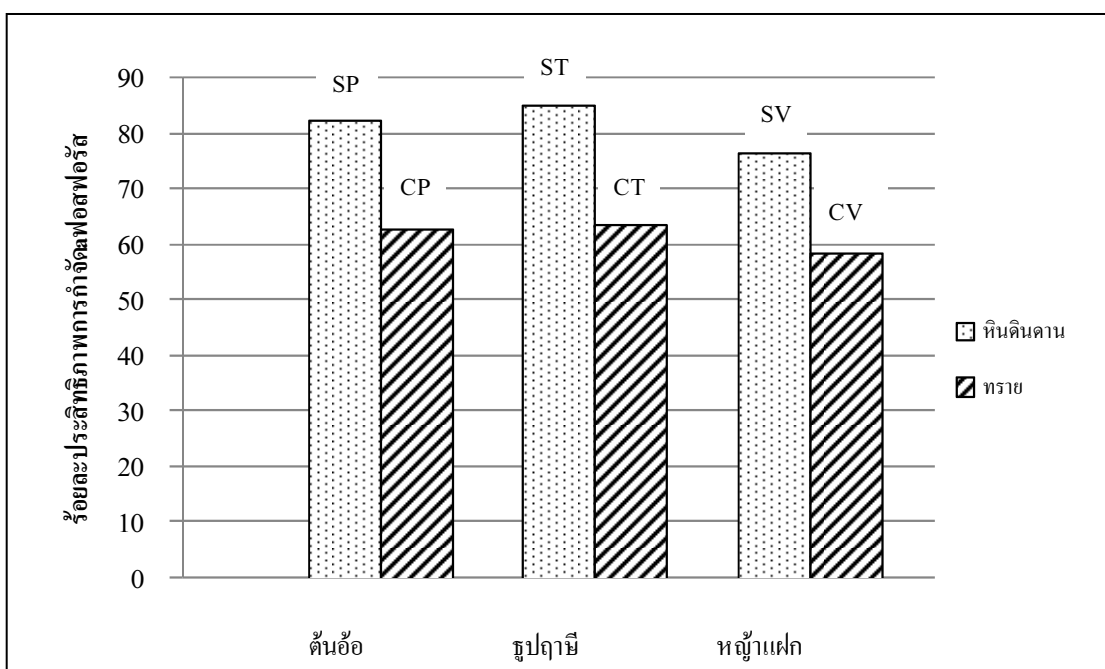
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง และบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง พบว่าบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางจะมีค่าสูงกว่าตัวกลางกรวดและทราย และเมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวก ค.) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยของบ่อ S SP ST และ SV ซึ่งมีหินดินดานเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 76.36 82.54 85.54 และ 78.34 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกหญ้า (ST) มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุด ส่วนบ่อ CP CT และ CV มีกรวดและทรายเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 65.59 65.63 และ 62.54 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกหญ้า (CT) มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงที่สุดเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลางต่างชนิดกัน

และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของบ่อที่ปลูกพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าบ่อที่ปลูกพืชบนตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจากผลการศึกษาที่ผ่านมาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั่วไปจะมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 20-60 (Christos et al., 2006; Vymaza et al., 2007; Kotti et al., 2010) ซึ่งจากผลการศึกษานี้จะเห็นว่าบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยทั่วไปซึ่งใช้กรวดและทรายเป็นตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน

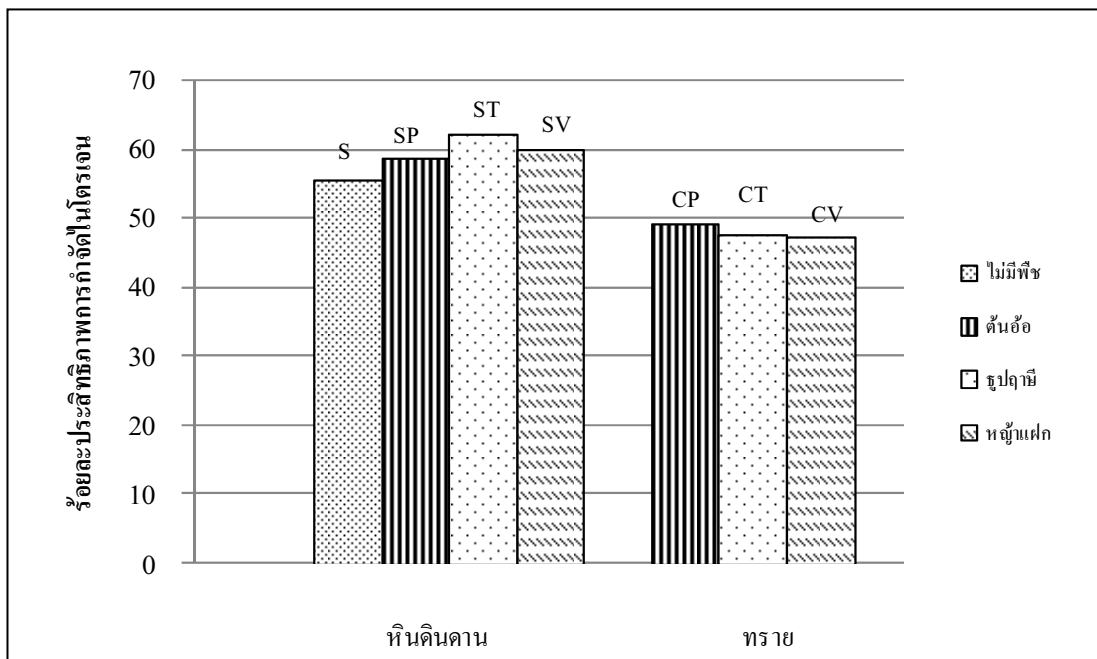
กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ตัวกลาง โดยการตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดซับผิว และการตกตะกอนกับเหล็ก ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์บนผิวของตัวกลางหินดินดาน (Drizo et al., 1999; Bubba et al., 2003; Forbes et al., 2005) ดังนั้นกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสสำหรับในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินของตัวกลางหินดินดานนี้ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการดูดซับระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานกับฟอสฟอรัส โดยทั่วไปฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางตามลำดับดังต่อไปนี้ $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ (Wu et al., 2006) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9-12

โดยส่วนใหญ่จะพบฟอสฟอรัสอยู่ในรูป HPO_4^{2-} และเป็นช่วงพีเอชที่ออร์โทฟอสเฟตจะเกิดการสร้างพันธะได้ค้ำกับซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม โดยเกิดการตกตะกอนเป็นแคลเซียมฟอสเฟต (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ, 2547; Qualls and Richardson, 1995; Kim et al., 2006) การเกิดกระบวนการดูดซับและตรึงฟิวกับแคลเซียมคาร์บอเนต และตกตะกอนกับ calcareous algae ได้สารประกอบ $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ และ CaHPO_4 (Karageorgiou et al., 2007) โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนแมกนีเซียมจะเกิดการสร้างพันธะกับฟอสฟอรัสที่ผิวหน้าของตัวกลางในลักษณะหลายชั้นและไม่เป็นระเบียบ (Koiv et al., 2010) โดยมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในสมการที่ 4.3 จากการศึกษาของ Sovik et al. (2003) พบว่าหินดินดานจะสามารถสร้างพันธะกับแคลเซียมคิดเป็นร้อยละ 37-57 สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมคิดเป็นร้อยละ 8-23 และสร้างพันธะกับธาตุอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 1.4-3 ของการสร้างพันธะกับฟอสฟอรัสทั้งหมด และจากผลการศึกษาของ Babatunde and Zhao (2009) พบว่าฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับแคลเซียมและแมกนีเซียมทำให้ได้รูปที่เสถียรกว่า และไม่เกิดการย่อยสลายได้ง่าย เมื่อเทียบกับฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพบว่าในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีตัวกลางซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วย เฟอร์ริกออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มีแนวโน้มที่จะมีอายุการใช้งานที่นานกว่าระบบที่ใช้ตัวกลางทั่วไป เช่น กรวด ทรายและดินถึง 4 เท่า (Drizo et al., 1999) จากผลการศึกษาของ Prochasha and Zouboulis (2006) พบว่าทรายมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย ซิลิกอนร้อยละ 14.00 เหล็กร้อยละ 2.42 อะลูมิเนียมร้อยละ 2.50 แคลเซียมร้อยละ 2.48 และแมกนีเซียมร้อยละ 0.50 ตามลำดับ ส่วนกรวดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย ซิลิกอนร้อยละ 18 เหล็กร้อยละ 2.60 อะลูมิเนียมร้อยละ 3.00 แคลเซียมร้อยละ 3.50 และแมกนีเซียมร้อยละ 0.70 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานในหัวข้อ 4.1.2 พบว่าหินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบไปด้วยเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในปริมาณที่มากกว่ากรวดและทรายจึงส่งผลให้หินดินดานมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่ากรวดและทราย นอกจากนี้ยังพบว่าพืชที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อสูงจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สูงด้วย (Fraser et al., 2004)



4.3.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางและบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง พบว่าบ่อที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางจะมีค่าสูงกว่าตัวกลางกรวดและทราย และเมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวก ค.) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยของบ่อ S SP ST และ SV ซึ่งมีหินดินดานเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 57.49 58.72 61.98 และ 59.34 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกหญ้า (ST) มีประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นสูงสุด ส่วนบ่อ CP CT และ CV มีกรวดและทรายเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับร้อยละ 48.91 47.51 และ 46.96 ตามลำดับ โดยบ่อที่ปลูกต้นอ้อ (CP) มีประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นสูงสุด

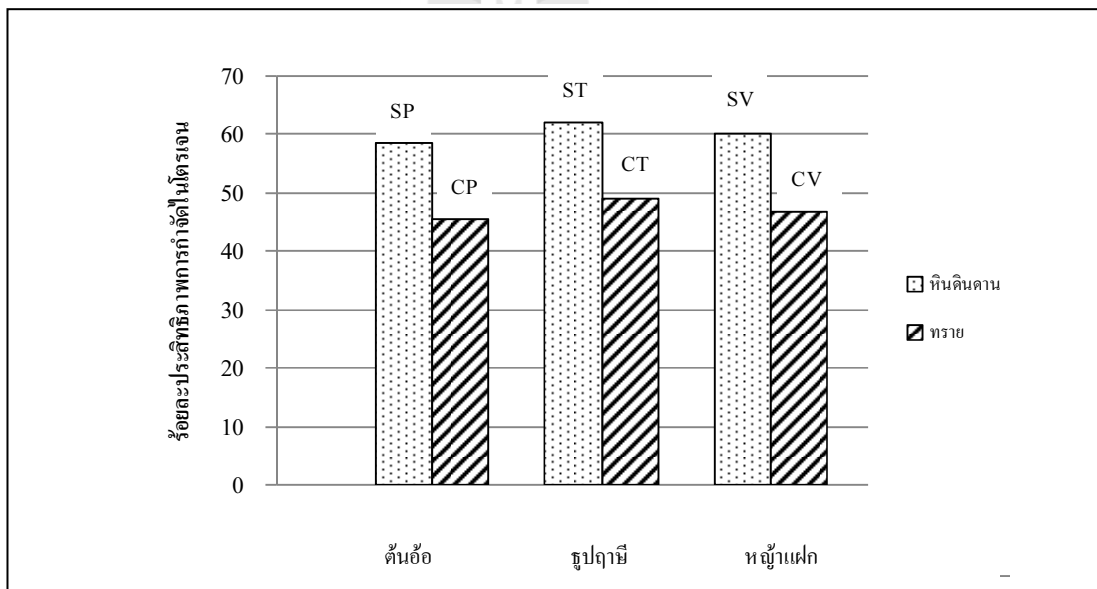


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักไนโตรเจนที่เคเอ็นของตัวกลางต่างชนิดกัน

และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกักไนโตรเจนของบ่อที่ปลูกพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าบ่อที่ปลูกพืชบนตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพการกักไนโตรเจนสูงกว่าบ่อที่มีกรวดและทรายเป็นตัวกลาง และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประสิทธิภาพการกักไนโตรเจนของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดิน โดยทั่วไปที่ใช้ตัวกลางคือ ทราย กรวด และดิน พบว่ามีประสิทธิภาพการกักอยู่ในช่วงร้อยละ 27.00-60.30 (Zurita et al., 2009; Greenway et al., 2002; Akratos et al., 2007) โดยกลไกหลักในการกักไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินจะเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนมาเป็นแอมโมเนียในโตรเจน และเกิดการย่อยสลายจากแอมโมเนียในโตรเจนมาเป็นไนเตรตโดย Nitrifying bacteria ในสถานะที่มีออกซิเจน จากนั้นไนเตรตจะถูกพืชดูดซึมขึ้นไปใช้ในการเจริญเติบโต (Gottschall et al., 2007) พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของ Nitrifying bacteria โดยการส่งผ่านออกซิเจนผ่านทางบริเวณรากไปยังจุลินทรีย์ที่อาศัยในรูพรุนของตัวกลาง เรียกว่า Root zone effect ซึ่งจะทำให้สถานะของระบบมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณออกซิเจนในระบบกว่าร้อยละ 90 และมีการส่งผ่านออกซิเจนมาทางรากของพืช (Reddy et al., 1989; Brix, 1997; Scholz, 2006;

Kadleck and Knight, 2006) ซึ่งจากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลางหินดินดานมีค่าความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าตัวกลางกรวดและทรายจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงกว่า เพราะจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและพืชสามารถยึดเกาะได้ดี (U.S.EPA., 2000) โดยผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของหินดินดานในหัวข้อ 4.1.1 พบว่าตัวกลางหินดินดานมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าตัวกลางทรายซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.08 ตารางเมตรต่อกรัม (Prochaska and Zoubulis, 2006) นอกจากการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่เกิดจากจุลินทรีย์แล้ว ยังเกิดการดูดซับของแอมโมเนียมไนโตรเจนกับตัวกลางโดยไอออนบวก (Adsorption of Cation) โดยจะเกิดการดูดซับกับอนุภาคตัวกลางที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบ โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของตัวกลางจะทำการยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่น (ปัทมา วิทยากร, 2533) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาเก็บกักนานและตัวกลางมีค่าความพรุนสูง มีอัตราการไหลของระบบต่ำ จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น พบว่าหินดินดานที่มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 35 มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนได้สูงสุดเท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของพืชชนิดเดียวกันแต่ตัวกลางต่างกัน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัส และทีเคเอ็นของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นจะสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง ซึ่งจากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลางหินดินดานนั้นพบว่ามีความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นสูงกว่าตัวกลางกรวดและทราย เนื่องจากสามารถเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ซึ่งกลไกในการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นจะอาศัยจุลินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นจะสัมพันธ์กับลักษณะทางเคมีของตัวกลาง เนื่องจากกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดการตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดติดผิว และการตกตะกอนระหว่างออร์โธฟอสเฟตกับองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางซึ่งตัวกลางหินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลเซียม อะลูมิเนียม เหล็กและแมกนีเซียม มากกว่าตัวกลางกรวดและทรายจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า

4.4 ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

4.4.1 ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลาง

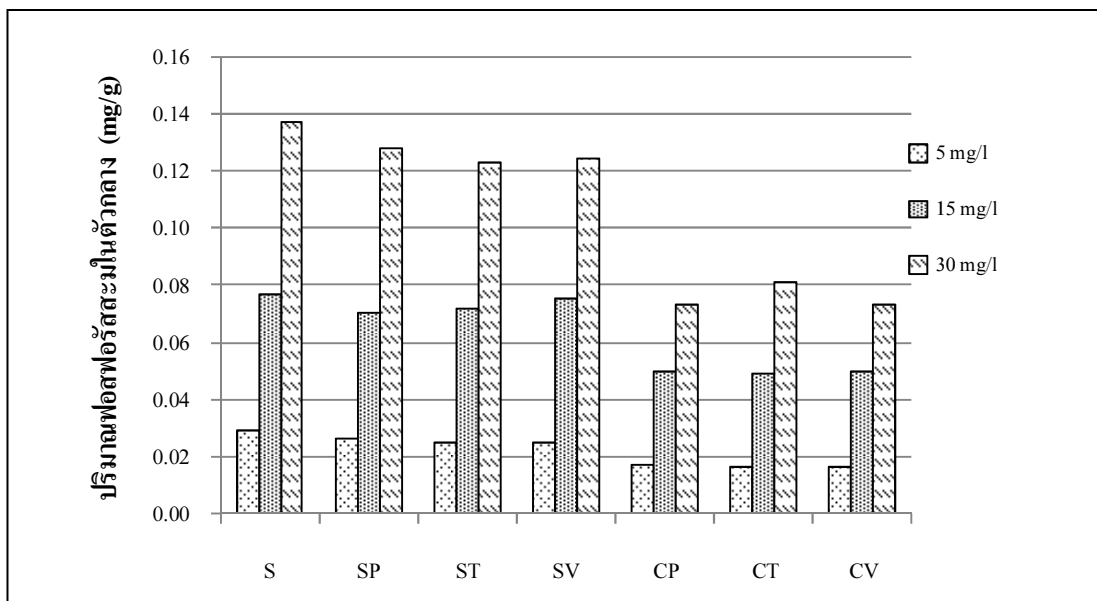
จากผลการศึกษาหาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยการเก็บตัวอย่างหินดินดานก่อนและหลังเสร็จสิ้นการเดินระบบของแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส ดังแสดงในตารางที่ 4.8 (รายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวก ง.) โดยตัวกลางหินดินดานในระบบมีปริมาณเท่ากับ 372.8 กิโลกรัมต่อบ่อและตัวกลางกรวดและทรายในระบบมีปริมาณเท่ากับ 362.0 กิโลกรัมต่อบ่อ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดานของระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าบ่อ S ซึ่งเป็นชุดควบคุม (ตัวกลางหินดินดานและไม่ปลูกพืช) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมสูงสุดในตัวกลางหินดินดานที่อัตราการระปรมาณฟอสฟอรัสเข้าระบบ เท่ากับ 3.83 11.75 และ 22.98 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อแสกเมตรต่อวัน มีค่าเท่ากับ 0.029 0.077 และ 0.137 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนชุดทดลอง (ตัวกลางหินดินดานและปลูกพืช) ได้แก่ บ่อ SP (ตัวกลางหินดินดานและปลูกอ้อ) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดานมีค่าเท่ากับ 0.026 0.070 และ 0.128 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ บ่อ ST (ตัวกลางหินดินดานและปลูกธูปฤาษี) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดานมีค่าเท่ากับ 0.024 0.071 และ 0.122 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และบ่อ SV (ตัวกลางหินดินดานและปลูกหญ้าแฝก) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดานมีค่าเท่ากับ 0.024 0.075 และ 0.124 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบชุดทดลองและชุดควบคุม จะพบว่าปริมาณการ

สะสมฟอสฟอรัสของตัวกลางหินดินดานในชุดทดลองมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุม เนื่องมาจากกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบที่ปลูกพืช โดยพืชจะมีการดึงเอาฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในตัวกลางไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อ (Lantzeke et al., 1999) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีตัวกลางต่างชนิดกันแต่ปลูกพืชชนิดเดียวกัน พบว่าในตัวกลางหินดินดานมีปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสสูงกว่าตัวกลางกรวดและทรายประมาณ 1.5 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สนับสนุนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส โดยจะพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดานจะสูงสุดในบ่อ ST ซึ่งปลูกธูปฤาษี ขณะเดียวกันผลประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของบ่อ ST จะสูงกว่าบ่อ SP และ SV

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลาง

บ่อ	ค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลาง (mg P g^{-1})		
	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 5 mg l^{-1}	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 15 mg l^{-1}	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 30 mg l^{-1}
S	0.029	0.077	0.137
SP	0.026	0.070	0.128
ST	0.024	0.071	0.122
SV	0.024	0.075	0.124
CP	0.017	0.049	0.073
CT	0.016	0.049	0.081
CV	0.016	0.049	0.073

หมายเหตุ : S = หินดินดาน
 SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ
 ST = หินดินดาน และ ธูปฤาษี
 SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก
 CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ
 CT = กรวด/ทราย และ ธูปฤาษี
 CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก



รูปที่ 4.10 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางของทราย กรวด มีค่าเท่ากับ 0.020-0.129 และ 0.0077-0.0225 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Prochaska et al., 2005; Seo et al., 2005) และการดูดซับของฟอสฟอรัสของตัวกลางอื่น เช่น จากการศึกษาของ Chen et al. (2006) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับฟอสฟอรัสที่พีเอชต่างกันของซีโอไลท์โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir ในการอธิบาย พบว่าซีโอไลท์มีค่าความสามารถดูดซับฟอสฟอรัสมีค่าเท่ากับ 0.01–0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาของ Kvarnström et al. (2004) พบว่าทรายละเอียด iron-rich มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.138 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม และ Light Weight มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.276 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในตัวกลางส่วนใหญ่จะถูกสะสมในรูปสารอนินทรีย์ฟอสเฟต และเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ทันที และจากการศึกษาของ Lantzke et al. (1999) พบว่าในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในช่วงแรกจะเกิดขึ้นที่ตัวกลาง หลังจากนั้นจุลินทรีย์จึงจะทำการย่อยสลายฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ อมรา ดาวไชสง (2550) พบว่าการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานสามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (K_p) ของหินดินดานมีค่าอยู่ในช่วง 7.07×10^{-3} -2.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่า X_m ของหินดินดานมีค่าอยู่ในช่วง 0.051-0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม และหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับ

ออร์โทฟอสเฟต ได้คืทีพีเอชมากกว่า 6 ขงยุทธ โอสดสภา และคณะ (2541) กล่าวว่ในช่วพีเอช 7-10 ฟอสฟอรัสจะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับกับซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม จากผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยซิลิกอน ไดออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ จึงมีความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับฟอสฟอรัส

จากการศึกษาของ Drizo et al. (1997) ได้มีการคาดการณ์อายุการใช้งานของหินดินดานที่นำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ว่าสามารถนำมาใช้งานระบบได้สูงถึง 20 ปี ซึ่งนานกว่าระบบที่ใช้ตัวกลางทั่วไป เช่น กรวด ททรายและดินถึง 4 เท่า ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แ่ระบบเมื่อเดินระบบได้ 2-3 ปี อาจทำการเปลี่ยนเอาตัวกลางส่วนบนสุดของบ่อ (Top soil) ใหม่ เพราะในบริเวณนี้จะเกิดการทับถมของซากพืชและสิ่งมีชีวิตซึ่งจะทำให้ตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสลดลง

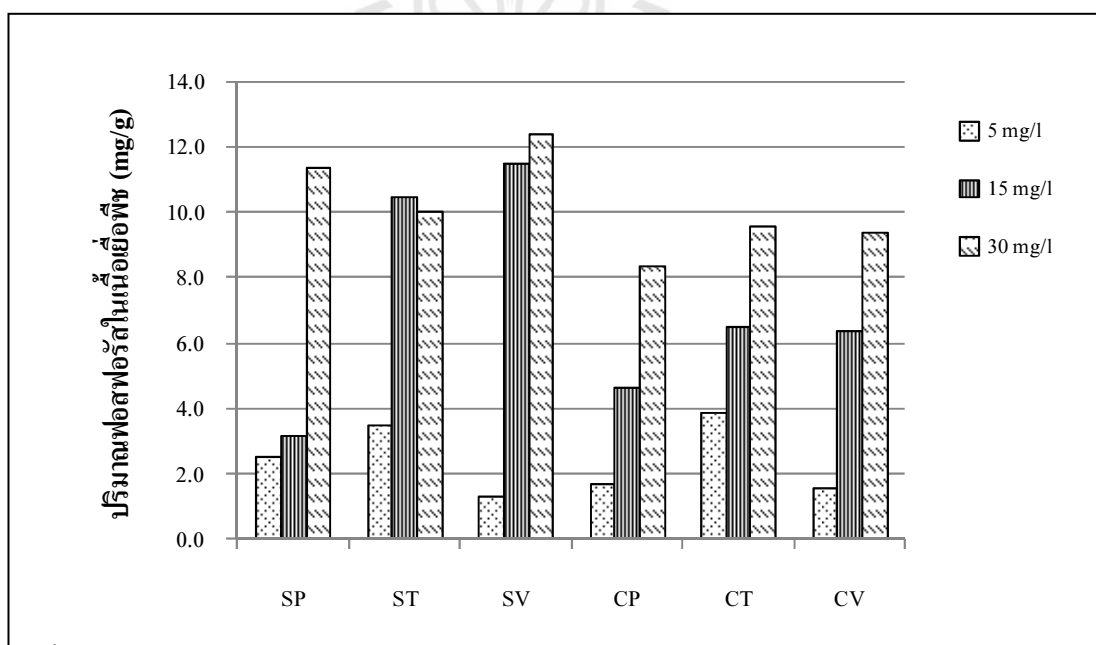
4.4.2 ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช

จากผลการศึกษาหาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยการเก็บตัวอย่างพืชมาวิเคราะห์หลังเสร็จสิ้นการเดินระบบของแต่ละช่วงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ โดยแต่ละบ่อจะปลูกพืชจำนวน 17 ต้น พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชของตัวกลางหินดินดานของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าบ่อ ST ซึ่งปลูกธูปฤาษีมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืชสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืชทั้ง 3 ชนิด โดยที่ระยะเวลาเดินระบบ 60 วัน 120 วัน และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 66.70 330.89 และ 921.97 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้น ตามลำดับ บ่อ SP ซึ่งปลูกอ้อมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืชเท่ากับ 79.52 227.37 และ 674.27 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้น ในระยะเวลาที่เดินระบบ 60 วัน 120 วัน และ 180 วัน ตามลำดับ และบ่อ SV ซึ่งปลูกหญ้าแฝกมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืชเท่ากับ 28.06 204.63 และ 479.40 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้นในระยะเวลาที่เดินระบบ 60 วัน 120 วัน และ 180 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และจะเห็นว่าผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชจะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยบ่อ ST ซึ่งเป็นบ่อที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง และเมื่อพิจารณาน้ำหนักแห้งในช่วง 0-120 วัน พบว่าเรกน้ำหนักแห้งของธูปฤาษีจะน้อยกว่าต้นอ้อ แต่เมื่อเดินระบบจนครบ 180 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่พืชกำลังเข้าสู่อัตราการเจริญเติบโตคงที่นั้นพบว่าน้ำหนักแห้งของธูปฤาษีมีค่ามากกว่าต้นอ้อ

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืช

ป๋อ	ค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืช (mg P plant ⁻¹)		
	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 5 mg l ⁻¹	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 15 mg l ⁻¹	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 30 mg l ⁻¹
SP	79.52	227.37	674.27
ST	66.70	330.89	921.97
SV	28.06	204.63	479.40
CP	41.56	201.08	518.93
CT	58.27	246.85	523.31
CV	30.99	175.70	378.96

หมายเหตุ : S = หินดินดาน
 SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ
 ST = หินดินดาน และ ฐูปถายี
 SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก
 CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ
 CT = กรวด/ทราย และ ฐูปถายี
 CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก



รูปที่ 4.11 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

และจากผลการศึกษาของ Yousefi Z., and Mohseni (2010) พบว่าพืชมีส่วนช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบคิดเป็นช่วงร้อยละ 3-12 ในรูปออร์โทฟอสเฟตและช่วงร้อยละ 7.4-9 ในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปออร์โทฟอสเฟตและสารประกอบพวกแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และ CaHPO_4 เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (Kvamstrom et al., 2004) โดยพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยส่วนใหญ่จะมีอายุอยู่ในช่วง 1-2 ปี (Kadlec and Knight, 1996; Gottschall et al., 2007) และจากรูปที่ 4.11 จะพบว่าการสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อของธูปฤาษีและหญ้าแฝกมีการสะสมฟอสฟอรัสสูงที่ระยะเวลาเดินระบบ 120 วัน และ 180 วัน ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่วัสดุควรตัดพืชทั้ง 2 ชนิด เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 3-4 เดือน ส่วนต้นอ้อมีปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสสูงที่ระยะเวลาเดินระบบ 180 วัน ดังนั้นเมื่อเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระยะเวลาประมาณ 4-5 เดือน จึงทำการตัดต้นอ้อเพื่อให้พืชได้มีการดึงเอาฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโต

4.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสมดุลมวลสาร

จากผลการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร พบว่าในระบบที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลางคิดเป็นร้อยละ 68.41-99.71 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยระบบ และถูกสะสมในรูปเนื้อเยื่อพืชคิดเป็นร้อยละ 4.58-20.27 และปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกสะสมในรูปอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 0.14-13.33 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 (ก)-(ค) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง.) และรูปที่ 4.12 4.13 4.14 และ 4.15 ส่วนระบบที่ใช้กรวดและทรายเป็นตัวกลางมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลางกรวดและทรายคิดเป็นร้อยละ 50.50-86.02 ปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืชคิดเป็นร้อยละ 7.31-18.56 และปริมาณฟอสฟอรัสในรูปอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 6.68-29.96 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่ากลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะถูกกำจัดที่ตัวกลางเป็นส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 50 ทั้งระบบที่มีหินดินดานและกรวดและทรายเป็นตัวกลาง โดยตัวกลางหินดินดานจะมีสัดส่วนในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าตัวกลางกรวดและทรายประมาณ 1.5 เท่า กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบอาจเกิดการตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของฟอสฟอรัสและโลหะซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางผ่านกระบวนการ การดูดซับ และการตกตะกอน (Zhu et al., 1997) ส่วนกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของพืชทั้ง 3 ชนิดในระบบนั้นพบว่าปริมาณร้อยละการสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชในระบบคิดเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่าปริมาณร้อยละการสะสมฟอสฟอรัสในตัวกลาง ถึงแม้ว่าในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกพืช 3 ชนิดที่มีปริมาณร้อยละการสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันก็ตาม

ตารางที่ 4.10 (ก) สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน
 ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
 (ระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน)

บ่อ	ฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ		ฟอสฟอรัสออกระบบ		พืช		ตัวกลาง		รูปอื่น ๆ	
	g		g	%	g	%	g	%	g	%
S	13.09		2.31	82.35	0.00	0.00	10.77	99.86	0.02	0.14
SP	13.09		1.98	84.87	1.35	12.16	9.61	86.45	0.15	1.39
ST	13.09		2.02	84.57	1.13	10.24	8.97	80.99	0.97	8.78
SV	13.09		2.95	77.46	0.48	4.58	8.98	86.14	0.97	9.28
CV	13.09		5.31	59.43	0.53	7.31	6.20	86.02	0.48	6.68
CT	13.09		4.48	65.78	0.99	11.42	5.91	68.11	1.78	20.47
CP	13.09		3.97	69.67	0.71	8.41	5.87	69.84	1.83	21.74

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ ฐปฤายี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ ฐปฤายี่

CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

ตารางที่ 4.10 (ข) สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน
 ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
 (ระยะเวลาการเดินระบบ 120 วัน)

บ่อ	ฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ		ฟอสฟอรัสออกระบบ		พืช		ตัวกลาง		รูปอื่น ๆ	
	g		g	%	g	%	g	%	g	%
S	39.95		9.62	75.92	0.00	0.00	28.39	93.59	1.94	6.41
SP	39.95		7.08	82.28	3.52	10.71	25.83	78.60	3.51	10.69
ST	39.95		5.46	86.32	5.64	16.36	26.34	76.38	2.50	7.26
SV	39.95		8.31	79.20	2.95	9.33	27.71	87.59	0.98	3.09
CV	39.95		13.70	65.71	2.96	11.29	18.31	69.73	4.98	18.98
CT	39.95		13.23	66.87	4.70	17.59	17.99	67.35	4.02	15.06
CP	39.95		13.02	67.40	2.62	9.73	18.29	67.92	6.02	22.36

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ ฐปฤายี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ ฐปฤายี่

CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก

ตารางที่ 4.10 (ค) สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
(ระยะเวลาการเดินระบบ 180 วัน)

บ่อ	ฟอสฟอรัส ที่เข้าระบบ	ฟอสฟอรัสออก ระบบ		พืช		ตัวกลาง		รูปอื่น ๆ	
	g	g	%	g	%	g	%	g	%
S	75.84	20.75	72.64	0.00	0.00	50.61	91.87	4.48	8.13
SP	75.84	11.35	85.03	11.49	17.82	47.19	73.17	5.81	9.01
ST	75.84	9.65	87.27	12.09	18.26	45.28	68.41	8.82	13.33
SV	75.84	17.51	76.91	12.09	20.72	45.80	78.51	0.45	0.77
CV	75.84	28.08	62.97	6.44	13.49	27.00	56.55	14.31	29.96
CT	75.84	25.23	66.74	8.08	15.97	29.91	59.09	12.62	24.94
CP	75.84	24.63	67.52	9.50	18.56	27.91	54.50	13.79	26.94

หมายเหตุ : S = หินดินดาน

SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

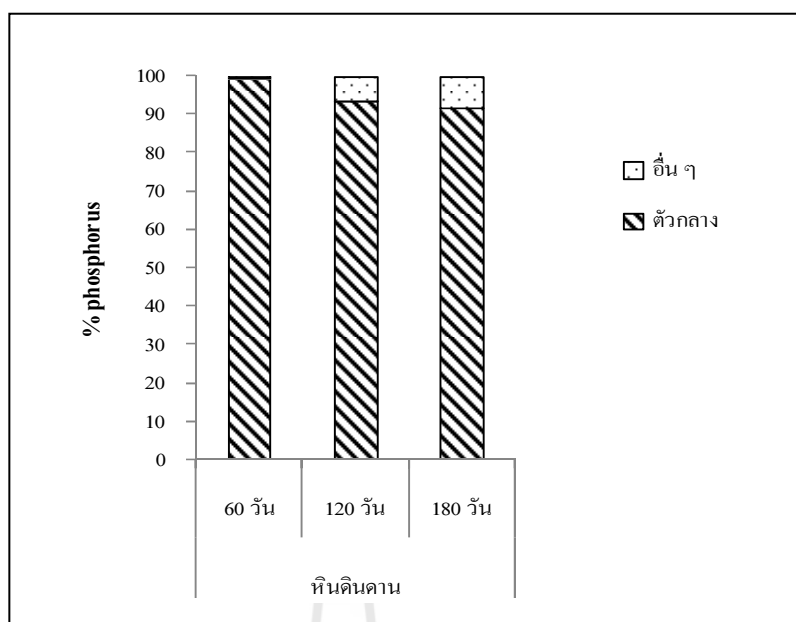
ST = หินดินดาน และ รูปลำไย

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

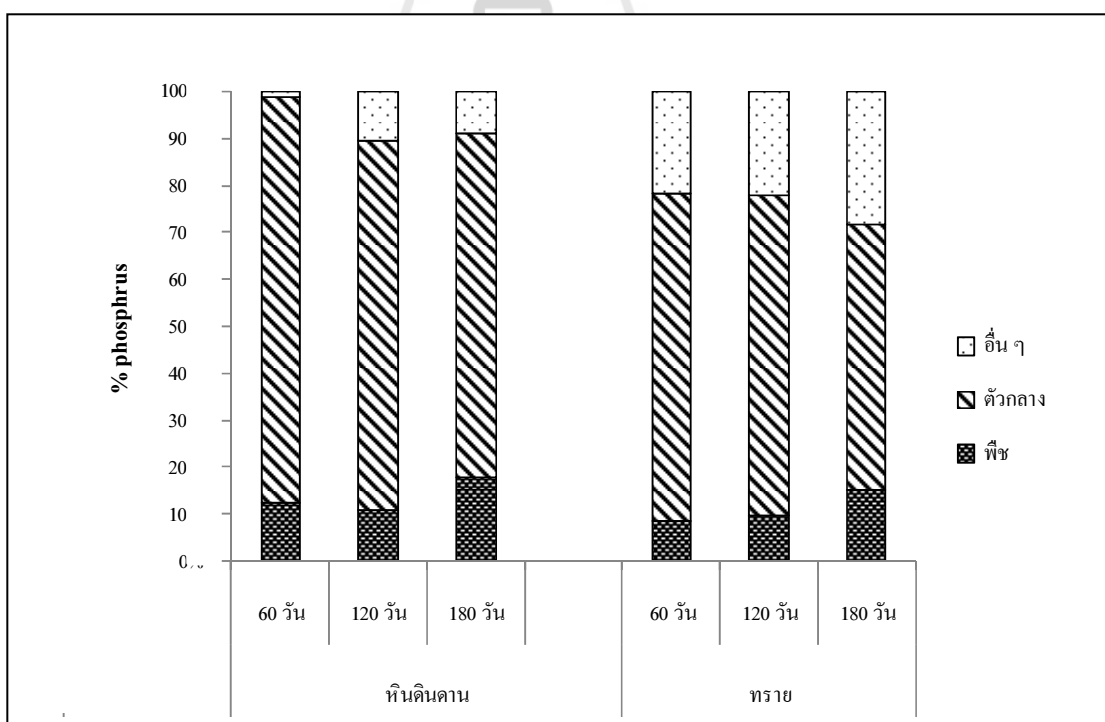
CP = กรวด/ทราย และ ต้นอ้อ

CT = กรวด/ทราย และ รูปลำไย

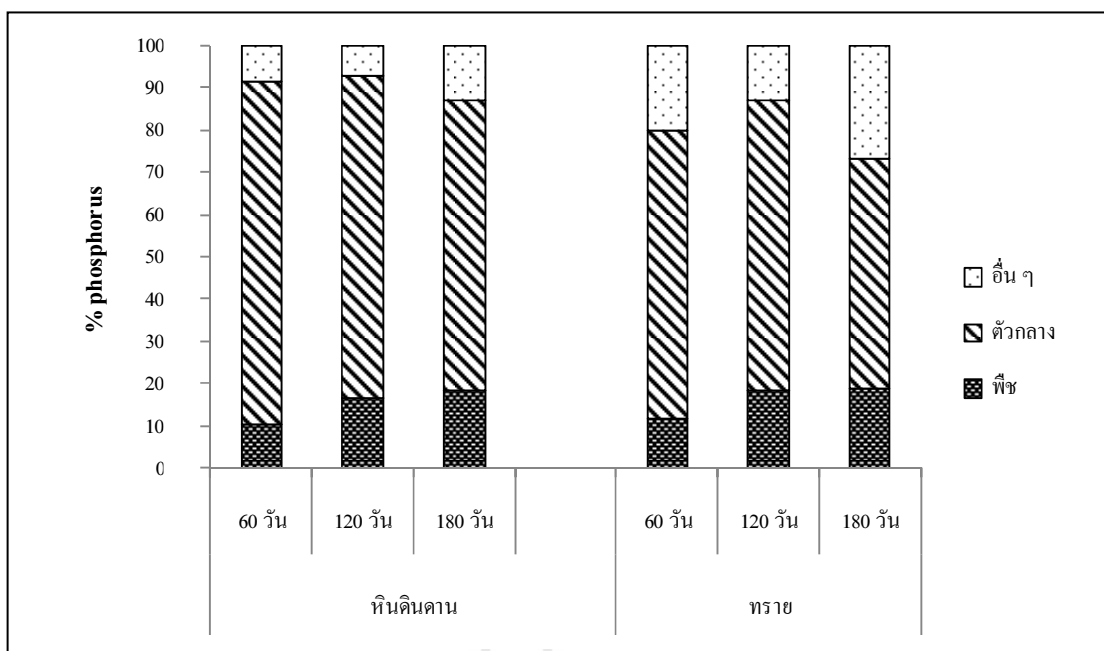
CV = กรวด/ทราย และ หญ้าแฝก



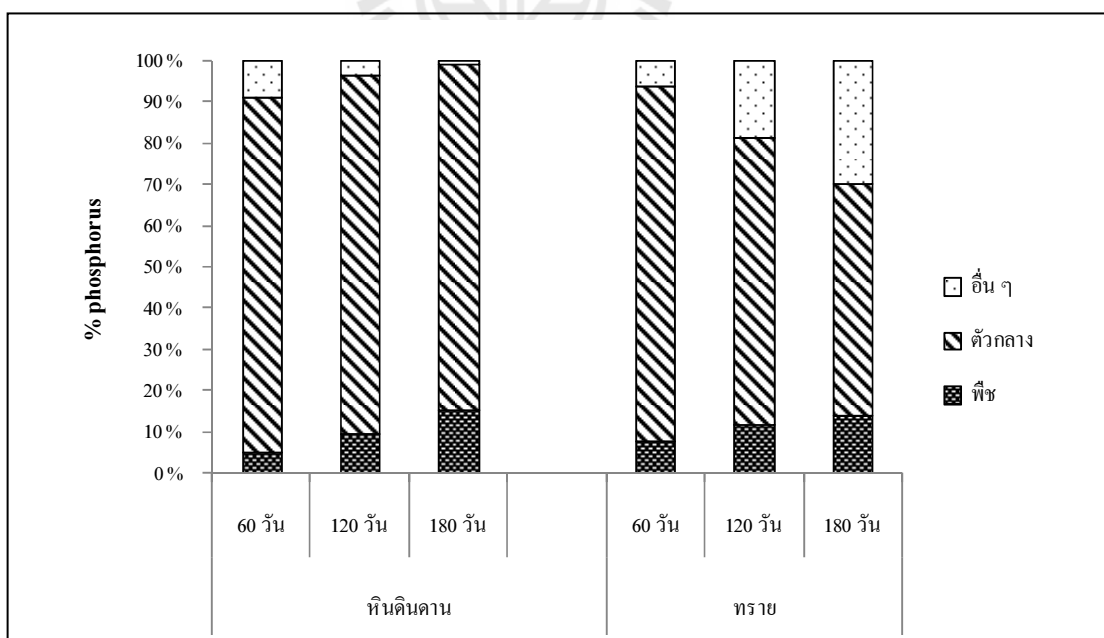
รูปที่ 4.12 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบที่ไม่ปลูกพืชโดยใช้ตัวกลางหิ้งดินดาน (บ่อ S)



รูปที่ 4.13 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูกต้นอ้อ โดยตัวกลางหิ้งดินดาน (บ่อ SP) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CP)



รูปที่ 4.14 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูก กล้วยไม้
โดยตัวกลางหินดินดาน (บ่อ ST) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CT)



รูปที่ 4.15 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบในระบบที่ปลูกหญ้าแฝก
โดยตัวกลางหินดินดาน (บ่อ SV) และตัวกลางกรวดและทราย (บ่อ CV)

ในช่วงระยะเวลาการเดินระบบ 60 วันแรก การสะสมปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชมีการสะสมในปริมาณไม่มาก เนื่องจากการเจริญเติบโตแบบ Minimum percentage เป็นระยะเริ่มต้นของการเจริญเติบโต เมื่อระยะเวลาการเดินระบบผ่าน 120 วัน จะพบว่าพืชมีปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชเพิ่มมากขึ้น เพราะพืชมีความต้องการธาตุอาหารเพิ่มขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตเนื่องจากเป็นช่วงที่พืชกำลังเข้าสู่ Poverty adjustment และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 180 วัน พบว่าร้อยละปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชสูงสุดและเข้าสู่สมดุลเนื่องจากพืชมีการเจริญเติบโตแสดงว่าพืชที่การเจริญเติบโตเต็มที่ ส่วนร้อยละการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดาน พบว่าจากการเดินระบบ 60 วัน มีร้อยละปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นเวลา 120 วัน พบว่าร้อยละฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในตัวกลางกรวดและทรายจะลดลงมากกว่าในตัวกลางหินดินดานซึ่งลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากพืชในระบบมีการดึงเอาฟอสฟอรัสบางส่วนไปใช้ในการเจริญเติบโตและพื้นที่ว่างในการดูดซับในตัวกลางลดลง และเมื่อเวลาผ่านไป 180 วัน พบว่าร้อยละปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางมีปริมาณลดลงจาก 120 วัน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดานที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช พบว่าร้อยละปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในตัวกลางมีการปลูกพืชมีปริมาณน้อยกว่าตัวกลางไม่ปลูกพืช เนื่องจากพืชมีส่วนช่วยในการดึงเอาฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโตจึงทำให้ระบบที่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมสูงกว่าบ่อที่ไม่ปลูกพืช และร้อยละปริมาณฟอสฟอรัสของหินดินดานในบ่อปลูกพืชจะมีค่าลดลงน้อยกว่าในบ่อหินดินดานที่ไม่ปลูกพืชแสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของบ่อหินดินดานที่ปลูกพืชจะนานกว่าบ่อหินดินดานที่ไม่ปลูกพืช ทำให้ลดการอุดตัน (Clogging) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดานกับตัวกลางกรวดและทราย พบว่าตัวกลางหินดินดานมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมสูงกว่าตัวกลางกรวดและทราย 1.5 เท่า ผลการศึกษาแสดงว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่ากรวดและทราย ดังนั้นหินดินดานจึงเป็นตัวกลางที่มีอายุการใช้งานในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นานกว่าตัวกลางกรวดและทราย ซึ่งผลการสรุปนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550); Drizo (1998; 1999; 2000) ซึ่งทำการศึกษาคาดการณ์อายุการใช้งานของหินดินดานเมื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่ามีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ซึ่งระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั่วไปที่นิยมใช้ตัวกลางกรวดทรายและดินซึ่งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 2-5 ปี (Zhu et al., 1997; Vaymazal et al., 1998) การเลือกใช้ตัวกลางที่มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีจะทำให้ลดการใช้ตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากค่าใช้จ่ายการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ร้อยละ 41.20 เป็นค่าใช้จ่ายสำหรับตัวกลาง (Chen et al., 2007) ดังนั้นในการออกแบบระบบที่มีการใช้ตัวกลางน้อยลงและ

ตัวกลางมีราคาถูกจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง จากการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) ทำการเปรียบเทียบราคาตัวกลางหินดินดาน ตัวกลางกรวด และตัวกลางทราย พบว่ามีราคาเท่ากับ 90.0 251.57 และ 206.79 บาทต่อตัน ตามลำดับ โดยตัวกลางหินดินดานจะมีราคาต่ำกว่าตัวกลางทรายและกรวดประมาณ 2 เท่า และจากข้อมูลกลุ่มส่งเสริมวิสาหกิจเหมืองแร่ สำนักบริหารยุทธศาสตร์ ข้อมูล ณ วันที่ 4 มกราคม 2554 ราคาหินดินดาน และทรายเท่ากับ 125 และ 350 บาทต่อตัน ตามลำดับ ส่วนการสะสมฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่น ๆ เป็นการสะสมฟอสฟอรัสในรูปแบบของการสะสมในเนื้อเยื่อจุลินทรีย์ การย่อยสลายของซากพืชและสิ่งมีชีวิตในระบบ และการระเหยของน้ำไปในบรรยากาศนั้น จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีระยะเวลาการเดินระบบนานมากขึ้นมีการสะสมฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่น ๆ เพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองศึกษาสมดุลมวลน้ำของระบบ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง.) พบว่าปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบโดยการระเหยและการคายน้ำของพืช (Evatranspiration) คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำทั้งหมดของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่น ๆ

ดังนั้น จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีพบว่าตัวกลางหินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วย เฟอร์ริกออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยกว่าระบบที่ใช้ตัวกลางทั่วไป เช่น กรวด ทราย และดิน และจากผลการศึกษาพบว่าพืชทั้ง 3 ชนิด ที่ปลูกบนตัวกลางหินดินดานมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อสูงกว่าพืชที่ปลูกบนตัวกลางกรวดและทราย ซึ่งกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืชนั้นพืชจะดูดซึมอาหารผ่านทางรากและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป (US.EPA., 2000; Kadleck and Knight, 2006) โดยฟอสฟอรัสจะถูกตรึงกับตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ หลังจากนั้นพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ และในช่วงที่มีการเจริญเติบโตของพืชจะมีการนำฟอสฟอรัสไปใช้เพิ่มมากขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อพืชมีการเจริญเติบโตเต็มที่ (Vymazal et al., 2001) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้หินดินดานซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียม แคลเซียม เหล็กและแมกนีเซียม จึงสามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสได้ดีและส่งผลทำให้มีการนำไปใช้โดยพืชและเกิดการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชที่ปลูกบนตัวกลางหินดินดานมากกว่าพืชที่ปลูกบนตัวกลางกรวดและทราย และเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและน้ำหนักแห้งของพืชที่ปลูกบนตัวกลางทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีลักษณะทางกายภาพ เช่น สีของใบ และความสูง และน้ำหนักแห้งมีความใกล้เคียงกัน ไม่พบอาการผิดปกติใด ๆ ดังนั้นพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงมีส่วนช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัสและช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย

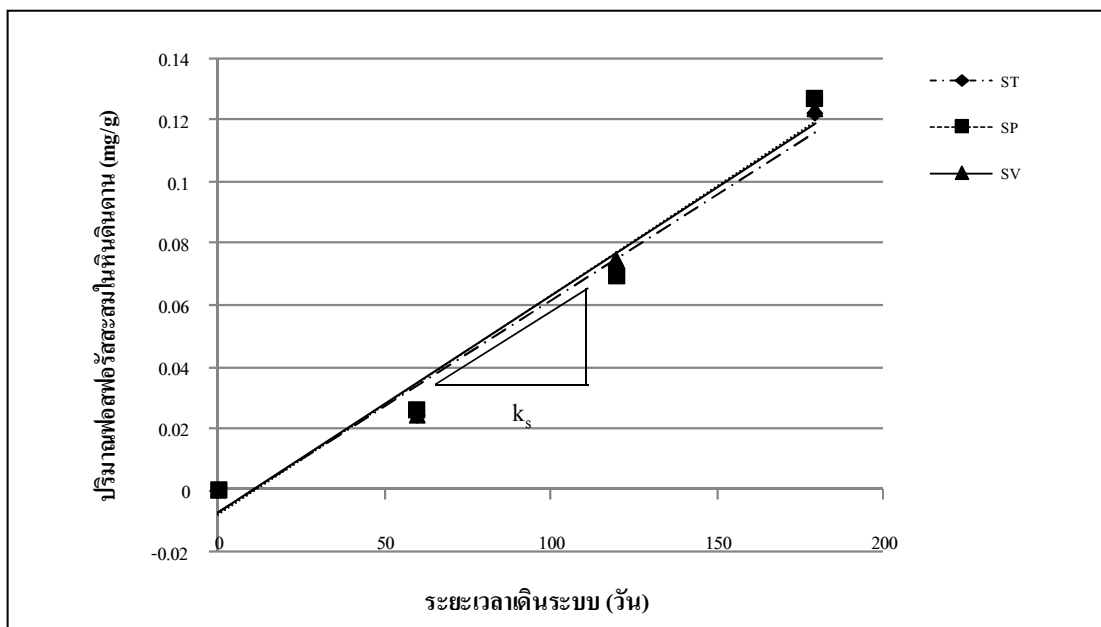
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลสมมูลมวลสารเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยมีหินดินดานเป็นตัวกลาง

4.5.1 การวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลางหินดินดาน

จากข้อมูลสมมูลมวลสารในหัวข้อที่ 4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาสัมพันธภาพในการเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางของระบบ โดยนำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x จะได้ค่า k_s มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าค่า k_s ของแต่ละระบบมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางหินดินดานในหัวข้อที่ 4.4.1 แสดงว่ากลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นที่ตัวกลางเป็นหลักและพีชมีส่วนช่วยในการกำจัดเพียงเล็กน้อย

4.5.2 การวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยพีช

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.3 และตารางที่ 4.5 นำมาหาค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีช (W_p) ในระบบหาได้จากทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีชในระบบ (กรัมต่อตัน) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x เพื่อให้ได้สมการเชิงเส้นตรง โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีชในระบบที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการแทนค่า x (ระยะเวลาในการเดินระบบ) ในสมการเชิงเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 60 120 และ 180 วัน ตามลำดับ โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีชในระบบมีหน่วยเป็นกรัมต่อตัน



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางของระบบ

ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลางหินดินดาน

ป่อ	ระยะเวลาเดินระบบ (d)	k_s ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)
SP	60	0.00057
	120	0.00064
	180	0.00066
ST	60	0.00056
	120	0.00063
	180	0.00065
SV	60	0.00057
	120	0.00064
	180	0.00066

หมายเหตุ : SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

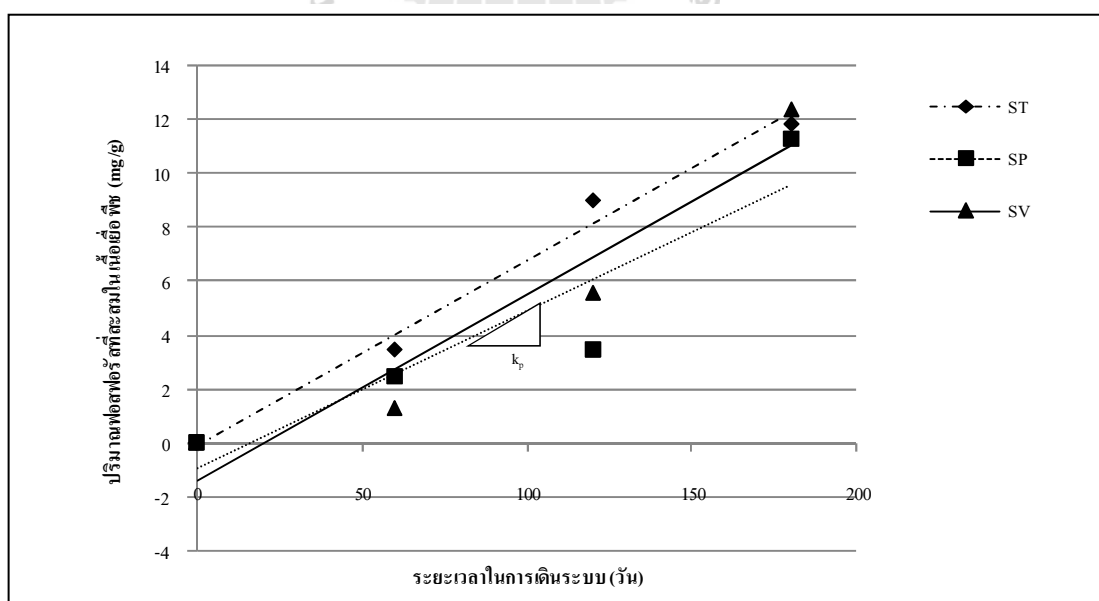
ST = หินดินดาน และ ทุปถายี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

ค่าความพรุนของตัวกลางหินดินดานมีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 0.30-0.35

และจากข้อมูลสมมูลมวลสารในหัวข้อที่ 4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์หาสัมพันธในการเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชของระบบ โดยนำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชของระบบ (มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นแกน y กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) เป็นแกน x จะได้ค่า k_p มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.12 11 พบว่าค่า k_p ของแต่ละระบบมีค่าแตกต่างกันตามปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อ โดยค่า k_p ของบ่อ ST มีค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.0667 0.0673 และ 0.0675 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน ซึ่งบ่อ ST มีค่าฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อ 4.4.2

การกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น ถึงแม้ว่าจะมีกลไกหลัก คือ การตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดติดผิว และการตกตะกอน ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตัวกลางเป็นหลัก แต่บทบาทของพืชในการกำจัดฟอสฟอรัสก็เป็นส่วนสำคัญในการช่วยยืดอายุการใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ให้เพิ่มขึ้นและยังเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตอื่นในระบบอีกด้วย ซึ่งการเลือกพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น ควรเลือกพืชที่หาง่ายในท้องถิ่น มีความทนต่อสารอินทรีย์สูงและสภาพน้ำที่ท่วมขังได้ และควรเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งพืชทั้ง 3 ชนิด (ต้นอ้อ หญ้าแฝก และรูปฤาษี) ที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ แต่อย่างไรก็ตามในการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในระบบ



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปของฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช

ตารางที่ 4.12 ผลวิเคราะห์การกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช

ป่อ	ระยะเวลาเดินระบบ (d)	k_p (mg g ⁻¹ d ⁻¹)
SP	60	0.0425
	120	0.0500
	180	0.0528
ST	60	0.0667
	120	0.0673
	180	0.0675
SV	60	0.0455
	120	0.0572
	180	0.0611

หมายเหตุ : SP = หินดินดาน และ ดินอ้อ

ST = หินดินดาน และ รูปถาวยี่

SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของ Mueleman et al. (2002) พบว่าพืชจะมีการเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารในช่วง 0-60 วัน อย่างช้า ๆ และมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วง 60-100 วัน และจะเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารได้เต็มที่ในช่วง 100-250 วัน และหลังจากนั้นการเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหารจะลดลงและตายในที่สุดในช่วง 270-360 วัน และจากผลการศึกษาที่มีระยะเวลาเท่ากับ 180 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดจะมีอัตราการนำฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อพืชสูงสุดเช่นกัน ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในการเดินระบบจริงควรทำการควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ควรตัดทุก 3-4 เดือน เพื่อให้พืชในระบบได้มีการดูดซับธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตใหม่และระบบยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง Lantzke et al. (1999) ศึกษาพบว่าในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์หากทำการตัดพืชอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คิดเป็นร้อยละ 10-20

4.5.3 การสร้างสมการสมดุลมวลสาร

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกลไกของตัวกลางหินดินดาน และพีช สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการสมดุลมวลสาร ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$QC_{in} - QC_{out} = W_s k_s + W_p k_p + W_e k_e \quad (4.4)$$

จากผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารของระบบที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่า กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกลไกอื่น ๆ คิดเป็นสัดส่วนน้อย ดังนั้นในการสร้างสมการสมดุลมวลสารจึงไม่นำมาพิจารณา และทำการจัดรูปของสมการใหม่ได้ ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$C_{out} = \frac{QC_{in} - (k_s x D_s x V) - (k_p x W_p x D_p x A)}{Q} \quad (4.5)$$

- โดย
- Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - C_{in} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - C_{out} = ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - D_s = ความหนาแน่นของหินดินดาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - V = ปริมาตรของระบบ (ลูกบาศก์เมตร)
 - k_s = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัส โดยหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)
 - W_p = น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพีช (กรัม หรือ กิโลกรัม)
 - D_p = ความหนาแน่นของพีช (ตันต่อตารางเมตร)
 - A = ขนาดพื้นที่ของบ่อ (ตารางเมตร)
 - k_p = อัตราการกำจัดฟอสฟอรัส โดยพีช (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพีช (k_p) ของพีชแต่ละชนิดในระบบ มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อไม่เท่ากันดังนั้นในการนำไปใช้จึงควรเลือกใช้ตามชนิดของพีช ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพีช

ตารางที่ 4.13 ค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช (k_p)

พืช	k_p ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)
รูปถ่าย	0.0672
ต้นอ้อ	0.0533
หญ้าแฝก	0.0546

4.6 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ

จากการเดินระบบจริงและจากสมการสมดุลมวลสาร

จากสมการสมดุลมวลสารในหัวข้อที่ 4.5.3 นำมาประเมินผลของสมการที่ได้ โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละความเข้มข้นฟอสฟอรัส (5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในแต่ละความเข้มข้นมีระยะเวลาในการเดินระบบ 60 วัน ลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจากสมการแล้วทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจากการเดินระบบจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.14 โดยมีตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ.

ตารางที่ 4.14 สรุปตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลมวลสาร

บ่อ	C_{in} (mg l^{-1})	Q (l d^{-1})	W_p (g)	W_s (g)	k_s ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	k_p ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	$C_{out, eq}$ (mg l^{-1})	$C_{out, exp}$ (mg l^{-1})
SP	5	40	53.4	372000	0.00057	0.0425	-1.15	1.22
	15	40	96.3	372000	0.00064	0.05	7.24	2.80
	30	40	139.3	372000	0.00066	0.0528	21.10	4.64
ST	5	40	42.9	372000	0.00056	0.0667	-1.28	0.95
	15	40	85.0	372000	0.00063	0.0673	6.99	2.16
	30	40	127.1	372000	0.00065	0.0675	20.74	3.87
SV	5	40	33.9	372000	0.00057	0.0455	-0.88	1.24
	15	40	60.0	372000	0.00064	0.0472	7.99	3.49
	30	40	86.2	372000	0.00066	0.0611	21.89	7.19

หมายเหตุ : SP = หินดินดาน และ ต้นอ้อ

ST = หินดินดาน และ รูปถ่าย

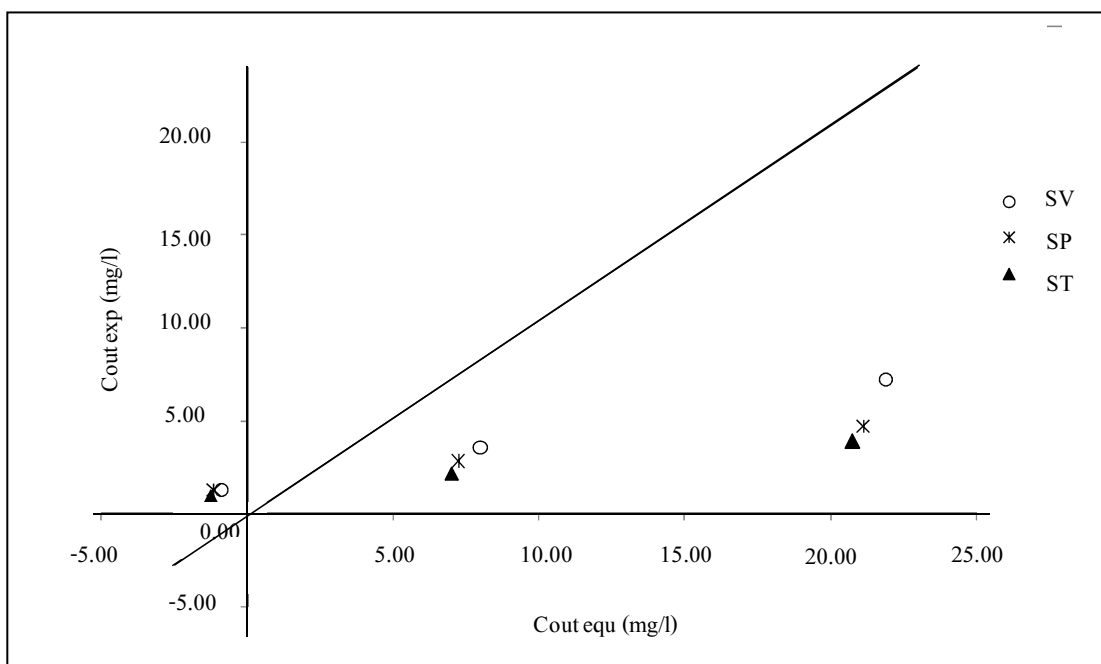
SV = หินดินดาน และ หญ้าแฝก

จากผลการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ พบว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบที่ได้จากการคำนวณโดยสมการสมดุลมวลสารมีค่ามากกว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากการเดินระบบจริง และจากสมการสมดุลมวลสาร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่ากลไกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น จะขึ้นอยู่กับกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืชซึ่งพบว่ามีค่าความหนาแน่นของพืชในระบบเพิ่มขึ้นการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ควรมีความหนาแน่นของพืชที่เหมาะสม เพื่อให้พืชสามารถพัฒนาระบบรากและลำต้นได้ ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมนี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์อื่น ๆ อีกด้วย ดังนั้นสมการสมดุลมวลสารสามารถสรุปได้ ดังแสดงในสมการที่ 4.6

$$C_{out} = \frac{QC_{in} - (0.00062 \times D_s \times V) - (0.0583 \times W_p \times D_p \times A)}{Q} \quad (4.6)$$

โดยมีเงื่อนไขของสมการดังนี้

- 1) ค่า k_s และ k_p ที่ได้ในสมการได้มาจากการการเดินระบบจริงโดยมีปริมาณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าระบบเท่ากับ 5 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 2) ทำการเดินระบบภายใต้สมมติฐานว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลในระยะเวลา 30 วัน
 - 3) สมการสมดุลมวลสารนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบได้ถึงแม้ระบบจะมีระยะเวลาในการเดินระบบมากกว่า 180 วัน
- ข้อเสนอแนะในการเดินระบบ
- 1) ในการเดินระบบควรตัดพืชทุก ๆ 3 เดือน เพื่อเป็นการกระตุ้นให้พืชได้มีการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อ
 - 2) ในการเดินระบบเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบเมื่อเดินระบบได้ 2-3 ปี ควรทำการเปลี่ยนเอาตัวกลางส่วนบนสุดของบ่อ (Top soil) ใหม่ เพราะในบริเวณนี้ จะเกิดการทับถมของซากพืชและสิ่งมีชีวิตซึ่งจะทำให้ตัวกลางหินดินดาน มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสลดลง



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ

4.7 ตัวอย่างการคำนวณสมการสมดุลมวล

ชุมชนแห่งหนึ่งมีประชากรอาศัยอยู่ 1,000 คน มีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและปลูกธูปฤาษี เพื่อให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบมีค่าผ่านมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ 4.9

$$C_{out} = \frac{QC_{in} - (0.00062 \times D_s \times V) - (0.0583 \times W_p \times D_p \times XA)}{Q}$$

โดย Q = 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

C_{in} = 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_{out} = 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

D_s = 2.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

k_s = 0.00062 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน

W_p = 73.73 กรัม

k_p = 0.0583 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน

และกำหนดให้พืชที่ปลูกในระบบมีจำนวนทั้งสิ้น 5,000 ต้น

1) การคำนวณหาความเข้มข้นน้ำเข้า

$$QC_{in} = \frac{200 \text{ m}^3}{d} \times \frac{15 \text{ mg}}{l} \times \frac{1000 l}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 3,000,000 \text{ mg.d}^{-1} \text{ หรือ } 3,000 \text{ g.d}^{-1}$$

2) การคำนวณการกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลาง

$$0.00062 \times D_s \times V = \frac{0.00062 \text{ mg}}{\text{g.d}} \times \frac{2.68 \text{ g}}{\text{cm}^3} \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \times v \text{ m}^3$$

$$= 1661.60V \text{ mg.d}^{-1} \text{ หรือ } 1.66V \text{ g.d}^{-1}$$

3) การคำนวณการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช

$$0.0583 \times W_p \times D_p \times A = \frac{0.0583 \text{ mg}}{\text{g.d}} \times \frac{73.73 \text{ g}}{\text{ต้น}} \times 5000 \text{ ต้น}$$

$$= 21492.29 \text{ mg.d}^{-1} \text{ หรือ } 21.49 \text{ g.d}^{-1}$$

แทนค่าแต่ละพจน์ในสมการ จะได้

$$2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = \left[\frac{3,000 \text{ g}}{d} - \frac{1.66 V \text{ g}}{d} - \frac{21.49 \text{ g}}{d} \right] \times \frac{d}{200 \text{ m}^3}$$

$$V = 7.77 \text{ m}^3$$

จากเกณฑ์แนะนำการออกแบบของ U.S. EPA. (2000) โดยกำหนดให้อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 2 : 1 และระบบมีความลึก 0.5 เมตร จากสูตร $V = W \times L \times D$; $W \times L =$ พื้นที่ (A) ซึ่งพื้นที่ที่ต้องใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส มีค่าเท่ากับ

$$A = \frac{7.77 \text{ m}^3}{0.5 \text{ m}}$$

$$= 15.54 \text{ ตารางเมตร}$$

ดังนั้นพื้นที่ที่ต้องใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลางมีค่าเท่ากับ 15.54 ตารางเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษากลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง โดยอาศัยหลักทฤษฎีสมดุลมวลสาร เพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

5.1 กลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 บ่อที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่าฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในระบบร้อยละ 70-90 อยู่ที่ตัวกลาง ร้อยละ 5-20 อยู่ที่พืช และร้อยละ 1-13 อยู่ที่กลไกอื่น ๆ

5.1.2 บ่อที่ใช้กรวด-ทรายเป็นตัวกลาง พบว่า ฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในระบบร้อยละ 50-85 อยู่ที่ตัวกลาง ร้อยละ 5-20 อยู่ที่พืช และร้อยละ 6-30 อยู่ที่กลไกอื่น ๆ

5.1.3 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลางหินดินดานเกิดจากการทำปฏิกิริยากับโลหะ ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน โดยสร้างพันธะกับฟอสฟอรัสที่ผิวหน้าตัวกลาง

5.1.4 พืชจะสามารถดึงฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวกลางนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต โดยจะช่วยให้การสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อสูงสุดที่ระยะการเจริญเติบโตเต็มที่ของพืช และหลังจากนั้นจะลดลง ดังนั้นจึงควรตัดพืชก่อนที่พืชจะมีอัตราการนำฟอสฟอรัสไปใช้ลดลง

5.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและทีเคเอ็น

ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

5.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าในระบบที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางจะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและทีเคเอ็นสูงกว่าระบบที่ใช้ทราย-กรวดเป็นตัวกลางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.2.2 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่า บ่อที่ปลูกต้นธูปฤาษีมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ฟอสฟอรัสและทีเคเอ็นสูงกว่าต้นอ้อและหญ้าแฝก

5.2.3 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ทราย และกรวดเป็นตัวกลาง พบว่าบ่อที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและทีเคเอ็นสูงกว่า ฐูปถามีย์และหญ้าแฝก ส่วนฟอสฟอรัส พบว่าฐูปถามีย์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

5.3 สมการสมดุลมวลสารสามารถนำไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยมีรายละเอียดของสมการสมดุลมวลสาร ดังแสดงในที่สมการ 5.1

$$C_{out} = \frac{QC_{in} - (0.00062xD_s xV) - (k_p xW_p xD_p xA)}{Q} \quad (5.1)$$

5.4 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานมีผลดังนี้

- 5.4.1 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัส โดยตัวกลางหินดินดาน มีค่าเท่ากับ 0.00062 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน
- 5.4.2 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัส โดยพืช
- ฐูปถามีย์ 0.0672 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน
 - ต้นอ้อ 0.0533 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน
 - หญ้าแฝก 0.0546 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2546). **เทคนิคการบำบัดน้ำเสียบางวิธีการนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง**. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมควบคุมมลพิษและสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. (2548). **การศึกษาโครงการพัฒนาแนวทางด้านเทคนิคและสาธิตระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์** [ออนไลน์]. ได้จาก : [http://www.pcd.go.th/public Publications/print_water.cfm](http://www.pcd.go.th/public%20Publications/print_water.cfm)
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). **หินแร่ คุณสมบัติ การจำแนก และวัฏจักร**. ธรณีวิทยาวิศวกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.sdhabhon.com/Engineering%20Geology.html>
- กรมวิชาการเกษตร. (2546). **คู่มือวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. (2544). **การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทริยศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. (2547). **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย**. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี : เอส.อาร์. พรินติ้ง เมสโปรดักส์.
- จร สดาก. (2535). **แฝก แฝกหอม หญ้าแฝก**. นสพ. กลีกร 65(2) : 135-140
- ชฎารัตน์ อนันต์ และ ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2539). **กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ**. Thai Environmental Engineering Journal. 10 (5) : 22-23.
- ปาริญา รุ่งวิสัย. (2547). **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อใช้ทางการเกษตร**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- จิตินันท์ ศักรานุกิจ. (2549). **การใช้หญ้าแฝก *Veteveria zizanioides* (L.) Nash. บำบัดน้ำเสียชุมชนภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธิดารัตน์ บุญศรี. (2543). **การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- ไพรัช พงษ์วิเชียร. (2548). **อิทธิพลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก**. ภูมิวารินอนุรักษณ์ ฉบับที่ 19 : 22-26.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัชต์ ตัณฑุลเวศม์. (2545). **เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย**. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณเฑียร กังศศิเทียม. (2539). **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน.
- ขงยุทธ โอสดสภา สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา อรรถสิทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ และชัยสิทธิ์ ทองจู. (2547). **ปฏิวัติวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 8 กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วราวุฒิจิตหมายเกษม. (2547). **การประยุกต์แบบ Constructed Wetland สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิทิต ขอสันติวิวัฒน์. (2545). **การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิวัฒน์ ไตรธิรกุล. (2547). **หินน้ำมัน (Oil Shale)**. กลุ่มส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3 กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php>
- วีระชัย ณ นคร (2537). **การศึกษาอนุกรมวิธานของหญ้าแฝกสกุล *Veiveria* ในประเทศไทย** เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการพัฒนา และรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ เชียงราย.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา สวดี เสนาพิทักษ์ สรินทร ลิมปนาท กฤษณา ศิริเลิศมุกด์ และ ศรีโฉลขุนทด. (2543). **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุวสา กานตวนิชกูร. (2538). **การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ**. เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุวสา กานตวนิชกูร. (2544). **รายงานการวิจัยเรื่องการกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined constructed wetland ในเขตร้อน**. สำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- สถาพร คูวิจิตรจากร. (2542). **ปฏิพิภคศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : โลบราลีนายพัลลขิง.
- สมบุญ เตชะภิญญวัฒน์. (2548). **สรีรวิทยาของพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จามจุรีโปรดักส์
- สุภาพร จันรุ่งเรือง และ พิสนุญ จัตวาพรวนิช. (2539). **ศึกษาศักยภาพการใช้รูปถ่ายในการบำบัดน้ำเสีย**. [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.ldd.go.th>

- เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.
- หิน (Rock). (2004). **โครงการเรียนรู้เรื่องวิทยาศาสตร์และโลกอวกาศ** [ออนไลน์]. ได้จาก :
[http : //www.lesa.in.th/geo/rocks/rocks.htm](http://www.lesa.in.th/geo/rocks/rocks.htm)
- อมรา ดาวโรสง (2550). **การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็น
 ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Adam, K., Krogstad, T., Vrale, L., Sovik, A. K., and Jenssen, D. P. (2007). **Phosphorus retention
 in filter materials shellsand and filtralite P batch and column experiment with
 synthetic P solution and secondary wastewater**. *Ecological Engineering*. 29 : 200-208
- Akratos, C. S., and Tsihrintzis, V. A. (2007). **Effect of temperature, HRT, vegetation and
 porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow
 constructed wetland**. *Ecological Engineering*. 29 : 173-191.
- Aldous, A., McCormick, P., Ferguson, C., Graham, C. and Craft, C. (2005). Hydrologic regime
 controls soil phosphorus fluxes in restoration and undisturbed wetlands. **Restoration
 Ecology**. 13:341–47.
- APHA, AWWA, and WEF. (2006). **Standard methods for the examination of the water and
 wastewater** (19th edition). Washington D.C. : American Public Health Association.
- ASTM. (2004). **Anual Book of ASTM Standards : Soil and Rock**. 04.08-04.09. USA : Baltimore.
- Babatunde A. O., and Zhao, Y. Q. (2009). **Forms, patterns and extractability of phosphorus
 retained in alum sludge used as substrate in laboratory-scale constructed wetland
 systems**. *Chemical Engineering Journal*. 152 : 8-13.
- Babatunde, A. O., Zhao, Y. Q., and Zhao, X. H. (2010). **Alum sludge-based constructed wetland
 system for enhanced removal of P and OM from wastewater : Concept, design and
 performance analysis**. *Bioresource Technology*. 101 : 6576-6579.
- Babatunde, A. O., and Zhao, Y. Q. (2010). **Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus
 adsorption from aqueous solution using waste alum sludge**. *Journal of Hazardous
 Materials*. 184 : 746-752.
- Bachand, P., and Horne, A. (2000). Denitrification in constructed free-water surface wetlands: II.
 Effects of vegetation and temperature. **Ecological Engineering**. 14:17-32.

- Batty, L. C., and Younger, P. L. (2004). **Growth of *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel in mine water treatment wetlands : effects of metal and nutrient uptake.** Environmental Pollution. 132 : 85-93.
- Bragato, C., Brix, H., and Malagoli, M. (2006). **Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed.** Environmental Pollution 144 : 967-975.
- Breen, F. P. (1990). **A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment.** Water Research. 24(6) : 689-697.
- Brix, H. (1997). **Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?.** Water Science Technology. 35 : 11-17.
- Bubba, M. D., Arias, C. A., and Brix, H. (2003). **Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in surface flow constructed wetlands as measured by the Langmuir isotherm.** Water Research. 37 : 3390-3400.
- Bulc, T. G., and Ojstrsek, A. (2008). **The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment.** Journal of Hazardous Materials. 155 : 76-82.
- Prochaska, C. A., and Zouboulis, A. I. (2006). **Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate.** Ecological Engineering. 26 : 293-303.
- Calheiros, S. C., Cristina., D., Anouk., F., Moura, A., Henriques, S., Isabel., C., António., R., António, O. S., and Castro, M. L. (2009) **Substrate effect on bacterial communities from constructed wetlands planted with *Typha latifolia* treating industrial wastewater.** Ecological Engineering.35 (5) : 744-753.
- Chen, Z. M., Chen, B., Zhou, J. B., Li, Z., and Zhou, Y. (2008). **A vertical subsurface flow constructed wetland in Beijing.** Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 13 : 1986-1996.
- Chung, A. K. C., Wu, Y., Tam, N. F. Y., and Wong, M. H. (2008). **Nitrogen and phosphate mass balance in sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater.** Ecological Engineering. 32 : 81-89.

- Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., and Shute, R. B. E. (1996). **Reed Bed and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. WRc Swindon : Wiltshire.
- Cristina, S. C., Calheiros, Rangel, A. S., and Castro, P. (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. **Water Research**. 41 : 1790-1798.
- Daothaisong, A., and Yimrattabovorn, J. (2008). **Phosphate Removal by Shale for Utilization in Constructed Wetland**. In : Proceeding of International Conference on Managing Wetlands for Sustainable Development : Innovative Research and Lessons Learned, Effective Partnerships, and the Need for Co-Management, Prince of Songkla University, Trang, Thailand, 1-9.
- Das, A., and Uchimiya, H. (2002). **Oxygen stress and adaptation of a semi-aquatic plant : rice (*Oryza sativa* L)**. Journal of Plant Research. 115 : 315-320.
- Dierberg, F. E., DeBusk, T. A., Jackson, S. D., Chimney, M. J., and Pietro, K. (2002). Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff : response to hydraulic and nutrient loading. **Water Research**. 36 : 1409–1422.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1997). **Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow using shale as a substrate**. Water Science and Technology. 35 (5) : 95-102.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1999). **Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems**. Water Research. 33 (17) : 3595-3602.
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (2000). **Phosphate and ammonium distribution in pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate**. Water Research. 34 (9) : 2483-2490.
- Edwards, K. R., Ciz'kova', H., Zemanova', K., and S'antru c'kova', H. (2006). Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*. **Ecological Engineering**. 27 : 153-165.

- Frobes, G., Margaret, D. L., Kenneth., S. F., and Waller, T. W. (2005). **Recovery and Fraction of Phosphorus Retained by Lightweight Expanded Shale and Masonry Sand Used as Media in Subsurface Flow Treatment Wetlands.** *Environmental Science and Technology*.39 : 4621-4627.
- Fukao, T., and Bailey-Serres, J. (2004). Plant responses to hypoxia - is survival a balancing act. **Trends in Plant Science.** 9 (9) : 449-456.
- Gottschall, N., Boutinb, C., Crolla, A., Kinsleyc, C., and Champagne, P. (2007). The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada. **Ecological Engineering.** 29 : 154-163.
- Gray, S., Kinross, J., Read, P., and Marland, A. (2000). The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment. **Water Research.** 34 (9) : 2183-2190.
- Greenway, M., Dale, P., and Chapman, H. (2000). **Constructed wetlands for wastewater treatment-macrophytes, microinvertebrates and mosquitoes.** In : Processing of Eight International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Arusha, Tanzania, September 16-19,.1009-1023.
- Guan, B. H., Yao, X., Jiang, J. H., Tian, Z. Q., An, S. Q., Gu, B. H., and Cai, Y. (2009). Phosphorus removal ability of three inexpensive substrates : Physicochemical properties and application. **Ecological Engineering.** 35 : 576-581.
- Gustafsson, J. P., Renman, A., Renman, G., and Poll, K. (2008). Phosphate removal by mineral-based sorbents used in filters for small-scale wastewater treatment.**Water Research.** 42 : 189-197.
- Hen, S. M., and Merckx, R. (2001). Functional characterization of colloidal phosphorus species in the soil solution of sandy siols. **Environmental Science and Technology.** 35 : 493-500.
- Howard, W. C. (1985). Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands : a theoretical and applied perspective. **Freshwater Biology.** 15 : 391-431.
- Iamchaturapatr, J., Won, S., and Rhee, S. J. (2007) Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland. **Ecological Engineering** 29 : 287-293.

- Irini, P. K., Georgios D. G., and Vassilios, A. T. (2010). **Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems.** *Ecological Engineering*. 36 : 862-875.
- Johansson, L. (1997). **The use of LECA (light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from water.** *Water Science and Technology*. 35(5) : 87-93.
- Karageorgiou, K., Paschalis, M., and Anastassakis, G. N. (2007). Removal of phosphate species from solution by adsorption onto calcite used as natural adsorbent. **Journal of Hazardous Materials**. A139 : 447-452.
- Klomjek, P. and Nitorisavut, S. (2005). Constructed treatment wetland : a study of eight plant species under saline conditions. **Chemosphere**. 58 (5) : 585-593.
- Koiv, M., Liira, M., Mander, U., Moñtlep, R., Vohla, C. and Kirsimañe, K. (2010). Phosphorus removal using Ca-rich hydrated oil shale ash as filter material the effect of different phosphorus loadings and wastewater compositions. **Water Research**. 44 : 5232-5239.
- Kong, L., Wang, Y. B., Zhao, L. N., and Chen, Z. H. (2009). Enzyme and root activities in surface-flow constructed wetlands. **Chemosphere**. 76 : 601-608.
- Kotti, I. P., Georgios D. G., and Vassilios, A. T. (2010). Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. **Ecological Engineering**. 36 : 862–875.
- Kvarnström, M. E., Morel, A. L. C., and Krogstad, T. (2004). Plant-availability of phosphorus in filter substrates derived from small-scale wastewater treatment systems **Ecological Engineering**. 22 : 1–15.
- Lantzke, I. R., Mitchell, D. S., Heritage, A. D., and Sharma, K. P. (1999). **A model of factors controlling orthophosphate removal in planted vertical flow wetlands.** *Ecological Engineering*. 12(1) : 93-105
- Lai, Y. F., and Lam, C. K. (2009). **Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff.** *Ecological Engineering*. 35(5) : 735-743.
- Lawson, C. J. (2004). **A Preliminary Analysis into the use of Passive Remediation in Calcareous Alkaline Waters**, Unpublished MSc. thesis. University of Newcastle upon Tyne.

- Levenspiel, O. (1972). **Chemical Reaction Engineering**. (1st Edition) John Wiley & Sons : New York.
- Li, M., Zhou, Q., Tao, M., Wang, Y., Jiang, L., and Wu, Z. (2010). Comparative study of microbial community structure in different filter media of constructed wetland. **Journal of Environmental Sciences** .22(1) : 127-133.
- Martin Marietta Material. (2004). **Material Safety Data Sheet of Shale Rock** [On-line]. Available : <http://www.martinmarietta.com/Products/MSDS-Shale.pdf>
- Metcalf and Eddy. (2004). **Wastewater Engineering Treatment and Reuse** (4th edn). Boston Burr Ridge : McGraw-Hill.
- Meuleman, F. M., Richard, V. L., Gerard, B. J., and Jos, T. A. (2003). Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment. **Ecological Engineering**. 20 : 31- 44.
- Mitchell, C., and McNevin, D. (2001). Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics. **Water Resource**. 35 (5) : 1295-303.
- Morel, F. M. M., and Hering, J. G. (1993). **Principles and applications of aquatic chemistry**. New York : Wiley.
- Morse, K. G., Brett, S. W., Guy, J. A., and Lester, J. N. (1998). Review : Phosphorus removal and recovery technologies. **The science of the Total Environment**. 212 : 69-81.
- Nelson, D. W., and Sommers, L. E. (1973). Determination of total nitrogen in plant material. **Agron. J.** 65 : 109-112.
- Noorvee, A., Karabelnik, K., Maddison, M., Nurk, K., Zaytsev, I., and Mander, K. (2010). A case study of the performance of pilot scale light weight aggregates (LWA) based hybrid soil filters in Estonia. **Desalination** .250 : 361-367.
- Ong, S. A., Uchiyama, K., Inadama, D., Ishida, Y., and Yamagiwa, K. (2010). **Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants**. *Bioresource Technology* .101 : 7239-7244.
- Orupõld, K., Tand, T., and Henrysson, T. (2000). Biological lagooning of phenols-containing oil shale ash heaps leachate. **Water Research**. 34 : 4389-96.
- Park, W. H., and Polprasert, C. (2008). **Role of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal**. *Ecological Engineering*. 34 : 50-56 Põldvere

- Polprasert, C., (2004). **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment** : Principles and Practices. *Wetlands Ecosystems in Asia*. 1 : 285-310.
- Prochaska, C. A., and Zouboulis, A. I. (2005). **Removal of phosphorus by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate**. *Ecological Engineering*. 26. 11-22.
- Qualls, R. G., and Richardson, C. J. (1995). **Forms of soil phosphorus along a nutrient enrichment gradient in the Florida Everglades**. *Soil Science* 160 : 183-198
- Reddy, K. R., and Debusk, W. F. (1987). **Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants**. Quoted in R.H. Kadlec, and R.L. Knight. *Treatment wetland*. Michigan : Lewis.
- Reddy, K. R., Patrick, W. H., and Lindau, C. W. (1989). Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands. *Limnol. Oceanogr.* 34 : 1004-1013.
- Reed, R. C., Middlebrooks, E. J., and Crites, R. W. (1988). **Natural Systems for Waste Management and Treatment**. New York : McGraw-Hill.
- Ron, C., and George, T. (1998). **Small and decentralized wastewater management systems**. Singapore : WCB McGraw-Hill.
- Rottiers, A., Boeije, G., Corstanje, R., Decraene, K., Feijtel, T. C., Matthijs, E., and Schowanek, D. (1999). Adaptation of the cas test system and synthetic sewage for biological nutrient removal : Part II : Design and validation of test units. **Chemosphere**. 38 (4) : 711-727.
- Rousseau, D. P. L., Vanrollegham, P. A., and De Pauw, N. (2004.) Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands : a review. **Water Research**. 38 : 1484-1493.
- Sasmaz, A., Obek, E., and Hasar, H. (2008). The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* L. grown in a stream carrying secondary effluent. **Ecological Engineering**. 33 (3-4) : 278-284.
- Sawyer, N, C., Mccarty, L, F., and Parkin, F. G. (2003). **Chemistry for Environmental Engineering and Science** (5th edn). Singapore : McGraw-Hill.
- Scholz, M., (2006). **Wetland Systems to Control Urban Runoff**. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Sovik, A. K., and Klove, B. (2005). **Phosphorus retention processes in shell sand filter systems treating municipal wastewater**. *Ecological Engineering*. 25 : 168-182.

- Stottmeister, U., Wießner, A., Kuschik, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R. A., and Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**.22 (1-2) : 93-117.
- Suthersan, S. S. (2002). **Natural and Enhanced Remediation Systems**. Acradis, Lewis Publisher, Washington, DC.
- The U.S. Department of Agriculture (USDA) (2005). **Plant Fact Sheet**. [On-line]. Available : [http : //plants.usda.gov/factsheet/pdf/fs_phau7.pdf](http://plants.usda.gov/factsheet/pdf/fs_phau7.pdf)
- Tokunaga, T. K., Olson, K. R., and Wan, J. (2003). **Moisture characteristic of Handford gravel**. Soil Science of America. 322-329
- Tolley, H. L., and Raper, C. J. D. (1986). **Utilisation of ammonium as a nitrogen source**. Plant Physiology. 82 : 5-60.
- U.S. EPA. (1988). **Design Manual-Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment**. Ohio : United States Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1993). **Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : A Technology Assessment**. Ohio : United States Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment**. Ohio : United States Environmental Protection Agency.
- US. EPA. (2000). **A Handbook of Constructed Wetlands, A Guide to Creating Wetlands For : Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region. Volume 1 : General Considerations**. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, New York, USA.
- Vohla, C., Alas, R., Nurk, K., Baatz, S., and Mander, U. (2007). Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. **Science of the Total Environment**. 380 : 66-74.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B., and Haberl, R. (1998). **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe**. Netherlands : Backhuys.
- Vymazal, J. (2001a). **Removal of organics in Czech constructed wetland with horizontal subsurface flow**. In : **Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands**. Netherlands : Backhuys.

- Vymazal, J., and Masa, M. (2003). Horizontal subsurface flow constructed wetland with pulsing water level. **Water Science and Technology**. 48 (5) : 143-148.
- Wood, A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control : fundamentals to their understanding. **Water Science and Technology**. 32 (3) : 21-9.
- Wu, D., Zhang, B., Li, C., Zng, Z., and Kong, H. (2006). **Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from fly ash influenced by salt treatment**. Journal of Colloid Interface. 304 : 300-306.
- Yongjun, Z., Bo, L., Wenguang, Z., Changwei, H., and Shuqing, A. (2010). Effects of plant and influent C : N : P ratio on microbial diversity in pilot-scale constructed wetlands. **Ecological Engineering** .36 : 441-449.
- Yousefi, Z., and Mohseni, B. A., (2010). **Nitrogen and phosphorus removal from wastewater by subsurface wetlands planted with *Iris pseudacorus***. Ecological Engineering. 36 : 777-782.
- Zhu, T., Jenssen, P. D., Maehlum, T., and Krogstad, T. (1997). **Phosphorus sorption and chemical characteristics of light aggregate (LWA) : potential filter media in treatment wetland**. Water Science and Technology. 35 (5) : 103-108.
- Zurita, F., Anda, J. D., and Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**. 35 (5) : 861-869.



ภาคผนวก ก

การคำนวณการศึกษาระดับปริญญาตรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก 1. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดาน

ข้อ S

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.35}{0.04} = 1.97 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{629.04}{24.42} = 25.76 \text{ ชั่วโมง หรือ } 1.07 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{653.46}{24.42} - (25.76)^2 = -636.82$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-636.82}{(25.76)^2} = -0.96$$

$$d = 0.24$$

ข้อ SP

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.35}{0.04} = 1.97 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{534.85}{22.97} = 23.29 \text{ ชั่วโมง หรือ } 0.97 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{557.83}{22.97} - (23.29)^2 = -518.14$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-518.14}{542.42} = -0.96$$

$$d = 0.24$$

ข้อ ST

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.35}{0.04} = 1.97 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{620.13}{25.10} = 24.71 \text{ ชั่วโมง หรือ } 1.03 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{645.24}{25.10} - (24.71)^2 = -584.88$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-584.88}{610.58} = 0.96$$

$$d = 0.24$$

ข้อ SV

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.35}{0.04} = 1.97 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{488.86}{20.49} = 23.86 \text{ ชั่วโมง หรือ } 0.99 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{488.86}{20.49} - (23.86)^2 = -545.44$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-545.44}{569.30} = 0.96$$

$$d = 0.24$$

ก 2. การศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางทราย

ข้อ CV

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.45}{0.04} = 2.53 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{800.35}{23.79} = 33.64 \text{ ชั่วโมง หรือ } 1.40 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{824.15}{23.79} - (33.64)^2 = -1097.01$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-1097.01}{1131.65} = -0.97$$

$$d = 0.24$$

ข้อ CT

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.45}{0.04} = 2.53 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{1182.24}{31.95} = 37.01 \text{ ชั่วโมง หรือ } 1.54 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{1214.18}{31.95} - (37.01)^2 = -1331.74$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-1331.74}{1369.74} = -1.03$$

$$d = 0.25$$

ข้อ CP

$$T_{\text{theory}} = \frac{LWd\alpha}{Q} = \frac{1 \times 0.5 \times 0.45 \times 0.45}{0.04} = 2.53 \text{ วัน}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{905.49}{26.09} = 34.71 \text{ ชั่วโมง หรือ } 1.45 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{931.58}{26.09} - (34.71)^2 = -1169.08$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{-1169.08}{1204.78} = -0.97$$

$$d = 0.24$$



ตารางที่ ก.1 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ S

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	419.74	0.1	0.0	0.0	0.0
2.0	2.0	639.74	0.2	0.3	0.6	1.2
4.0	2.0	876.33	0.2	0.4	1.7	6.7
6.0	2.0	1,159.87	0.3	0.6	3.3	19.9
8.0	2.0	1,709.47	0.4	0.8	6.5	52.1
10.0	2.0	2,339.16	0.6	1.1	11.1	111.4
12.0	2.0	2,838.99	0.7	1.4	16.2	194.7
14.0	2.0	3,258.93	0.8	1.6	21.7	304.3
16.0	2.0	3,598.88	0.9	1.7	27.4	438.9
18.0	2.0	3,648.85	0.9	1.7	31.3	563.1
20.0	2.0	3,598.85	0.9	1.7	34.3	685.7
22.0	2.0	3,359.05	0.8	1.6	35.2	774.4
24.0	2.0	3,039.34	0.7	1.4	34.7	833.9
26.0	2.0	2,619.49	0.6	1.2	32.4	843.5
28.0	2.0	2,219.57	0.5	1.1	29.6	828.9
30.0	2.0	1,917.63	0.5	0.9	27.4	822.1
32.0	2.0	1,619.63	0.4	0.8	24.7	790.0
34.0	2.0	1,313.55	0.3	0.6	21.3	723.3
36.0	2.0	1,173.11	0.3	0.6	20.1	724.2
38.0	2.0	1,002.10	0.2	0.5	18.1	689.3
40.0	2.0	903.13	0.2	0.4	17.2	688.3
42.0	2.0	892.55	0.2	0.4	17.9	750.0
45.0	3.0	794.21	0.2	0.6	25.5	1149.1
48.0	3.0	751.56	0.2	0.5	25.8	1237.2
51.0	3.0	707.11	0.2	0.5	25.8	1314.1
54.0	3.0	682.11	0.2	0.5	26.3	1421.2
57.0	3.0	568.22	0.1	0.4	23.1	1319.1
60.0	3.0	442.55	0.1	0.3	19.0	1138.3
63.0	3.0	403.12	0.1	0.3	18.1	1143.2
66.0	3.0	374.11	0.1	0.3	17.6	1164.4
69.0	3.0	301.22	0.1	0.2	14.9	1024.7
			sum	24.42	629.04	653.46

ตารางที่ ก.2 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ SP

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	391.74	0.1	0.0	0.0	0.0
2.0	2.0	739.74	0.2	0.4	0.7	1.4
4.0	2.0	959.87	0.2	0.9	3.7	14.6
6.0	2.0	1,709.47	0.4	2.4	14.7	87.9
8.0	2.0	2,539.16	0.6	4.8	38.7	309.6
10.0	2.0	3,238.99	0.8	7.7	77.1	771.4
12.0	2.0	3,458.93	0.8	9.9	118.6	1423.5
14.0	2.0	3,598.88	0.9	12.0	168.0	2352.0
16.0	2.0	3,648.85	0.9	13.9	222.5	3559.6
18.0	2.0	3,398.85	0.8	14.6	262.3	4721.0
20.0	2.0	3,059.05	0.7	14.6	291.4	5828.6
22.0	2.0	2,714.34	0.6	14.2	312.9	6883.6
24.0	2.0	2,239.49	0.5	12.8	307.2	7373.4
26.0	2.0	2,099.57	0.5	13.0	338.0	8788.9
28.0	2.0	1,893.63	0.5	12.6	353.6	9900.5
30.0	2.0	1,649.63	0.4	11.8	353.6	10608.1
32.0	2.0	1,519.67	0.4	11.6	370.6	11860.0
34.0	2.0	1,045.33	0.2	8.5	287.8	9785.3
36.0	2.0	924.76	0.2	7.9	285.4	10276.0
38.0	2.0	833.22	0.2	7.5	286.6	10889.2
40.0	2.0	732.11	0.2	7.0	279.0	11159.4
42.0	2.0	674.32	0.2	6.7	283.3	11898.7
45.0	3.0	601.33	0.1	6.4	290.0	13050.8
48.0	3.0	553.22	0.1	6.3	303.6	14571.6
51.0	3.0	485.11	0.1	5.9	300.5	15326.3
54.0	3.0	423.80	0.1	5.5	294.3	15893.8
57.0	3.0	410.11	0.1	5.6	317.3	18088.9
60.0	3.0	375.33	0.1	5.4	321.8	19308.7
63.0	3.0	301.23	0.1	4.5	284.8	17939.3
66.0	3.0	298.45	0.1	4.7	309.6	20435.7
69.0	3.0	250.44	0.1	4.1	284.0	19594.6
			sum	243.24	7361.71	7604.95

ตารางที่ ก.3 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ ST

Time (hr), ti	Δti	NaCl (mg/L), Ci	C/Co = Ci	$Ci\Delta ti$	$tiCi\Delta ti$	$ti^2Ci\Delta ti$
0.0	0.0	501.74	0.1	0.0	0.0	0.0
2.0	2.0	829.40	0.2	0.4	0.8	1.6
4.0	2.0	1,249.64	0.3	1.2	4.8	19.0
6.0	2.0	1,416.44	0.3	2.0	12.1	72.9
8.0	2.0	1,649.49	0.4	3.1	25.1	201.1
10.0	2.0	2,209.31	0.5	5.3	52.6	526.2
12.0	2.0	2,980.73	0.7	8.5	102.2	1226.7
14.0	2.0	3,389.46	0.8	11.3	158.2	2215.1
16.0	2.0	3,588.84	0.9	13.7	218.8	3501.1
18.0	2.0	3,768.28	0.9	16.2	290.8	5234.2
20.0	2.0	3,848.04	0.9	18.3	366.6	7331.9
22.0	2.0	3,682.04	0.9	19.3	424.4	9337.8
24.0	2.0	3,270.77	0.8	18.7	448.7	10768.9
26.0	2.0	2,983.83	0.7	18.5	480.4	12490.5
28.0	2.0	2,575.11	0.6	17.2	480.8	13463.4
30.0	2.0	2,039.58	0.5	14.6	437.2	13115.7
32.0	2.0	1,719.63	0.4	13.1	419.4	13420.6
34.0	2.0	1,319.65	0.3	10.7	363.3	12353.3
36.0	2.0	1,109.69	0.3	9.5	342.5	12330.9
38.0	2.0	1,083.22	0.3	9.8	372.5	14156.4
40.0	2.0	892.11	0.2	8.5	340.0	13598.3
42.0	2.0	734.32	0.2	7.3	308.5	12957.4
45.0	3.0	692.00	0.2	7.4	333.7	15018.6
48.0	3.0	643.22	0.2	7.4	353.0	16942.2
51.0	3.0	586.22	0.1	7.1	363.2	18520.7
54.0	3.0	532.11	0.1	6.8	369.6	19955.8
57.0	3.0	446.34	0.1	6.1	345.4	19686.9
60.0	3.0	398.98	0.1	5.7	342.1	20525.4
63.0	3.0	351.23	0.1	5.3	332.0	20917.0
66.0	3.0	308.55	0.1	4.9	320.1	21127.3
69.0	3.0	283.24	0.1	4.7	321.2	22160.9
			sum	282.43	8730.13	9012.56

ตารางที่ ก.4 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ SV

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	381.74	0.1	0.0	0.0	0.0
2.0	2.0	729.40	0.2	0.3	0.7	1.4
4.0	2.0	919.69	0.2	0.9	3.5	14.0
6.0	2.0	1,325.66	0.3	1.9	11.4	68.2
8.0	2.0	1,695.65	0.4	3.2	25.8	206.8
10.0	2.0	2,259.57	0.5	5.4	53.8	538.2
12.0	2.0	2,639.37	0.6	7.5	90.5	1086.3
14.0	2.0	3,298.98	0.8	11.0	154.0	2156.0
16.0	2.0	3,548.86	0.8	13.5	216.4	3462.1
18.0	2.0	3,368.88	0.8	14.4	260.0	4679.4
20.0	2.0	3,119.06	0.7	14.9	297.1	5942.9
22.0	2.0	2,689.32	0.6	14.1	310.0	6820.2
24.0	2.0	2,389.56	0.6	13.7	327.8	7867.5
26.0	2.0	2,029.62	0.5	12.6	326.8	8496.1
28.0	2.0	1,529.63	0.4	10.2	285.6	7997.4
30.0	2.0	1,379.69	0.3	9.9	295.7	8872.2
32.0	2.0	1,109.65	0.3	8.5	270.6	8660.1
34.0	2.0	919.69	0.2	7.4	253.2	8609.2
36.0	2.0	832.22	0.2	7.1	256.9	9247.7
38.0	2.0	752.11	0.2	6.8	258.7	9829.2
40.0	2.0	674.32	0.2	6.4	257.0	10278.6
42.0	2.0	592.00	0.1	5.9	248.7	10446.1
45.0	3.0	533.22	0.1	5.7	257.2	11572.6
48.0	3.0	476.22	0.1	5.4	261.3	12543.5
51.0	3.0	422.11	0.1	5.1	261.5	13335.9
54.0	3.0	406.34	0.1	5.2	282.2	15239.0
57.0	3.0	380.98	0.1	5.2	294.8	16804.0
60.0	3.0	331.23	0.1	4.7	284.0	17040.0
63.0	3.0	313.55	0.1	4.7	296.4	18673.0
66.0	3.0	303.24	0.1	4.8	314.6	20763.7
69.0	3.0	301.34	0.1	5.0	341.7	23577.1
			sum	221.51	6797.95	7019.46

ตารางที่ ก.5 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ CV

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	549.72	0.131	0.000	0.000	0.000
4.0	4.0	809.75	0.193	0.771	3.086	12.343
8.0	4.0	849.74	0.202	0.810	6.476	51.810
12.0	4.0	969.69	0.231	0.924	11.086	133.028
16.0	4.0	1,189.63	0.283	1.133	18.133	290.134
20.0	4.0	1,619.49	0.386	1.543	30.857	617.141
23.0	3.0	2,159.33	0.514	1.543	35.486	816.173
26.0	3.0	2,989.07	0.712	2.136	55.529	1443.744
29.0	3.0	3,298.97	0.786	2.357	68.357	1982.357
30.5	1.5	3,418.93	0.814	1.221	37.254	1136.233
33.0	1.5	3,048.93	0.726	1.089	35.945	1186.186
34.5	1.5	2529.09	0.602	0.904	31.172	1075.424
36.0	3.0	2099.29	0.500	1.500	53.999	1943.949
37.5	3.0	1669.39	0.398	1.193	44.730	1677.366
40.5	3.0	1359.52	0.324	0.971	39.341	1593.320
43.5	3.0	1059.58	0.252	0.757	32.933	1432.583
46.5	4.0	930.3	0.222	0.886	41.212	1916.351
50.5	4.0	829.44	0.198	0.790	39.905	2015.180
54.5	4.0	697.23	0.166	0.664	36.201	1972.946
58.5	4.0	578.36	0.138	0.551	32.233	1885.629
62.5	4.0	449.11	0.107	0.428	26.741	1671.317
66.5	4.0	402.55	0.096	0.384	25.503	1695.935
70.5	4.0	390.44	0.093	0.372	26.223	1848.752
74.5	4.0	330.51	0.079	0.315	23.458	1747.605
78.5	4.0	290.1	0.069	0.276	21.695	1703.073
82.5	4.0	256.56	0.069	0.276	22.801	1881.056
			sum	23.79	800.35	824.15

ตารางที่ ก.6 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ CT

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	494.72	0.118	0.000	0.000	0.000
4.0	4.0	753.88	0.180	0.718	2.873	11.491
8.0	4.0	900.43	0.214	0.858	6.863	54.900
12.0	4.0	999.11	0.238	0.952	11.422	137.064
16.0	4.0	1,149.63	0.274	1.095	17.524	280.378
20.0	4.0	1,539.49	0.367	1.467	29.333	586.655
23.0	3.0	2,259.33	0.538	1.614	37.129	853.970
26.0	3.0	3,189.57	0.760	2.279	59.253	1540.587
29.0	3.0	3,448.97	0.821	2.464	71.465	2072.492
30.5	1.5	3,655.93	0.871	1.306	39.836	1214.996
33.0	1.5	3,643.99	0.868	1.302	42.960	1417.694
34.5	1.5	3523.09	0.839	1.259	43.423	1498.095
36.0	3.0	3219.29	0.767	2.300	82.808	2981.073
37.5	3.0	2897.66	0.690	2.070	77.640	2911.504
40.5	3.0	2534.09	0.604	1.811	73.330	2969.884
43.5	3.0	2259.58	0.538	1.614	70.230	3055.017
46.5	4.0	1993.67	0.475	1.899	88.319	4106.817
50.5	4.0	1594.33	0.380	1.519	76.704	3873.532
54.5	4.0	1300.11	0.310	1.239	67.503	3678.911
58.5	4.0	1023.78	0.244	0.975	57.057	3337.833
62.5	4.0	859.43	0.205	0.819	51.173	3198.282
66.5	4.0	641.11	0.153	0.611	40.616	2700.984
70.5	4.0	552.55	0.132	0.526	37.111	2616.351
74.5	4.0	490.44	0.117	0.467	34.809	2593.251
78.5	4.0	430.51	0.103	0.410	32.196	2527.369
82.5	4.0	390.1	0.093	0.372	30.660	2529.473
			sum	31.95	1182.24	1214.18

ตารางที่ ก.7 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานบ่อ CP

Time (hr), t_i	Δt_i	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0.0	0.0	551.72	0.131	0.000	0.000	0.000
4.0	4.0	600.75	0.143	0.572	2.289	9.157
8.0	4.0	792.34	0.189	0.755	6.039	48.310
12.0	4.0	982.34	0.234	0.936	11.230	134.763
16.0	4.0	1,298.22	0.309	1.237	19.789	316.617
20.0	4.0	1,599.11	0.381	1.523	30.469	609.375
23.0	3.0	2,234.90	0.532	1.597	36.728	844.736
26.0	3.0	2,819.67	0.672	2.015	52.382	1361.923
29.0	3.0	3,386.27	0.807	2.420	70.166	2034.815
30.5	1.5	3,628.03	0.864	1.296	39.532	1205.724
33.0	1.5	3,508.13	0.836	1.253	41.359	1364.838
34.5	1.5	3129.11	0.745	1.118	38.567	1330.566
36.0	3.0	2609.88	0.622	1.865	67.132	2416.757
37.5	3.0	2198.19	0.524	1.571	58.898	2208.692
40.5	3.0	1779.25	0.424	1.271	51.487	2085.232
43.5	3.0	1419.48	0.338	1.014	44.119	1919.178
46.5	4.0	1104.54	0.263	1.052	48.931	2275.273
50.5	4.0	942.33	0.224	0.898	45.336	2289.454
54.5	4.0	792.49	0.189	0.755	41.147	2242.503
58.5	4.0	667.13	0.159	0.636	37.180	2175.046
62.5	4.0	588.66	0.140	0.561	35.050	2190.639
66.5	4.0	509.31	0.121	0.485	32.266	2145.713
70.5	4.0	412.35	0.098	0.393	27.695	1952.497
74.5	4.0	366.34	0.087	0.349	26.001	1937.060
78.5	4.0	300.11	0.071	0.286	22.444	1761.838
82.5	4.0	244.99	0.058	0.233	19.255	1588.556
			sum	26.09	905.49	931.58



ภาคผนวก ข

การเจริญเติบโตของพืช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดความสูงของพีช

Day	ความสูงพีช (เซนติเมตร)					
	SP	ST	SV	CP	CT	CV
0	30	30	30	30	30	30
7	35.5	40.5	36.5	41	42.5	36
14	41.5	52.5	48	52	54.5	46.5
21	56	68	55.5	61	67.5	55.5
28	64	81.5	60.5	70	84	61
35	79	94	74.5	82	96	70.5
42	92	117.5	83	97.5	127.5	82
49	120	132.5	98.5	120	139.5	96
56	133.5	153.5	107.5	139	158	112.5
63	30	30	30	30	30	30
70	41	41	39.5	39	44.5	38.5
77	53	53.5	48	50.5	59	47.5
84	64.5	65	59	60.5	69.5	55.5
91	75.5	80.5	71	69.5	86.5	64
98	90	93	83	81.5	97	77.5
105	106	114.5	106	116.5	119	91.5
112	128.5	133.5	118.5	136	140	116.5
119	30	30	30	30	30	30
126	42	40.5	38.5	42	43.5	43.5
133	56	50.5	49.5	52.5	58.5	50.5
140	64.5	61.5	59.5	64	69	59.5
147	77	72.5	69.5	80	82	60.5
154	89	80.5	82	90	94	70.5
161	105.5	94.5	91	100	118.5	78
168	129.5	115.5	109	124	139	97
175	140.5	127	120.5	138	149	111.5
182	162.5	150.5	127	152	159.5	119

หมายเหตุ : ในวันที่ 0 63 และ 119 ทำการตัดพีชให้มีความสูง 30 เซนติเมตรก่อนเดินระบบ

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดน้ำหนักของพีชระยะเวลา 60 วัน

พีช	บ่อ/ซ้ำ	นน.แห้ง (g)			นน.สด (g)			% water content		
		ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม
ต้นอ่อน และหินดินดาน	SP1/1	22.24	42.36	64.6	88.59	123.62	212.21	74.9	65.73	69.56
	SP1/2	23.64	46.14	69.78	123.62	159.83	283.45	80.88	71.13	75.38
	เฉลี่ย	22.94	44.25	67.19	106.11	141.73	247.83	78.38	68.78	72.89
	SP2/1	18.61	38.94	57.55	43.54	153.1	196.64	57.26	74.57	70.73
	SP2/2	21.65	34.02	55.67	41.74	163.61	205.35	48.13	79.21	72.89
	เฉลี่ย	20.13	36.48	56.61	42.64	158.36	201	52.79	76.96	71.84
ต้นอ่อน กรวดและทราย	CP1/1	12.97	22.89	35.86	60.05	110.85	170.9	78.4	79.35	79.02
	CP1/2	18.17	58.12	76.29	121.58	281.45	403.03	85.06	79.35	81.07
	เฉลี่ย	15.57	40.51	56.08	90.82	196.15	286.97	82.86	79.35	80.46
	CP2/1	16.11	43.99	60.1	50.68	138.41	189.09	68.22	68.22	68.22
	CP2/2	13.99	62.75	76.74	53.75	287.6	341.35	73.97	78.18	77.52
	เฉลี่ย	15.05	53.37	68.42	52.22	213.01	265.22	71.18	74.94	74.2
รูปทาบี่ และหินดินดาน	ST1/1	11.8	37.48	49.28	68.85	339.22	408.07	82.86	88.95	87.92
	ST1/2	8.29	37.28	45.57	194.3	120.6	314.9	95.73	69.09	85.53
	เฉลี่ย	10.05	37.38	47.43	131.58	229.91	361.49	92.37	83.74	86.88
	ST2/1	8.53	41.28	49.81	63.63	216.52	280.15	86.59	80.93	82.22
	ST2/2	8.63	47.26	55.89	68.58	297.54	366.12	87.42	84.12	84.73
	เฉลี่ย	8.58	44.27	52.85	66.11	257.03	323.14	87.02	82.78	83.64
รูปทาบี่ กรวดและทราย	CT1/1	10.47	26.22	36.69	70.82	218.45	289.27	85.22	88	87.32
	CT1/2	8.72	41.15	49.87	57.8	272.89	330.69	84.91	84.92	84.92
	เฉลี่ย	9.6	33.69	43.28	64.31	245.67	309.98	85.08	86.29	86.04
	CT2/1	7.32	25.45	32.77	62.17	184.31	246.48	88.23	86.19	86.7
	CT2/2	7.28	29.77	37.05	91.5	201.39	292.89	92.04	85.22	87.35
	เฉลี่ย	7.3	27.61	34.91	76.84	192.85	269.69	90.5	85.68	87.06
หญ้าแฝก หินดินดาน	SV1/1	16.2	30.89	47.09	63.37	133.09	196.46	74.44	76.79	76.03
	SV1/2	14.4	26.31	40.71	67.63	97.05	164.68	78.71	72.89	75.28
	เฉลี่ย	15.3	28.6	43.9	65.5	115.07	180.57	76.64	75.15	75.69
	SV2/1	17.33	29.29	46.62	41.52	85.09	126.61	58.26	65.58	63.18
	SV2/2	22.24	24.25	46.49	72.42	59.12	131.54	69.29	58.98	64.66
	เฉลี่ย	19.79	26.77	46.56	56.97	72.11	129.08	65.27	62.87	63.93
หญ้าแฝก กรวด และทราย	CV1/1	18.11	35.89	54	107.07	198.93	306	83.09	81.96	82.35
	CV1/2	16.02	36.74	52.76	117.8	94.34	212.14	86.4	61.06	75.13
	เฉลี่ย	17.07	36.32	53.38	112.44	146.64	259.07	84.82	75.23	79.4
	CV2/1	11.7	11.7	23.4	40.91	66.36	107.27	71.4	82.37	78.19
	CV2/2	20.2	31.04	51.24	151.98	156.21	308.19	86.71	80.13	83.37
	เฉลี่ย	15.95	21.37	37.32	96.45	111.29	207.73	83.46	80.8	82.03

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดน้ำหนักของพีชระยะเวลา 120 วัน

พีช	บ่อ/ซ้ำ	นน.แห้ง (g)			นน.สด (g)			% water content		
		ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม
ต้นอ่อน และหีนดินดาน	SP1/1	30.4	72.8	103.1	93.5	178.6	272.1	67.5	59.3	62.1
	SP1/2	35.8	83.4	119.1	130.8	165.9	296.7	72.6	49.8	59.8
	เฉลี่ย	33.1	78.1	111.1	112.1	172.3	284.4	70.5	54.7	60.9
	SP2/1	31.2	86.9	118.2	95	184.4	279.4	67.1	52.8	57.7
	SP2/2	28.2	74	102.3	78.4	163.4	241.8	64	54.7	57.7
	เฉลี่ย	29.7	80.5	110.2	86.7	173.9	260.6	65.7	53.7	57.7
ต้นอ่อน กรวดและทราย	CP1/1	27.6	66.8	94.3	86.4	119.5	206	68.1	44.1	54.2
	CP1/2	32.5	70.8	103.2	97.4	125.4	222.7	66.7	43.5	53.6
	เฉลี่ย	30	68.8	98.8	91.9	122.5	214.3	67.3	43.8	53.9
	CP2/1	32.3	68.4	100.7	92.6	127.6	220.3	65.1	46.4	54.3
	CP2/2	35	72.2	107.3	80.5	153.5	234	56.5	52.9	54.2
	เฉลี่ย	33.7	70.3	104	86.6	140.6	227.1	61.1	50	54.2
รูปดาบ และหีนดินดาน	ST1/1	29.7	42.4	72	165.9	250.3	416.1	82.1	83.1	82.7
	ST1/2	32.7	44.9	77.6	159.4	279.4	438.8	79.5	83.9	82.3
	เฉลี่ย	31.2	43.7	74.8	162.7	264.8	427.5	80.8	83.5	82.5
	ST2/1	29.4	46.4	75.7	176.4	255.3	431.7	83.3	81.8	82.5
	ST2/2	24.3	45	69.3	169.5	260.1	429.6	85.7	82.7	83.9
	เฉลี่ย	26.8	45.7	72.5	173	257.7	430.6	84.5	82.3	83.2
รูปดาบ กรวด และทราย	CT1/1	31.1	47.7	78.8	79.8	238.5	318.3	61.1	80	75.3
	CT1/2	29	47.7	76.7	61.5	288.4	349.8	52.8	83.5	78.1
	เฉลี่ย	30	47.7	77.7	70.6	263.4	334	57.5	81.9	76.7
	CT2/1	37.7	50.7	88.3	75.8	200.5	276.3	50.3	74.7	68
	CT2/2	29.3	44.6	73.9	93.8	214.4	308.1	68.8	79.2	76
	เฉลี่ย	33.5	47.6	81.1	84.8	207.4	292.2	60.5	77	72.2
หญ้าแฝก และหีนดินดาน	SV1/1	22.3	41.6	63.9	88.9	143.9	232.8	74.9	71.1	72.6
	SV1/2	26.3	46.7	73	96.8	162.8	259.6	72.8	71.3	71.9
	เฉลี่ย	24.3	44.1	68.4	92.9	153.3	246.2	73.8	71.2	72.2
	SV2/1	18.7	41.6	60.2	68.7	75.4	144	72.8	44.9	58.2
	SV2/2	24.4	39	63.3	86	141.5	227.5	71.7	72.5	72.2
	เฉลี่ย	21.5	40.3	61.8	77.3	108.4	185.7	72.2	62.9	66.8
หญ้าแฝก กรวดและทราย	CV1/1	26.1	36.8	62.9	110	208	318	76.3	82.3	80.2
	CV1/2	25.3	33.3	58.6	167.8	154.3	322.1	84.9	78.4	81.8
	เฉลี่ย	25.7	35.1	60.8	138.9	181.2	320.1	81.5	80.6	81
	CV2/1	32.3	40.7	73	133.9	170.4	304.3	75.9	76.1	76
	CV2/2	25.7	35.7	61.3	160	160.3	320.3	83.9	77.8	80.9
	เฉลี่ย	29	38.2	67.2	147	165.3	312.3	80.3	76.9	78.5

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดน้ำหนักของพีชระยะเวลา 180 วัน

พีช	บ่อ/ซ้ำ	นน. แห้ง (g)			นน. สด (g)			% water content		
		ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม	ใต้ดิน	เหนือดิน	รวม
ต้นอ่อน และ หินดินดาน	SP1/1	39.2	83.5	122.7	85.5	142.6	228.1	54.2	41.4	46.2
	SP1/2	40.3	96.4	136.7	72.3	180.1	252.4	44.2	46.5	45.9
	เฉลี่ย	39.7	89.9	129.7	78.9	161.4	240.3	49.6	44.3	46
	SP2/1	35.2	92.9	128.2	80.9	192.4	273.3	56.5	51.7	53.1
	SP2/2	37.3	84	121.4	93.5	189.5	282.9	60.1	55.7	57.1
	เฉลี่ย	36.3	88.5	124.8	87.2	190.9	278.1	58.4	53.7	55.1
ต้นอ่อน กรวด และทราย	CP1/1	38.6	66.4	104.9	80.3	194	274.3	52	65.8	61.8
	CP1/2	40.3	73.9	114.1	105	210	315	61.7	64.8	63.8
	เฉลี่ย	39.4	70.1	109.5	92.7	202	294.7	57.5	65.3	62.8
	CP2/1	37.1	87.4	124.5	76	187	263	51.1	53.3	52.7
	CP2/2	40.5	65.1	105.6	95	204	299	57.4	68.1	64.7
	เฉลี่ย	38.8	76.2	115	85.5	195.5	281	54.6	61	59.1
รูปถาด และ หินดินดาน	ST1/1	40.26	87.33	127.59	188	295	483	78.59	70.4	40.26
	ST1/2	39.36	85.61	124.97	194	325	519	79.71	73.66	39.36
	เฉลี่ย	39.81	86.47	126.28	191	310	501	79.16	72.11	39.81
	ST2/1	44.36	93.54	137.9	200	302	502	77.82	69.03	44.36
	ST2/2	39.14	86.45	125.59	182	289	471	78.49	70.09	39.14
	เฉลี่ย	41.75	90	131.75	191	295.5	486.5	78.14	69.54	41.75
รูปถาด กรวด และทราย	CT1/1	42.8	72.3	115.1	157	275	432	84.2	82.8	83.3
	CT1/2	40.33	75.4	115.73	133	284	417	80.5	80.4	80.4
	เฉลี่ย	41.55	73.85	115.42	145	279.5	424.5	82.5	81.6	81.9
	CT2/1	42.3	75.8	118.1	169	298	467	84.1	82.7	83.2
	CT2/2	44.1	80.4	124.5	195	307	502	85.2	83.4	84.1
	เฉลี่ย	43.2	78.1	121.3	182	302.5	484.5	84.7	83	83.6
หินแผ่น และ หินดินดาน	SV1/1	25.7	47.3	73	153.9	185.4	339.3	83.3	86.1	78.5
	SV1/2	32.5	51.4	83.9	165.3	192.1	357.4	80.3	83.1	76.5
	เฉลี่ย	29.1	54.3	83.5	159.6	188.8	348.4	81.7	84.6	76
	SV2/1	24.4	53.2	77.6	156.5	123.4	279.9	84.4	80.3	72.3
	SV2/2	28.2	47.4	75.6	168.1	114	282.1	83.2	75.2	73.2
	เฉลี่ย	26.3	50.3	76.6	162.3	118.7	281	83.8	77.9	72.7
หินแผ่น กรวด และทราย	CV1/1	30.6	54.5	85.1	125	194	319	75.6	71.9	73.3
	CV1/2	32.6	58.7	91.2	159	167	326	79.5	64.9	72
	เฉลี่ย	31.6	56.6	88.1	142	180.5	322.5	77.8	68.7	72.7
	CV2/1	25.5	51.5	77	158	184	342	83.8	72	77.5
	CV2/2	28.5	61.3	89.9	173	216	389	83.5	71.6	76.9
	เฉลี่ย	27	56.4	83.4	165.5	200	365.5	83.7	71.8	77.2





ภาคผนวก ค

ประสิทธิภาพของระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 องค์ประกอบของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

องค์ประกอบ	หน่วย	ค่าที่ใช้
กลูโคส	mg/l	282.1
แมกนีเซียมซัลเฟต	mg/l	28.02
แคลเซียมคลอไรด์	mg/l	0.06
แอมโมเนียมคลอไรด์	mg/l	48-54.6
ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	mg/l	22-131.7
เฟอร์ริกคลอไรด์	mg/l	0.06
คอปเปอร์ซัลเฟต	mg/l	0.012
แมงกานีสคลอไรด์	mg/l	0.012
โคบอลต์คลอไรด์	mg/l	0.012
ซิงค์ซัลเฟต	mg/l	0.03
แอมโมเนียมโมลิบเดต	mg/l	0.012

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดฟอสฟอรัสของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
S	16.923	2	95	0
SP	12.367	2	95	0
ST	5.206	2	95	0.007
SV	5.328	2	95	0.006
CT	0.811	2	95	0.448
CV	2.378	2	95	0.098
CP	3.575	2	95	0.032

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
S	Between Groups	1622.187	2	811.093	21.414	0
	Within Groups	3598.281	95	37.877		
	Total	5220.467	97			
SP	Between Groups	192.608	2	96.304	6.961	0.002
	Within Groups	1314.279	95	13.835		
	Total	1506.888	97			
ST	Between Groups	179.103	2	89.552	6.565	0.002
	Within Groups	1295.838	95	13.64		
	Total	1474.941	97			
SV	Between Groups	194.245	2	97.122	4.174	0.018
	Within Groups	2210.494	95	23.268		
	Total	2404.739	97			
CT	Between Groups	9.444	2	4.722	0.093	0.911
	Within Groups	4827.751	95	50.818		
	Total	4837.195	97			
CV	Between Groups	75.402	2	37.701	0.407	0.667
	Within Groups	8808.358	95	92.72		
	Total	8883.76	97			
CP	Between Groups	13.213	2	6.606	0.104	0.901
	Within Groups	6034.028	95	63.516		
	Total	6047.241	97			
Robust Tests of Equality of Means						
		Statistic ^a	df1	df2	Sig.	
S	Welch	17.425	2	58.79	0	
SP	Welch	10.627	2	58.395	0	
ST	Welch	4.699	2	57.47	0.013	
SV	Welch	4.684	2	58.647	0.013	
CT	Welch	0.08	2	60.732	0.923	
CV	Welch	0.562	2	60.278	0.573	
CP	Welch	0.127	2	61.188	0.881	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

LSD	Multiple Comparisons							
	Dependent Variable	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
S	1	2	6.20634*	1.52835	0	3.1722	9.2405	
		3	9.99751*	1.53935	0	6.9415	13.0535	
	2	1	-6.20634*	1.52835	0	-9.2405	-3.1722	
		3	3.79117*	1.50393	0.013	0.8055	6.7768	
	3	1	-9.99751*	1.53935	0	-13.0535	-6.9415	
		2	-3.79117*	1.50393	0.013	-6.7768	-0.8055	
	SP	1	2	-0.46635	0.92367	0.615	-2.3001	1.3674
			3	-3.18310*	0.93032	0.001	-5.03	-1.3362
		2	1	0.46635	0.92367	0.615	-1.3674	2.3001
			3	-2.71676*	0.90891	0.004	-4.5212	-0.9123
		3	1	3.18310*	0.93032	0.001	1.3362	5.03
			2	2.71676*	0.90891	0.004	0.9123	4.5212
ST	1	2	-2.37053*	0.91717	0.011	-4.1913	-0.5497	
		3	-3.24489*	0.92377	0.001	-5.0788	-1.411	
	2	1	2.37053*	0.91717	0.011	0.5497	4.1913	
		3	-0.87436	0.90252	0.335	-2.6661	0.9174	
	3	1	3.24489*	0.92377	0.001	1.411	5.0788	
		2	0.87436	0.90252	0.335	-0.9174	2.6661	
SV	1	2	1.00169	1.1979	0.405	-1.3764	3.3798	
		3	3.37549*	1.20652	0.006	0.9802	5.7707	
	2	1	-1.00169	1.1979	0.405	-3.3798	1.3764	
		3	2.37380*	1.17876	0.047	0.0337	4.7139	
	3	1	-3.37549*	1.20652	0.006	-5.7707	-0.9802	
		2	-2.37380*	1.17876	0.047	-4.7139	-0.0337	
CT	1	2	0.75988	1.7703	0.669	-2.7546	4.2744	
		3	0.33664	1.78305	0.851	-3.2032	3.8764	
	2	1	-0.75988	1.7703	0.669	-4.2744	2.7546	
		3	-0.42325	1.74201	0.809	-3.8816	3.0351	
	3	1	-0.33664	1.78305	0.851	-3.8764	3.2032	
		2	0.42325	1.74201	0.809	-3.0351	3.8816	

Asymptotically F distributed.

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
CV	1	2	-1.31046	2.39123	0.585	-6.0577	3.4367
		3	0.78854	2.40845	0.744	-3.9928	5.5699
	2	1	1.31046	2.39123	0.585	-3.4367	6.0577
		3	2.09899	2.35303	0.375	-2.5724	6.7703
	3	1	-0.78854	2.40845	0.744	-5.5699	3.9928
		2	-2.09899	2.35303	0.375	-6.7703	2.5724
CP	1	2	-0.09902	1.97915	0.96	-4.0281	3.8301
		3	0.72047	1.9934	0.719	-3.2369	4.6779
	2	1	0.09902	1.97915	0.96	-3.8301	4.0281
		3	0.81949	1.94752	0.675	-3.0468	4.6858
	3	1	-0.72047	1.9934	0.719	-4.6779	3.2369
		2	-0.81949	1.94752	0.675	-4.6858	3.0468

หมายเหตุ : *. = The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดซีโอดีของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
SCOD	27.375	2	95	0
SPCOD	8.544	2	95	0
STCOD	6.63	2	95	0.002
SVCOD	7.054	2	95	0.001
CTCOD	9.439	2	95	0
CVCOD	18.58	2	95	0
CPCOD	10.795	2	95	0

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดซีโอดีของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
SCOD	Between Groups	219.382	2	109.691	7.946	0.001
	Within Groups	1311.45	95	13.805		
	Total	1530.832	97			
SPCOD	Between Groups	19.187	2	9.594	0.611	0.545
	Within Groups	1492.173	95	15.707		
	Total	1511.361	97			
STCOD	Between Groups	65.232	2	32.616	2.805	0.066
	Within Groups	1104.759	95	11.629		
	Total	1169.991	97			
SVCOD	Between Groups	40.134	2	20.067	1.853	0.162
	Within Groups	1028.718	95	10.829		
	Total	1068.851	97			
CTCOD	Between Groups	303.068	2	151.534	6.62	0.002
	Within Groups	2174.645	95	22.891		
	Total	2477.713	97			
CVCOD	Between Groups	735.125	2	367.563	10.489	0
	Within Groups	3328.924	95	35.041		
	Total	4064.049	97			
CPCOD	Between Groups	89.596	2	44.798	2.717	0.071
	Within Groups	1566.489	95	16.489		
	Total	1656.085	97			
Robust Tests of Equality of Means						
		Statistic ^a	df1	df2	Sig.	
SCOD	Welch	5.299	2	51.239	0.008	
SPCOD	Welch	0.94	2	51.824	0.397	
STCOD	Welch	1.991	2	57.313	0.146	
SVCOD	Welch	2.394	2	50.605	0.102	
CTCOD	Welch	13.103	2	54.143	0	
CVCOD	Welch	4.919	2	53.905	0.011	
CPCOD	Welch	1.615	2	52.65	0.209	

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดซีโอดีของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

a. Asymptotically F distributed.	Multiple Comparisons								
	LSD								
	Dependent Variable	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		
						Lower Bound	Upper Bound		
a. Asymptotically F distributed.	SCOD	1	2	3.40011 [*]	0.92268	0	1.5684	5.2319	
			3	2.98614 [*]	0.92932	0.002	1.1412	4.8311	
		2	1	-3.40011 [*]	0.92268	0	-5.2319	-1.5684	
			3	-0.41398	0.90794	0.649	-2.2165	1.3885	
		3	1	-2.98614 [*]	0.92932	0.002	-4.8311	-1.1412	
			2	0.41398	0.90794	0.649	-1.3885	2.2165	
		SPCOD	1	2	1.08733	0.9842	0.272	-0.8666	3.0412
				3	0.59585	0.99129	0.549	-1.3721	2.5638
			2	1	-1.08733	0.9842	0.272	-3.0412	0.8666
				3	-0.49149	0.96848	0.613	-2.4142	1.4312
			3	1	-0.59585	0.99129	0.549	-2.5638	1.3721
				2	0.49149	0.96848	0.613	-1.4312	2.4142
	STCOD	1	2	1.47174	0.84685	0.085	-0.2095	3.153	
			3	1.94271 [*]	0.85295	0.025	0.2494	3.636	
		2	1	-1.47174	0.84685	0.085	-3.153	0.2095	
			3	0.47097	0.83332	0.573	-1.1834	2.1253	
		3	1	-1.94271 [*]	0.85295	0.025	-3.636	-0.2494	
			2	-0.47097	0.83332	0.573	-2.1253	1.1834	
	SVCOD	1	2	1.57246	0.81719	0.057	-0.0499	3.1948	
			3	0.86482	0.82307	0.296	-0.7692	2.4988	
		2	1	-1.57246	0.81719	0.057	-3.1948	0.0499	
			3	-0.70764	0.80413	0.381	-2.304	0.8888	
		3	1	-0.86482	0.82307	0.296	-2.4988	0.7692	
			2	0.70764	0.80413	0.381	-0.8888	2.304	
CTCOD	1	2	4.31961 [*]	1.18814	0	1.9608	6.6784		
		3	2.41135 [*]	1.1967	0.047	0.0356	4.7871		
	2	1	-4.31961 [*]	1.18814	0	-6.6784	-1.9608		
		3	-1.90826	1.16916	0.106	-4.2293	0.4128		
	3	1	-2.41135 [*]	1.1967	0.047	-4.7871	-0.0356		
		2	1.90826	1.16916	0.106	-0.4128	4.2293		

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดซีโอดีของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
CVCOD	1	2	5.91918*	1.47003	0	3.0008	8.8376
		3	5.85833*	1.48062	0	2.9189	8.7977
	2	1	-5.91918*	1.47003	0	-8.8376	-3.0008
		3	-0.06086	1.44654	0.967	-2.9326	2.8109
	3	1	-5.85833*	1.48062	0	-8.7977	-2.9189
		2	0.06086	1.44654	0.967	-2.8109	2.9326
CPCOD	1	2	2.16709*	1.00841	0.034	0.1651	4.169
		3	1.91729	1.01567	0.062	-0.0991	3.9337
	2	1	-2.16709*	1.00841	0.034	-4.169	-0.1651
		3	-0.2498	0.9923	0.802	-2.2198	1.7202
	3	1	-1.91729	1.01567	0.062	-3.9337	0.0991
		2	0.2498	0.9923	0.802	-1.7202	2.2198

หมายเหตุ : *. = The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดทีเคเอ็นของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
STKN	3.644	2	95	0.03
SPTKN	2.767	2	95	0.068
STTKN	2.359	2	95	0.1
SVTKN	8.031	2	95	0.001
CTYTKN	4.409	2	95	0.015
CPTKN	25.495	2	95	0
CVTKN	8.581	2	95	0

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ
การกำจัดที่เคเอ็นของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
STKN	Between Groups	90.087	2	45.044	1.477	0.233
	Within Groups	2896.281	95	30.487		
	Total	2986.368	97			
SPTKN	Between Groups	278.978	2	139.489	7.217	0.001
	Within Groups	1836.259	95	19.329		
	Total	2115.236	97			
STTKN	Between Groups	128.074	2	64.037	2.145	0.123
	Within Groups	2836.459	95	29.857		
	Total	2964.533	97			
SVTKN	Between Groups	398.567	2	199.284	10.537	0
	Within Groups	1796.755	95	18.913		
	Total	2195.322	97			
CTYTKN	Between Groups	199.825	2	99.913	3.032	0.053
	Within Groups	3130.483	95	32.952		
	Total	3330.309	97			
CPTKN	Between Groups	1465.31	2	732.655	15.848	0
	Within Groups	4391.997	95	46.232		
	Total	5857.308	97			
CVTKN	Between Groups	415.184	2	207.592	5.977	0.004
	Within Groups	3299.717	95	34.734		
	Total	3714.902	97			
Robust Tests of Equality of Means						
		Statistic ^a	df1	df2	Sig.	
STKN	Welch	1.135	2	57.781	0.328	
SPTKN	Welch	8.627	2	60.003	0.001	
STTKN	Welch	1.999	2	62.741	0.144	
SVTKN	Welch	14.467	2	57.305	0	
CTYTKN	Welch	3.657	2	60.409	0.032	
CPTKN	Welch	26.624	2	49.048	0	
CVTKN	Welch	8.004	2	57.7	0.001	

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดที่เคเอ็นของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

Dependent Variable	Multiple Comparisons							
	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		
						Lower Bound	Upper Bound	
STKN	1	2	-2.29817	1.37118	0.097	-5.0203	0.424	
		3	-0.7515	1.38105	0.588	-3.4932	1.9902	
	2	1	2.29817	1.37118	0.097	-0.424	5.0203	
		3	1.54667	1.34927	0.255	-1.132	4.2253	
	3	1	0.7515	1.38105	0.588	-1.9902	3.4932	
		2	-1.54667	1.34927	0.255	-4.2253	1.132	
	SPTKN	1	2	-1.53843	1.0918	0.162	-3.7059	0.6291
			3	-4.12020*	1.09966	0	-6.3033	-1.9371
		2	1	1.53843	1.0918	0.162	-0.6291	3.7059
			3	-2.58177*	1.07435	0.018	-4.7146	-0.4489
		3	1	4.12020*	1.09966	0	1.9371	6.3033
			2	2.58177*	1.07435	0.018	0.4489	4.7146
STTKN	1	2	1.73871	1.35695	0.203	-0.9552	4.4326	
		3	-0.99099	1.36672	0.47	-3.7043	1.7223	
	2	1	-1.73871	1.35695	0.203	-4.4326	0.9552	
		3	-2.72970*	1.33526	0.044	-5.3805	-0.0789	
	3	1	0.99099	1.36672	0.47	-1.7223	3.7043	
		2	2.72970*	1.33526	0.044	0.0789	5.3805	
SVTKN	1	2	-4.67381*	1.07999	0	-6.8179	-2.5298	
		3	-1.02128	1.08776	0.35	-3.1808	1.1382	
	2	1	4.67381*	1.07999	0	2.5298	6.8179	
		3	3.65252*	1.06273	0.001	1.5427	5.7623	
	3	1	1.02128	1.08776	0.35	-1.1382	3.1808	
		2	-3.65252*	1.06273	0.001	-5.7623	-1.5427	
CTYTKN	1	2	-1.70838	1.42554	0.234	-4.5384	1.1217	
		3	1.74596	1.43581	0.227	-1.1045	4.5964	
	2	1	1.70838	1.42554	0.234	-1.1217	4.5384	
		3	3.45434*	1.40276	0.016	0.6695	6.2392	
	3	1	-1.74596	1.43581	0.227	-4.5964	1.1045	
		2	-3.45434*	1.40276	0.016	-6.2392	-0.6695	

a. Asymptotically F distributed.

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของประสิทธิภาพ

การกำจัดที่เคเอ็นของแต่ละช่วงระยะเวลาการเดินระบบ (ต่อ)

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) run	(J) run	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
CPTKN	1	2	1.4918	1.68852	0.379	-1.8603	4.8439
		3	8.86104*	1.70068	0	5.4848	12.2373
	2	1	-1.4918	1.68852	0.379	-4.8439	1.8603
		3	7.36923*	1.66154	0	4.0707	10.6678
	3	1	-8.86104*	1.70068	0	-12.2373	-5.4848
		2	-7.36923*	1.66154	0	-10.6678	-4.0707
CVTKN	1	2	-1.39226	1.46357	0.344	-4.2978	1.5133
		3	3.45895*	1.47411	0.021	0.5325	6.3854
	2	1	1.39226	1.46357	0.344	-1.5133	4.2978
		3	4.85121*	1.44018	0.001	1.9921	7.7103
	3	1	-3.45895*	1.47411	0.021	-6.3854	-0.5325
		2	-4.85121*	1.44018	0.001	-7.7103	-1.9921

หมายเหตุ : *. = The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลางต่างชนิดกัน

ตัวอื่น	Paired Samples Statistics									
			Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
	Pair 1	SP	82.5439	98	3.94144	0.39815				
		CP	65.5901	98	7.89574	0.79759				
	Paired Samples Correlations									
			N	Correlation	Sig.					
	Pair 1	SP and CP	98	0.588	0					
	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	SP - CP	1.70E+01	6.42351	0.64887	15.66601	18.24167	26.128	97	0	

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ
การกำจัดฟอสฟอรัสของตัวกลางต่างชนิดกัน (ต่อ)

รูปถ่าย									
Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	ST	85.5486	98	3.89943	0.3939				
	CT	65.6336	98	7.06173	0.71334				
Paired Samples Correlations									
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	ST and CT	98	0.384	0					
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	ST - CT	1.99E+01	6.62593	0.66932	18.58658	21.24342	29.754	97	0
หน้าแรก									
Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	SV	78.3421	98	4.97907	0.50296				
	CV	62.5438	98	9.57001	0.96672				
Paired Samples Correlations									
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	SV and CV	98	0.697	0					
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	SV - CV	1.58E+01	7.06791	0.71397	14.38135	17.21541	22.128	97	0

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ
การกำจัดซีโอดีของตัวกลางต่างชนิดกัน

Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	SPCOD	78.5186	98	3.94728	0.39874				
	CPCOD	64.4229	98	4.13195	0.41739				
Paired Samples Correlations									
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	SPCOD and CPCOD	98	0.64	0					
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	SPCOD - CPCOD	1.41E+01	3.43372	0.34686	13.4073	14.78413	40.638	97	0
Paired Samples Statistics									
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	STCOD	78.9249	98	3.47301	0.35083				
	CTCOD	62.1316	98	5.05405	0.51054				
Paired Samples Correlations									
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	STCOD and CTCOD	98	0.624	0					
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	STCOD - CTCOD	1.68E+01	3.96352	0.40038	15.99863	17.5879	41.944	97	0

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ
การกำจัดซีโอดีของตัวกลางต่างชนิดกัน (ต่อ)

		Paired Samples Statistics							
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	SVCOD	74.9278	98	3.3195	0.33532				
	CVCOD	57.0111	98	6.47282	0.65385				
		Paired Samples Correlations							
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	SVCOD and CVCOD	98	0.722	0					
		Paired Samples Test							
		Paired Differences						t	df
Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
					Lower	Upper			
Pair 1	SVCOD - CVCOD	1.79E+01	4.67852	0.4726	16.97865	18.85462	37.911	97	0

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ
การกำจัดทีเคเอ็นของตัวกลางต่างชนิดกัน

		Paired Samples Statistics							
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	SPTKN	58.7195	98	4.66975	0.47172				
	CPTKN	48.9057	98	7.77075	0.78496				
		Paired Samples Correlations							
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	SPTKN and CPTKN	98	-0.125	0.219					
		Paired Samples Test							
		Paired Differences						t	df
Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
					Lower	Upper			
Pair 1	SPTKN - CPTKN	9.81383	9.55376	0.96508	7.89842	11.72924	10.169	97	0

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบทางสถิติ T-Paired Test ของประสิทธิภาพ
การกำจัดที่เคเอ็นของตัวกลางต่างชนิดกัน (ต่อ)

		Paired Samples Statistics							
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	STTKN	61.9792	98	5.52831	0.55844				
	CTYTKN	47.5132	98	5.85944	0.59189				
		Paired Samples Correlations							
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	STTKN and CTYTKN	98	0.238	0.018					
		Paired Samples Test							
		Paired Differences						t	df
Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
Pair 1	STTKN - CTYTKN	1.45E+01	7.03176	0.71031	Lower 13.05624	Upper 15.8758	20.366	97	0
		Paired Samples Statistics							
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean				
Pair 1	SVTKN	59.3428	98	4.75733	0.48056				
	CVTKN	46.966	98	6.18853	0.62514				
		Paired Samples Correlations							
		N	Correlation	Sig.					
Pair 1	SVTKN and CVTKN	98	0.259	0.01					
		Paired Samples Test							
		Paired Differences						t	df
Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference						
Pair 1	SVTKN - CVTKN	1.24E+01	6.76016	0.68288	Lower 11.0215	Upper 13.73215	18.124	97	0



ภาคผนวก ง

สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ ง.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณสมมูลมวลในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

บ่อ	ตัวกลางและพืช	% removal	ฟอสฟอรัสที่ เข้าระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่ ออกจากระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่ เหลือในระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่เหลือในระบบ (mg)			% mass		
						พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ	พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ
S1	Shale	84.17	13097.393	2073.178	11024.214	NA	10960.808	63.406	NA	99.42	0.58
S2		80.53	13097.393	2550.145	10547.248	NA	10580.132	-32.884	NA	100.31	-0.31
SP1	Shale และ ต้นอ้อ	84.75	13097.393	1997.379	11100.013	1278.11	9490.611	331.291	11.51	85.50	2.98
SP2		84.98	13097.393	1966.938	11130.454	1425.71	9726.893	-22.151	12.81	87.39	-0.20
ST1	Shale และ รูปถ่าย	85.43	13097.393	1908.760	11188.633	1172.07	9004.921	1011.642	10.48	80.48	9.04
ST2		83.74	13097.393	2129.304	10968.088	1095.80	8939.287	932.998	9.99	81.50	8.51
SV1	Shale และ หญ้าแฝก	79.32	13097.393	2708.397	9942.699	447.51	8939.287	555.900	4.50	89.91	5.59
SV2		83.25	13097.393	2193.913	10903.480	506.64	9018.048	1378.796	4.65	82.71	12.65
CV1	กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	59.60	13097.393	5291.667	6655.726	559.68	5673.866	422.182	8.41	85.25	6.34
CV2		59.30	13097.393	5330.911	7766.482	494.12	6731.823	540.541	6.36	86.68	6.96
CT1	กรวด ทราย และ รูปถ่าย	67.54	13097.393	4251.668	8399.428	953.94	5903.302	1542.191	11.36	70.28	18.36
CT2		71.77	13097.393	3697.6533	8953.4430	1027.38	5916.049	2010.015	11.47	66.08	22.45
CP1	กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	66.26	13097.393	4419.671	8231.425	635.46	5826.823	1769.144	7.72	70.79	21.49
CP2		65.38	13097.393	4533.697	8563.696	777.45	5903.302	1882.942	9.08	68.93	21.99

ตารางที่ ง.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณสมมูลมวลในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

บ่อ	ตัวกลาง และพืช	% removal	ฟอสฟอรัสที่ เข้าระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่ ออกจากระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่ เหลือในระบบ (mg)	ฟอสฟอรัสที่เหลือในระบบ (mg) (massbalance)			% mass		
						พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ	พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ
S1	Shale	77.58	39947.995	8955.224	30992.772	NA	29298.893	1693.879	NA	94.53	5.47
S2		74.26	39947.995	10281.746	29666.249	NA	27474.273	2191.976	NA	92.61	7.39
SP1	Shale และ ต้นอ้อ	81.95	39947.995	7212.003	32735.992	3407.01	26292.865	3036.118	10.41	80.32	9.27
SP2		82.60	39947.995	6949.395	32998.600	3635.27	25373.991	3989.338	11.02	76.89	12.09
ST1	Shale และ รูปถายี่	85.89	39947.995	5637.534	34310.461	5431.70	25807.175	3071.587	15.83	75.22	8.95
ST2		86.76	39947.995	5290.726	34657.269	5853.21	26870.442	1933.617	16.89	77.53	5.58
SV1	Shale และ หญ้าแฝก	78.87	39947.995	8442.321	31505.674	3395.67	28550.667	-440.663	10.78	90.62	-1.40
SV2		79.53	39947.995	8177.363	31770.633	2506.83	26870.442	2393.361	7.89	84.58	7.53
CV1	กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	66.64	39947.995	13326.407	26621.588	2542.33	19452.809	4626.449	9.55	73.07	17.38
CV2		64.79	39947.995	14066.967	25881.029	3385.27	17158.443	5337.315	13.08	66.30	20.62
CT1	กรวด ทราย และ รูปถายี่	67.53	39947.995	12969.219	26978.777	4799.10	17859.499	4320.177	17.79	66.20	13.71
CT2		66.21	39947.995	13498.112	26449.884	4597.77	18127.175	3724.938	17.38	68.53	11.72
CP1	กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	66.55	39947.995	13364.526	26583.469	2870.72	17438.866	6273.884	10.80	65.60	23.60
CP2		68.25	39947.995	12682.680	27265.315	2366.52	19134.147	5764.648	8.68	70.18	21.14

ตารางที่ ง.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณสมมูลมวลในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

บ่อ	ตัวกลางและพืช	% removal	ฟอสฟอรัส ที่เข้าระบบ (mg)	ฟอสฟอรัส ที่ออกจาก ระบบ (mg)	ฟอสฟอรัส ที่เหลือใน ระบบ (mg)	P ที่เหลือในระบบ (mg) (massbalance)			% mass		
						พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ	พืช	ตัวกลาง	อื่น ๆ
S1	Shale	73.17	75840.00	20346.50	55493.50	NA	51763.16	3730.34	NA	93.28	6.72
S2		72.12	75840.00	21147.55	54692.45	NA	49460.57	5231.89	NA	90.43	9.57
SP1	Shale และ ต้นอ้อ	84.56	75840.00	11705.93	64134.07	12554.91	46390.45	5188.71	19.58	72.33	8.09
SP2		85.50	75840.00	10994.22	64845.78	10427.80	47980.33	6437.65	16.08	73.99	9.93
ST1	Shale และ รูปถ่าย	87.09	75840.00	9789.56	66050.44	12197.88	45513.27	8339.29	18.47	68.91	12.63
ST2		87.45	75840.00	9519.69	66320.31	11979.03	45038.14	9303.14	18.06	67.91	14.03
SV1	Shale และ หญ้าแฝก	77.15	75840.00	17328.28	58511.72	8035.49	45166.06	1147.79	13.73	77.19	1.96
SV2		76.68	75840.00	17689.08	58150.92	8264.49	46427.00	-255.11	14.21	79.84	-0.44
CV1	กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	62.08	75840.00	28761.36	47078.64	6009.67	27811.75	13257.22	12.77	59.08	28.16
CV2		63.87	75840.00	27404.70	48435.30	6875.11	26196.95	15363.24	14.19	54.09	31.72
CP1	กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	67.38	75840.00	24742.17	51097.83	7523.25	29000.67	14573.90	14.72	56.76	28.52
CP2		66.10	75840.00	25711.46	50128.54	8643.62	30810.67	10674.25	17.24	61.46	21.29
CT1	กรวด ทราย และ รูปถ่าย	67.53	75840.00	24626.32	51213.68	9012.16	28521.55	13679.96	17.60	55.69	26.71
CT2		67.51	75840.00	24643.44	51196.56	9990.27	27297.14	13909.15	19.51	53.32	27.17

1. การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตุ๊กกลางหินดินดาน

1.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณหินดินดานที่ใช้ในระบบจากรูปที่ 3.3 มีการคำนวณดังนี้

- หินดินดานขนาด 2.00-4.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตร} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 50 \times 10 \times 50 \\ &= 25000 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

จาก ความหนาแน่นหินดินดานมีค่าเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ $D = m/V$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า น้ำหนัก (m)} &= DV \\ &= 25,000 \times 1.87 \\ &= 46,875 \text{ กรัม หรือ } 46.88 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

1.2 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณทรายที่ใช้ในระบบจากรูปที่ 3.4 มีการคำนวณดังนี้

- ทรายหยาบขนาด 0.50-2.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตร} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 50 \times 80 \times 50 \\ &= 200,000 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

จาก ความหนาแน่นหินดินดานมีค่าเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ $D = m/V$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า น้ำหนัก} &= DV \\ &= 200,000 \times 1.81 \\ &= 362,000 \text{ กรัม หรือ } 362 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

ตารางที่ ง.4 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

	บ่อ		abs	P จาก กราฟ	P (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสมใน ตัวอย่าง (mg)
Shale	S1	1T	0.381	5.366	0.054	0.032	0.003	0.029	372800	10960.808
		1U	0.241	3.394	0.034					
		2T	0.169	2.38	0.024					
		2U	0.124	1.746	0.017					
	S2	1T	0.284	4	0.04	0.031	0.003	0.028	372800	10580.132
		1U	0.265	3.732	0.037					
		2T	0.184	2.592	0.026					
		2U	0.153	2.155	0.022					
Shale และ ดินเหนียว	SP1	1T	0.328	4.62	0.046	0.028	0.003	0.025	372800	9490.611
		1U	0.225	3.169	0.032					
		2T	0.171	2.408	0.024					
		2U	0.079	1.113	0.011					
	SP2	1T	0.315	4.437	0.044	0.029	0.003	0.026	372800	9726.893
		1U	0.258	3.634	0.036					
		2T	0.186	2.62	0.026					
		2U	0.062	0.873	0.009					
Shale และ รูปถ่าย	ST1	1T	0.258	3.634	0.036	0.027	0.003	0.024	372800	9004.921
		1U	0.272	3.831	0.038					
		2T	0.143	2.014	0.02					
		2U	0.093	1.31	0.013					
	ST2	1T	0.264	3.718	0.037	0.027	0.003	0.024	372800	8939.287
		1U	0.278	3.915	0.039					
		2T	0.159	2.239	0.022					
		2U	0.06	0.845	0.008					
Shale และ หินภูเขาไฟ	SV1	1T	0.289	4.07	0.041	0.027	0.003	0.024	372800	8939.287
		1U	0.283	3.986	0.04					
		2T	0.068	0.958	0.01					
		2U	0.121	1.704	0.017					

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

	บ่อ		abs	P จาก กราฟ	P (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสม ใน ตัวอย่าง (mg)
Shale และ ภูเขาไฟ	SV2	1T	0.309	4.352	0.044	0.027	0.003	0.024	372800	9018.048
		1U	0.224	3.155	0.032					
		2T	0.13	1.831	0.018					
		2U	0.104	1.465	0.015					
กรวดทราย และ ภูเขาไฟ	CV1	1T	0.206	2.901	0.029	0.021	0.006	0.016	362000	5673.866
		1U	0.168	2.366	0.024					
		2T	0.109	1.535	0.015					
		2U	0.126	1.775	0.018					
	CV2	1T	0.203	2.859	0.029	0.024	0.006	0.019	362000	6731.823
		1U	0.233	3.282	0.033					
		2T	0.081	1.141	0.011					
		2U	0.175	2.465	0.025					
กรวดทราย และ ภูเขาไฟ	CT1	1T	0.211	2.972	0.03	0.022	0.006	0.016	362000	5903.302
		1U	0.183	2.577	0.026					
		2T	0.138	1.944	0.019					
		2U	0.095	1.338	0.013					
	CT2	1T	0.243	3.423	0.034	0.022	0.006	0.016	362000	5916.049
		1U	0.155	2.183	0.022					
		2T	0.137	1.93	0.019					
		2U	0.093	1.31	0.013					
กรวดทราย และ ดินอ้อ	CP1	1T	0.269	3.789	0.038	0.022	0.006	0.016	362000	5826.823
		1U	0.106	1.493	0.015					
		2T	0.174	2.451	0.025					
		2U	0.072	1.014	0.01					
	CP2	1T	0.247	3.479	0.035	0.022	0.006	0.016	362000	5903.302
		1U	0.161	2.268	0.023					
		2T	0.084	1.183	0.012					
		2U	0.135	1.901	0.019					

ตารางที่ ง.5 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

	บ่อ		abs	P จาก กราฟ	P (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสมใน ตัวอย่าง (mg)
Shale	S1	1T	0.684	9.634	0.096	0.08141	0.00282	0.07859	372800	29298.893
		1U	0.571	8.042	0.08					
		2T	0.571	8.042	0.08					
		2U	0.486	6.845	0.068					
	S2	1T	0.71	10	0.1	0.07651	0.00282	0.0737	372800	27474.273
		1U	0.581	8.183	0.082					
		2T	0.401	5.648	0.056					
		2U	0.481	6.775	0.068					
Shale และ ดินอ้อ	SP1	1T	0.642	9.042	0.09	0.07335	0.00282	0.07053	372800	26292.865
		1U	0.551	7.761	0.078					
		2T	0.545	7.676	0.077					
		2U	0.345	4.859	0.049					
	SP2	1T	0.683	9.62	0.096	0.07088	0.00282	0.06806	372800	25373.991
		1U	0.553	7.789	0.078					
		2T	0.413	5.817	0.058					
		2U	0.364	5.127	0.051					
Shale และ ทุปดาณี	ST1	1T	0.699	9.845	0.098	0.07204	0.00282	0.06923	372800	25807.175
		1U	0.491	6.915	0.069					
		2T	0.501	7.056	0.071					
		2U	0.355	5	0.05					
	ST2	1T	0.637	8.972	0.09	0.07489	0.00282	0.07208	372800	26870.442
		1U	0.587	8.268	0.083					
		2T	0.474	6.676	0.067					
		2U	0.429	6.042	0.06					
Shale และ หินปูนแตก	SV1	1T	0.736	10.366	0.104	0.0794	0.00282	0.07658	372800	28550.667
		1U	0.549	7.732	0.077					
		2T	0.513	7.225	0.072					
		2U	0.457	6.437	0.064					

ตารางที่ ง.5 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

	บ่อ		P (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสมใน ตัวอย่าง (mg)
Shale และ ภูเขาไฟ	SV2	1T	0.092	0.07489	0.00282	0.07208	372800	26870.442
		1U	0.082					
		2T	0.074					
		2U	0.052					
กรวด ทราย และ ภูเขาไฟ	CV1	1T	0.062	0.05951	0.00577	0.05374	362000	19452.809
		1U	0.054					
		2T	0.053					
		2U	0.069					
	CV2	1T	0.069	0.05317	0.00577	0.0474	362000	17158.443
		1U	0.064					
		2T	0.035					
		2U	0.046					
กรวด ทราย และ รูปถ่าย	CT1	1T	0.059	0.05511	0.00577	0.04934	362000	17859.499
		1U	0.041					
		2T	0.074					
		2U	0.046					
	CT2	1T	0.048	0.05585	0.00577	0.05008	362000	18127.175
		1U	0.054					
		2T	0.05					
		2U	0.072					
กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	CP1	1T	0.064	0.05394	0.00577	0.04817	362000	17438.866
		1U	0.048					
		2T	0.053					
		2U	0.051					
	CP2	1T	0.069	0.05863	0.00577	0.05286	362000	19134.147
		1U	0.069					
		2T	0.05					
		2U	0.046					

ตารางที่ ง.6 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

	บ่อ		P (mg/g)	เฉลี่ย(mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสมใน ตัวอย่าง (mg)
Shale	S1	1T	0.15	0.14	0.003	0.14	372800	51763.156
		1U	0.15					
		2T	0.16					
		2U	0.11					
	S2	1T	0.15	0.14	0.003	0.13	372800	49460.567
		1U	0.17					
		2T	0.11					
		2U	0.1					
Shale และ ดินอ่อน	SP1	1T	0.16	0.13	0.003	0.12	372800	46390.45
		1U	0.15					
		2T	0.11					
		2U	0.09					
	SP2	1T	0.15	0.13	0.003	0.13	372800	47980.332
		1U	0.14					
		2T	0.11					
		2U	0.12					
Shale และ รุปลงมี	ST1	1T	0.16	0.12	0.003	0.12	372800	45513.273
		1U	0.15					
		2T	0.1					
		2U	0.09					
	ST2	1T	0.17	0.12	0.003	0.12	372800	45038.136
		1U	0.14					
		2T	0.1					
		2U	0.08					
Shale และ หินปูนแตก	SV1	1T	0.17	0.12	0.003	0.12	372800	45166.058
		1U	0.13					
		2T	0.12					
		2U	0.07					

ตารางที่ ง.6 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตัวอย่างในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
ที่ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

	บ่อ		P (mg/g)	เฉลี่ย(mg/g)	P0 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)	ปริมาณ ตัวอย่าง ในระบบ (g)	ปริมาณ P สะสมใน ตัวอย่าง (mg)
Shale และ หินน้ำแฉะ	SV2	1T	0.16	0.13	0.003	0.12	372800	46426.999
		1U	0.15					
		2T	0.11					
		2U	0.08					
กรวด ทราย และ หินน้ำแฉะ	CV1	1T	0.1	0.08	0.006	0.08	362000	27811.75
		1U	0.06					
		2T	0.11					
		2U	0.06					
	CV2	1T	0.12	0.08	0.006	0.07	362000	26196.946
		1U	0.07					
		2T	0.07					
		2U	0.05					
กรวด ทราย และ ทรายละเอียด	CT1	1T	0.07	0.08	0.006	0.08	362000	28521.554
		1U	0.1					
		2T	0.09					
		2U	0.07					
	CT2	1T	0.09	0.08	0.006	0.08	362000	27297.142
		1U	0.07					
		2T	0.07					
		2U	0.09					
กรวด ทราย และ ดินอ่อน	CP1	1T	0.1	0.09	0.006	0.08	362000	29000.672
		1U	0.08					
		2T	0.09					
		2U	0.07					
	CP2	1T	0.12	0.09	0.006	0.09	362000	30810.672
		1U	0.08					
		2T	0.1					
		2U	0.06					

ตารางที่ ง.7 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

พืช	บ่อ		นน. แห้ง (g)	P ต่อต้น	จน. ต้น/บ่อ	P ทั้งระบบ (mg)	รวม (mg/g)
หินดินดาน และ อ้อ	SP1	ต้น	44.25	53.63	17	911.77	1278.11
		ราก	22.94	21.55	17	366.34	
	SP2	ต้น	36.48	61.91	17	1052.39	1425.71
		ราก	20.13	21.96	17	373.32	
กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	CP1	ต้น	40.51	20.87	17	354.73	635.46
		ราก	15.57	16.51	17	280.73	
	CP2	ต้น	53.37	27.49	17	467.39	777.45
		ราก	15.05	18.24	17	310.06	
หินดินดาน และ รุปรุปลา	ST1	ต้น	37.38	45.31	17	770.25	1172.07
		ราก	10.05	23.64	17	401.82	
	ST2	ต้น	44.27	44.27	17	752.59	1095.8
		ราก	8.58	20.19	17	343.21	
กรวด ทราย และ รุปรุปลา	CT1	ต้น	33.69	32.66	17	555.29	953.94
		ราก	9.6	23.45	17	398.64	
	CT2	ต้น	27.61	40.16	17	682.72	1027.38
		ราก	7.3	20.27	17	344.66	
หินดินดาน และ หญ้าแฝก	SV1	ต้น	28.6	14.73	17	250.47	447.51
		ราก	15.3	11.59	17	197.05	
	SV2	ต้น	26.77	15.41	17	262.02	506.64
		ราก	19.79	14.39	17	244.61	
กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	CV1	ต้น	36.32	14.31	17	243.2	559.68
		ราก	17.07	18.62	17	316.48	
	CV2	ต้น	21.37	13.6	17	231.18	494.12
		ราก	15.95	15.47	17	262.93	

ตารางที่ ง.8 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

พืช	บ่อ	น. แห้ง (g)	P ต่อต้น	จน. ต้น/บ่อ	P ทั้งระบบ (mg)	รวม (mg/g)	
หินดินดาน และ ต้นอ้อ	SP1	ต้น	78.10	163.30	17	2776.10	3407.01
		ราก	33.10	37.11	17	630.91	
	SP2	ต้น	80.50	163.44	17	2778.47	3635.27
		ราก	29.70	50.40	17	856.80	
กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	CP1	ต้น	68.80	118.84	17	2020.22	2870.22
		ราก	30.00	50.00	17	850.00	
	CP2	ต้น	33.68	56.13	17	954.13	2366.52
		ราก	70.30	83.08	17	1412.39	
หินดินดาน และ รูปถ่าย	ST1	ต้น	43.70	195.99	17	3331.79	5431.70
		ราก	31.20	123.52	17	2099.90	
	ST2	ต้น	45.70	214.65	17	3649.08	5853.21
		ราก	26.80	129.66	17	2204.14	
กรวด ทราย และ รูปถ่าย	CT1	ต้น	47.70	190.80	17	3243.60	4799.10
		ราก	30.00	91.50	17	1555.50	
	CT2	ต้น	47.60	177.42	17	3016.11	4597.77
		ราก	33.50	93.04	17	1581.66	
หินดินดาน และ หญ้าแฝก	SV1	ต้น	44.10	113.59	17	1931.05	3395.67
		ราก	24.30	86.15	17	1464.63	
	SV2	ต้น	40.30	84.26	17	1432.48	2506.83
		ราก	21.50	63.20	17	1074.35	
กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	CV1	ต้น	35.10	67.01	17	1139.15	2542.53
		ราก	25.70	82.55	17	1403.38	
	CV2	ต้น	38.20	100.71	17	1712.05	3385.27
		ราก	29.00	98.42	17	1673.21	

ตารางที่ ง.9 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระบบเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

พืช	บ่อ		นน. แห้ง (g)	P ต่อต้น	จน. ต้น/บ่อ	P ทั้งระบบ (mg)	รวม (mg/g)
หินดินดาน และ ต้นอ้อ	SP1	ต้น	89.930	471.451	17	8014.671	12554.907
		ราก	39.700	267.073	17	4540.236	
	SP2	ต้น	88.500	383.500	17	6519.500	10427.800
		ราก	36.300	229.900	17	3908.300	
กรวด ทราย และ อ้อ	CP1	ต้น	70.010	288.526	17	4904.943	7523.252
		ราก	39.400	154.018	17	2618.309	
	CP2	ต้น	76.200	355.600	17	6045.200	8643.624
		ราก	38.800	152.848	17	2598.424	
หินดินดาน และ รูปถ่าย	ST1	ต้น	86.47	517.152	17	8791.576	12197.882
		ราก	39.81	200.371	17	3406.306	
	ST2	ต้น	90.000	523.636	17	8901.818	11979.035
		ราก	41.75	181.013	17	3077.216	
กรวด ทราย และ รูปถ่าย	CT1	ต้น	73.850	317.779	17	5402.239	9012.116
		ราก	41.550	212.346	17	3609.877	
	CT2	ต้น	78.100	378.667	17	6437.333	9990.272
		ราก	43.200	208.996	17	3552.938	
หินดินดาน และ หญ้าแฝก	SV1	ต้น	54.335	288.140	17	4898.383	8035.251
		ราก	29.14	184.522	17	3136.868	
	SV2	ต้น	50.30	294.150	17	5000.542	8264.486
		ราก	26.29	191.997	17	3263.943	
กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	CV1	ต้น	56.58	217.728	17	3701.377	6009.673
		ราก	31.56	135.782	17	2308.296	
	CV2	ต้น	56.395	230.707	17	3922.016	6875.112
		ราก	27.04	173.712	17	2953.096	

ตารางที่ ง.10 แสดงปริมาณน้ำที่เข้าและออกในระบบชุดจำลองพื้นที่ขุดน้ำประคิษฐ์

บ่อ	ตัวกลางและพืช	water balance (ลิตรต่อวัน)			% water balance		
		น้ำเข้า	น้ำออก	อื่น ๆ	น้ำเข้า	น้ำออก	อื่น ๆ
S1	Shale	80	78.89	1.11	100	98.61	1.39
S2		80	77.53	2.47	100	96.91	3.09
SP1	Shale และ ต้นอ้อ	80	73.44	6.56	100	91.8	8.2
SP2		80	76.76	3.24	100	95.95	4.05
ST1	Shale และ ฐูปถามี่	80	77.69	2.31	100	97.11	2.89
ST2		80	76.89	3.11	100	96.11	3.89
SV1	Shale และ หญ้าแฝก	80	75.51	4.49	100	94.39	5.61
SV2		80	76.9	3.1	100	96.13	3.87
CV1	กรวด ทราย และ หญ้าแฝก	80	72	8	100	90	10
CV2		80	74.94	5.06	100	93.68	6.33
CT1	กรวด ทราย และ ฐูปถามี่	80	75.43	4.57	100	94.29	5.71
CT2		80	74.78	5.22	100	93.48	6.53
CP1	กรวด ทราย และ ต้นอ้อ	80	74.26	5.74	100	92.83	7.17
CP2		80	73.96	6.04	100	92.45	7.55



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

MASS BALANCE FOR PHOSPHORUS REMOVAL IN A SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND USING SHALE AS A SUBSTRATE

Pitiporn Manokhoon^{a*}, Jareeya Yimrattanabovorn^b
and Chatpet Yossapol^c

^{a,b,c}School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand
^a pitiporn_ma@yahoo.com; ^b chareeya@sut.ac.th; ^c chatpet@sut.ac.th

Keywords: subsurface constructed wetland, phosphorus, mass balance, shale, substrate

Abstract. The constructed wetlands are considered a low-cost alternative system for phosphorus removal. Several studies have concluded that the substrate may play the greatest role in phosphorus removal. It is not clear how much of the added phosphorus is accumulated in substrate, assimilated in plants, transformed by microorganisms or volatilization. Studies on the distribution of phosphorus in different components of a constructed wetland have been limited. The objective of this study was to investigate the transformation and elimination processes of phosphorus in subsurface flow constructed wetlands (SF) by using mass balance. Shale was selected as a substrate in constructed wetlands for this study, on the basis of their adsorption capacity and suitability for plant growth. The 8 pilot scales SF contained three different plants (*Phragmites*, *Vetiveria* and *Typha*). Shale was used as substrate in wetland to compare with 6 pilot scales (gravel and sand was used as substrate in wetland). Each pilot scale was fed with the synthetic wastewater which had the three concentrations of PO₄-P 5, 15 and 30 mg/L. Composite water samples were collected every 3 days from the respective inlets and outlet of each pilot scale for removal efficiency calculations. Water quality analyses (COD and Total P) were measured according to standard methods. The total P accumulated in plants tissue and shale were measured. The results showed that shale pilot scales had the higher phosphorus and COD removal than sand and gravel pilot scales. The P removal efficiencies were 68.73-77.21 % for shale pilot scales and 54.19-66.26 % for gravel and sand pilot scales. The P mass balance in shale pilot scales show the P accumulate in a substrate for 50-93%, in plants for 17-20% and in other component for 1-12%. And the P mass balance in gravel and sand pilot scales have P accumulated for 50-70%, in plants for 5-15% and in other component for 11-50%. These results support that substrate plays the important mechanism to P removal in SF and Shale has high potential use as a substrate in constructed wetlands for phosphorus removal. The result from mass balance, k_s value and k_p value to be apply for design SF constructed wetlands using shale as a substrate are $QC_{in} - QC_{out} = 0.00062W_s + W_p k_p$; k_p value for each are 0.0672 mg.g⁻¹.d⁻¹ for Reed 0.0533 mg.g⁻¹.d⁻¹ for Cattail and 0.0546 mg.g⁻¹.d⁻¹ for Vetiver grass.

Introduction

Phosphorus is limiting nutrients for aquatic ecosystem because they contribute to accelerated eutrophication of lake and rivers [9, 24]. Chemical treatment is widely used for phosphorus removal. They are the most effective and well-established methods but their costs and sludge production make chemical treatment an unattractive option for wastewater treatments [16, 18]. The constructed wetlands are considered to be alternative for phosphorus removal because of their low cost, lower sludge production easy operation and maintenance [8, 15 and 17]. Phosphorus removal

mechanism has been substrate adsorption, chemical precipitation, bacteria action, plant uptake and incorporation into organic matter [1]. A substrate is important to select the high phosphorus adsorption capacity, which depends mainly on the chemical characterization of these materials ([11, 28]. Many previous studies have reported that shale base constructed wetlands substrate had 64-100 % phosphorus removal efficiency. In addition, the plant can grow and rhizome can develop. Besides, the data from the experiment was used to predict lifetime of constructed wetland using shale as a substrate ranging 15-20 years [9, 11-12]. However, it was not clear that how much of the added phosphorus was accumulated in substrate, assimilated in plants, or transformed by microorganisms. The objective of this study was to investigate the transformation and elimination processes of phosphorus in subsurface flow constructed wetlands (SF) by using mass balance. The result of this study will create a better understanding of phosphorus transformation and how it can be used for evaluating and improving existing design criteria.

Material and Methods

Pilot scale unit

The shale used as substrate in this study was obtained from Siam Cement Public Company Limited, in the Saraburi province, Thailand. Fourteen of pilot-scale SF constructed wetlands have been constructed at Suranaree University of Technology, Nakhon ratchasima, Thailand. They were rectangular tanks, with dimensions 1x 0.5 x 0.5 m. (L x W x D). Shale was used as substrate in 8 pilot scale units and gravel and sand was used as 6 pilot scale units as shown in Fig.1 and 2 and Table 1. The emergent plants were selected by phosphorus ratio in plant tissue and there is local plant. Reed (*Phragmites* spp.) (SP), Cattail (*Typha* spp.) (ST) and Vetiver grass (*Vetiveria* spp.) (SV) were used as plant in pilot unit scale with density of 30 plant/m². The synthetic wastewater was supplied with the loading rate ranging from 228.5-283.7 kg COD day⁻¹hec⁻¹ and during this operation period supply P three loading rate were 3.83, 11.75, 22.98 kg PO₄³⁻ day⁻¹hec⁻¹ as shown in Table 1. The pilot-scale SF constructed wetlands were operated in 180 days, 60 day for each period. Composite water samples were collected every 2 days from the respective inlets and outlet of each unit for removal efficiency calculations. Water quality parameter including COD and P analyses were performed according to standard methods [3].

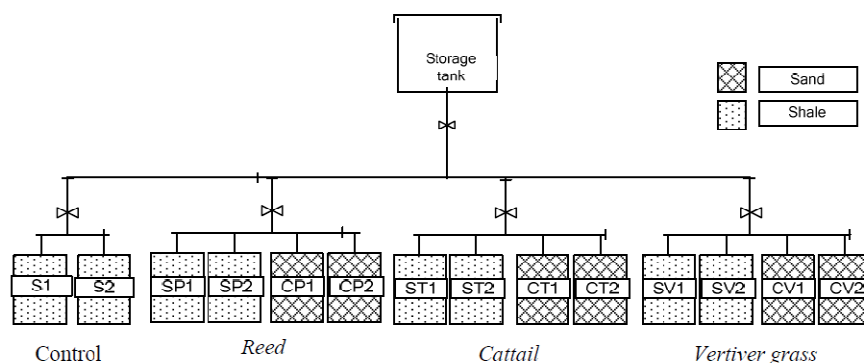


Fig. 1 The flow chart of pilot-scale units

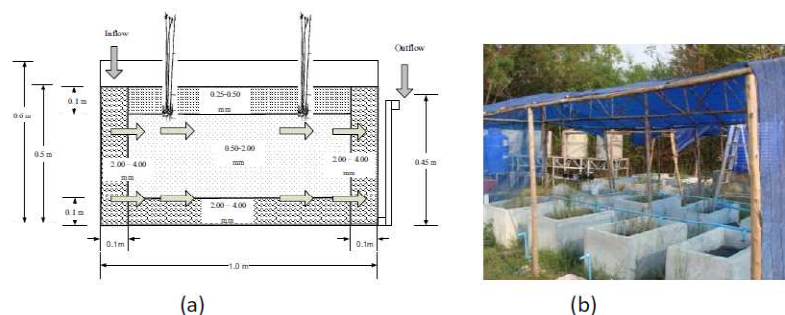


Fig. 2 (a) Cross section of pilot scale, (b) A pilot-scale units.

Table 1 Operation condition for pilot-scale SF constructed wetlands.

Parameter	Unit	
Flow rate	m ³ /d	0.036-0.039
HR T	d	3
Organic Loading Rate	kg COD ha ⁻¹ day ⁻¹	229.8
Phosphorus Loading Rate	kg P ha ⁻¹ day ⁻¹	3.83-22.98
Length x Wide	-	1.00 x 0.5
Water depth	m	0.4
Media depth	m	0.5

Mass balance of phosphorus

Mass balance for each pilot-scale SF constructed wetlands was calculated the phosphorus balance of each unit, before supplying the synthetic wastewater, substrate and plant tissue were selected to determine phosphorus accumulations in it. After the operation for each period, substrate and plant were selected to determine phosphorus accumulations in substrate and in plants tissue. Other phosphorus accumulations were calculated from equation of mass balance. P of inlet and outlet of each unit were measured to calculate the synthetic wastewater P concentration and flow rate. The equation of mass balance is

$$P_{\text{Input}} = P_{\text{Output}} + P_{\text{Substrate}} + P_{\text{Plant}} + P_{\text{Other component}}$$

Result and Discussion

Characterization of shale

The results of chemical characteristics in Table 2 showed that shale mainly contains 10.58% Al₂O₃, 16.72% Fe₂O₃ and 5.25% CaO. This agrees with the previous study which range from 11.49% Al₂O₃, 4.68% Fe₂O₃, and 10.97% CaO [9]. These chemical properties contribute to the interest in the material to be used as potential filter media for phosphorus removal in constructed wetlands. Several studies suggested that the major removal mechanism was adsorption to the surface and due to chemical characteristics and phosphorus capacity of the filter media [12, 25 and 28]. The substrates which include minerals with reactive iron or aluminium hydroxide or oxide group on their surface, calcareous materials, can promote calcium phosphate precipitation [19, 22 and 28].

Table 2 Chemical characteristics of shale

Chemical position	% position	Chemical position	% position
Silicon Dioxide (SiO ₂)	60.01	Calcium Oxide (CaO)	5.25
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	10.58	Potassium Oxide (K ₂ O)	5.26
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	16.72	Titanium Dioxide (TiO ₂)	1.93
Magnesium Oxide (MgO)	0.17	Zirconium Oxide (ZrO ₂)	0.08

COD and phosphorus Removal efficiency

Results of phosphorus and COD removal efficiency were shown in Table 3. A COD removal ST pilot scale has the highest removal efficiency, the results were significantly different (Paired-T Test, $p < 0.05$, $n = 90$). And for use shale as a substrate has higher COD removal efficiency than sand and gravel as a substrate. COD removal mechanism for constructed wetland is based on the decomposition of organic matter by aerobic microorganisms and anaerobic microorganisms. Carbon dioxide and methane are produced from this mechanism to apply for the plant to be used in metabolism and develop cell tissue [15]. The oxygen and carbon dioxide are exchanged in the area around the plant roots; root density will increase the amount of oxygen. This will allow the aerobic microorganisms to be effective in decomposing organic matter [10, 15]. These might be related with physical characteristics of filter media. Soluble organic matter is removed by the microbial grown on the media surfaces and attached to the plant roots and rhizomes penetrating the filter bed of wetlands [10]. In the previous study COD removal efficiency for worldwide constructed wetland that used sand gravel and silt as a substrate was 20.00-70.50% [7]. For phosphorus removal, ST pilot scale has highest removal efficiency the results were significantly difference (Paired-T Test, $p < 0.05$, $n = 90$). The result of this study showed a pilot using shale as a substrate has the highest phosphorus removal efficiency, more than 70% while a pilot using sand and gravel as a substrate has phosphorus removal efficiency from 62.00-65.00%. The constructed wetland system treated domestic wastewater showed that sand filter media system had phosphorus removal from 80.00-100.00 % [26] and in gravel filter media bed, at 50.00-60.30 % [4] and soil filter bed system efficiency from 90.00-95.00% [7, 26]. Phosphorus removal mechanisms in constructed wetlands are mostly removed by substrate adsorption precipitation and complex form with iron oxide, aluminum oxide, magnesium oxide and calcium oxide [11-13, 15]. The pH effect was largely the phosphorus adsorption and precipitation with Al, Fe, Ca and Mg [16, 22]. The pH in this study was between 10 to 12, the speciation of orthophosphate was presented as HPO_4^{2-} and PO_4^{3-} species [22] and could be described through the protonation reaction (1)-(3). These was supported by the results of chemical characteristics of shale in this study which comprises mainly of were Al_2O_3 , Fe_2O_3 and CaO that could promote phosphate precipitations. In addition the previous study found shale could be used as a potential filter media in constructed wetlands and has a lifetime of constructed wetland ranging from 15-20 years [11-12] higher than sand and gravel which were about 10-15 years of lifetime.

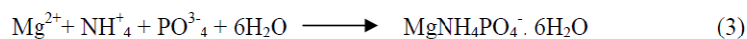
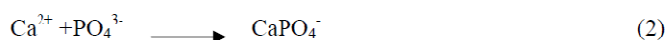
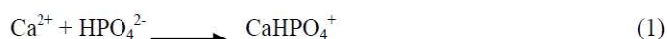


Table 3 The COD and Phosphorus removal efficiency of pilot scale units.

Pilot scale unit	% Removal efficiency (Mean \pm SD)							
	COD				Phosphorus			
	Run I	Run II	Run III	Ave.	Run I	Run II	Run III	Ave.
S	76.67 \pm 6.4	73.27 \pm 0.8	73.69 \pm 1.2	74.49 \pm 4.0	81.87 \pm 8.7	75.67 \pm 4.5	71.88 \pm 4.6	76.36 \pm 7.3
ST	80.09 \pm 5.2	78.62 \pm 2.3	78.15 \pm 2.0	78.92 \pm 3.5	83.63 \pm 5.6	86.00 \pm 2.3	86.88 \pm 2.3	85.54 \pm 3.9
SP	64.44 \pm 8.2	78.01 \pm 1.3	78.5 \pm 2.2	78.51 \pm 4.0	81.31 \pm 5.4	81.77 \pm 2.7	84.49 \pm 2.5	82.54 \pm 3.9
SV	75.76 \pm 5.3	74.19 \pm 1.2	74.89 \pm 2.2	74.93 \pm 3.3	79.82 \pm 6.9	78.82 \pm 3.4	76.45 \pm 3.9	78.34 \pm 5.0
CT	64.44 \pm 8.2	60.12 \pm 1.9	62.03 \pm 1.4	62.13 \pm 5.1	66.01 \pm 8.6	65.25 \pm 6.9	65.67 \pm 5.6	65.63 \pm 7.1
CP	65.82 \pm 6.9	63.65 \pm 1.8	63.9 \pm 1.8	64.42 \pm 4.1	65.79 \pm 9.7	65.89 \pm 7.3	65.08 \pm 6.8	65.59 \pm 7.9
CV	61.04 \pm 10.4	55.12 \pm 1.0	55.18 \pm 1.3	57.01 \pm 6.5	62.35 \pm 12.3	63.66 \pm 7.8	61.57 \pm 8.5	62.54 \pm 9.6

Mass balance of phosphorus

The phosphorus mass balance of shale units had P accumulated in a substrate from 70-93%, in plants from 5-20% and in other component from 1-12%. The phosphorus mass balance in gravel-sand units had phosphorus accumulated from 50-70%, in plants from 5-15% and in other component from 11-50% as shown in Table 4 (a-c) and Fig. 3. The researchers' phosphorus accumulated in a substrate from 60-85%, in plants from 5-20% and in other component from 1-20% [8, 11] and plant uptake and harvesting phosphorus in orthophosphate from 3.00-12.00% and in total phosphorus from 7.40-9.00% and orthophosphate in phosphorus form is the easiest for plant uptake [27]. In Fig 3 for a first period 60 days phosphorus accumulated in plant tissue was less than a second period because of its growth in Minimum percentage phase. During operational period of 120 days, it was found that the amount of phosphorus in plant tissues was increased. Because plants need more nutrients to be grow in a poverty adjustment phase and in the operational a period of 180 days, the result showed that plant uptake of phosphorus decreased and constant because plant growth was mature [15], in order to increase phosphorus removal efficiency for SF constructed wetlands, the plant must be harvested every 3-4 months to uptake more nutrients for growth and develop plant tissues. The result of phosphorus accumulated in a pilot scale using shale as a substrate was found most for a first period of 60 days phosphorus accumulated in a substrate. In the operational period of 120 days, it was found that phosphorus accumulated in a pilot scale using shale as substrate was decreased, especially in a pilot scale using sand and gravel as a substrate was obviously seen decrease. Because of the plant uptake phosphorus for the growth and full adsorption capacity; and in the operational a period of 180 days it was found that phosphorus accumulated in a substrate was decreased. In pilot scale using shale as substrate with plants phosphorus accumulated in a substrate was less than in pilot scale using shale as substrate without plant because plants also help to extract the phosphorus used for plant growth and the plants can reduce a chance of clogging in SF constructed wetlands.

Table 4 (a) Phosphorus mass balance P loading rate is $3.83 \text{ kg PO}_4^{3-} \text{ day}^{-1} \text{hec}^{-1}$

Pilot Scale	P _{Input}	P _{Output}		P _{Plant}		P _{Substrate}		P _{Other component}	
	g	g	%	g	%	g	%	g	%
S	13.09	2.31	82.35	0.00	0.00	10.77	99.86	0.02	0.14
SP	13.09	1.98	84.87	1.35	12.16	9.61	86.45	0.15	1.39
ST	13.09	2.02	84.57	1.13	10.24	8.97	80.99	0.97	8.78
SV	13.09	2.95	77.46	0.48	4.58	8.98	86.14	0.97	9.28
CV	13.09	5.31	59.43	0.53	7.31	6.20	86.02	0.48	6.68
CT	13.09	4.48	65.78	0.99	11.42	5.91	68.11	1.78	20.47
CP	13.09	3.97	69.67	0.71	8.41	5.87	69.84	1.83	21.74

Table 4 (b) Phosphorus mass balance P loading rate is $11.75 \text{ kg PO}_4^{3-} \text{ day}^{-1} \text{hec}^{-1}$

Pilot Scale	P _{Input}	P _{Output}		P _{Plant}		P _{Substrate}		P _{Other component}	
	g	g	%	g	%	g	g	g	%
S	39.95	9.62	75.92	0.00	0.00	28.39	93.59	1.94	6.41
SP	39.95	7.08	82.28	3.52	10.71	25.83	78.60	3.51	10.69
ST	39.95	5.46	86.32	5.64	16.36	26.34	76.38	2.50	7.26
SV	39.95	8.31	79.20	2.95	9.33	27.71	87.59	0.98	3.09
CV	39.95	13.70	65.71	2.96	11.29	18.31	69.73	4.98	18.98
CT	39.95	13.23	66.87	4.70	17.59	17.99	67.35	4.02	15.06
CP	39.95	13.02	67.40	2.62	9.73	18.29	67.92	6.02	22.36

Table 4 (c) Phosphorus mass balances P loading rate is $22.98 \text{ kg PO}_4^{3-} \text{ day}^{-1} \text{hec}^{-1}$

Pilot Scale	P _{Input}	P _{Output}		P _{Plant}		P _{Substrate}		P _{Other component}	
	g	g	%	g	%	g	g	g	%
S	75.84	20.75	72.64	0.00	0.00	50.61	91.87	4.48	8.13
SP	75.84	11.35	85.03	11.49	17.82	47.19	73.17	5.81	9.01
ST	75.84	9.65	87.27	12.09	18.26	45.28	68.41	8.82	13.33
SV	75.84	17.51	76.91	12.09	20.72	45.80	78.51	0.45	0.77
CV	75.84	28.08	62.97	6.44	13.49	27.00	56.55	14.31	29.96
CT	75.84	25.23	66.74	8.08	15.97	29.91	59.09	12.62	24.94
CP	75.84	24.63	67.52	9.50	18.56	27.91	54.50	13.79	26.94

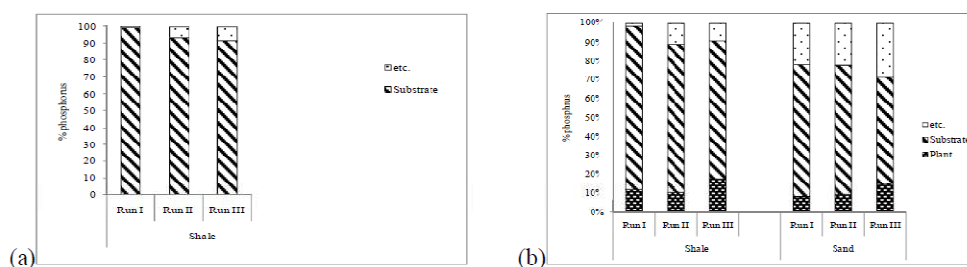


Fig. 3 mass balances of P in unit of (a) control (b) Cattail

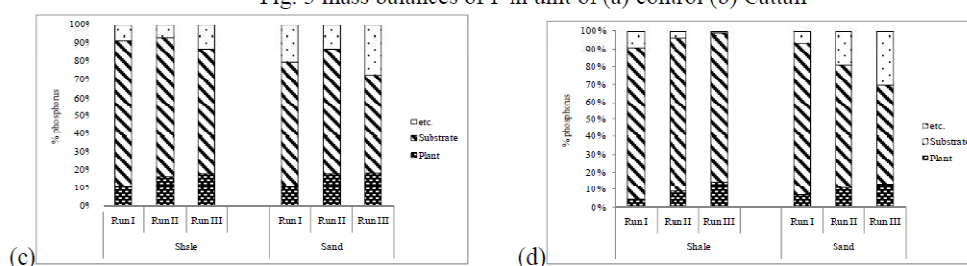


Fig. 3 (cont.) mass balances of P in unit of (c) Reed and (d) Vertiver grass

Data application

The results from phosphorus mass balance accumulated in shale can be applied for designing SF constructed wetlands. The data of phosphorus removal by using shale as a substrate was analyzed from linear equation; the data was plotted to graph a linear between the amounts of phosphorus accumulated in shale ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) as the y-axis and a period of the operational as the x-axis as shown in Fig.3. It was that found the k_s ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) as value was obtained, It was the rate of phosphorus removal by shale. The k_s value of a pilot scale using shale as a substrate showed in Table 5 the result for each pilot did not vary; it supported the result of phosphorus accumulated in shale substrate. The data of phosphorus removal by plant was analyzed from linear equation; the data was plotted to graph a linear between the amounts of phosphorus accumulated in plant tissue ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) as the y-axis and a period of operational as the x-axis shown in Fig.4 it was found that the k_p ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) value was achieved, it was the rate of phosphorus removal by plant. The k_p value of a pilot scale using shale as a substrate showed in Table 5 the result for each pilot S1 has a highest k_p ; it supported the result of ratio phosphorus accumulated in constructed wetlands.

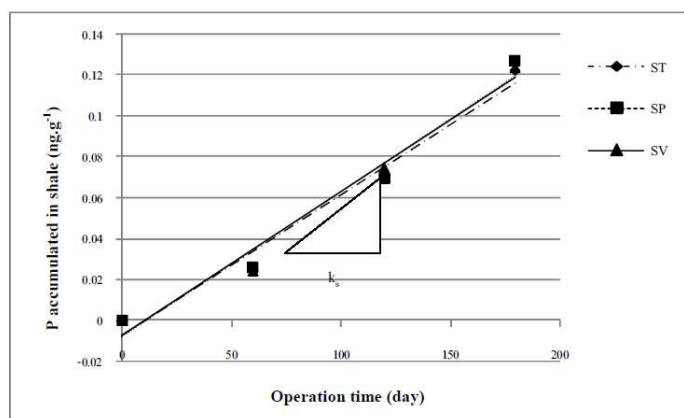


Fig. 3 Analysis of k_s value of a pilot scale using shale as a substrate

Table 5 Rates of phosphorus removal by shale and plant.

Pilot	k_s ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	k_p ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)
ST	0.00061	0.0672
SP	0.00062	0.0533
SV	0.00062	0.0546

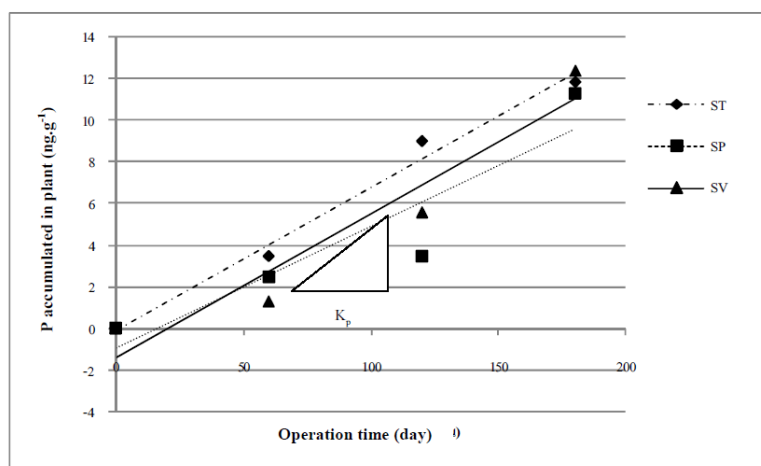


Fig. 4 Analysis of k_p value of a pilot scale using shale as a substrate

The results from mass balance, k_s value and k_p value are to be applied for designing SF constructed wetlands using shale as a substrate shown in equation (4) which calculates phosphorus removal by two mechanisms: plant and substrate.

$$QC_{in} - QC_{out} = W_s k_s + W_p k_p \quad (4)$$

When	Q	= Wastewater flow rate ($m^3 \cdot d^{-1}$)
	C_{in}	= Phosphorus concentration input ($mg \cdot l^{-1}$)
	C_{out}	= Phosphorus concentration output ($mg \cdot l^{-1}$)
	D_s	= Density of shale = $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	V	= Volume of unit (m^3)
	k_s	= rate of phosphorus removal by shale ($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)
	W_p	= Plant dry weight (g or kg)
	D_p	= Plant density ($\text{plant} \cdot m^{-2}$)
	A	= Area (m^2)
	k_p	= rate of phosphorus removal by plant ($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)

Conclusion

Shale is a potential substrate in constructed wetlands because of their high phosphorus adsorption capacity. The importance of the selection of substrate with higher adsorption capacity combined with good hydraulic definitely confirmed that our constructed wetlands can apply a high loading rate and has a long lifetime. In addition, the selection of substrate can reduce area and construction costs because costs in substrate are 41.20% in almost construction costs [6]. Substrate plays the greatest role of phosphorus removal in SF constructed wetland. These results could be applied to design wetland systems. Plants play a minor role in phosphorus removal mechanism but plant species could support phosphorus removal efficiency in constructed wetlands. In short term phosphorus accumulated in a plant and in other components was small but in a long term, phosphorus accumulated in a plant and other mechanisms could extend the life time of substrate in constructed wetlands.

Acknowledgements

This research supported by TRF-Master Research Grants (Windows II) and Suranaree University of technology.

References

- [1] Adam, Kinga., Krogstad, Tore., Vrale, Lasse.,Sovik, Kristine, Anne. and Jenssen, D., Peter.: Ecological Engineering. Vol.29 (2007). p 200-208.
- [2] Akrotos, C.S. and Tsihrintzis, V.A.: Ecological Engineering. Vol.29 (2007), p 173-191.
- [3] APHA, AWWA. and WEF. Standard methods for the examination of the water and wastewater (19th edition) (2006). Washington D.C.: American Public Health Association.
- [4] Brix H., Arias C.A. and Bubba M.D.: Water Science and Technology. Vol. 44(2001), p 45-54.
- [5] Bubba, M.D., Arias, C.A. and Brix H.: Water Research. Vol. 37 (2003), p 3390-3400.
- [6] Chen, Z.M., Chen, B., Zhou, J.B., Li, Z. and Zhou, Y.: Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. Vol.13 (2008), p1986-1996.

- [7] Chung, A.K.C., Wu, Y., Tam, N.F.Y. and Wong, M.H. *Ecological Engineering*. Vol.32 (2008), p 81-89.
- [8] Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. and Shute, R.B.E. *Reed Bed and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. (1996), in WRc Swindon.
- [9] Daothaisong, A. and Yimrattanabovorn, J. In *Proceeding of International Conference on Managing Wetlands for Sustainable Development: Innovative Research and Lessons Learned, Effective Partnerships, and the Need for Co-Management:1-9*. Trang, Thailand. Prince of Songkla University. (2008).
- [10] Das, A., and H., Uchimiya,.: *Journal of Plant Research*. Vol.115 (2002), p315-320.
- [11] Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J. and Smith, K.A.: *Water Research*. Vol. 33(17) (1999), p 3595-3602.
- [12] Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J. and Smith, K.A.: *Water Research*. Vol.34 (9) (2000) .p 2483-2490.
- [13] Frobes, G., Margaret., Dickson, L., Kenneth., Saleh, Farida and Waller, T., William .: *Environmental Science and Technology*. Vol. 39 (2005), p 4621-4627.
- [14] F. Zurita, J. De Anda and M.A. Belmont.: *Ecological Engineering* .Vol. 35 (5) (2009), p 861-869
- [15] Kadlec, R. H. and Knight, R. L.: *Treatment Wetland*. (2006) in Boca Raton: Lewis Press.
- [16] Karageorgiou K., Paschlis M. and Georios N.: *Journal of Hazardous Materials*. Vol.A139 (2007), p 447-452.
- [17] Metcalf and Eddy.:*Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4th edn) (2004). Boston Burr Ridge: McGraw-Hill.
- [18] Mezenner Y.N. and Bensmaili A.:*Chemical Engineering Journal*. Vol. 147 (2007), p 87-96.
- [19] Prochaska C.A. and Zouboulis A.I.: *Ecological Engineering* (2006), Vol. 26, p 293-303.
- [20] Park, W.H., and Polprasert, C.: *Ecological Engineering* (2008), Vol. 34, p 50-56.
- [21] Sawyer, N, Clair., Mccarty, L, Ferry. and Parkin, F, Gene.:*Chemistry for Environmental Engineering and Science* (5th edn) (2003). Singapore: McGraw-Hill.
- [22] Seo D.C., Cho J.S., Lee H.J. and Hoo J.S.: *Water Research*, Vol. 39 (2005), 2445-2457.
- [23] U.S. EPA. : *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment* (1993). Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- [24] U.S. EPA. : *Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment* (2000).Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- [25] Westholm L.J.:*Water Research*. Vol. 40 (2006), p 23-36.
- [26] Yang L., Chang H.L. and Huang M.L.: *Ecological Engineering*. Vol. 18 (2001), p 91-105.
- [27] Z. Yousefi and A. Mohseni-Bandpei .:*Ecological Engineering*. Vol. 36 (2010), p 777-782.
- [28] Zhu T., Jenssen P.D., Maehlum T. and Krogstad T.: *Water Science and Technology*. Vol. 35(5) (1997), p 103-108.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปีติพร มโนคูน เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดขอนแก่น เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยในขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาสำหรับบัณฑิตศึกษา ทุนผู้ช่วยสอนและวิจัยสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และทุนวิจัยมหาบัณฑิตจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2551 เพื่อทำวิจัยเรื่อง “สมดุลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง”

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความวิชาการเรื่อง “MASS BALANCE FOR PHOSPHORUS REMOVAL IN A SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND USING SHALE AS A SUBSTRATE” ในงานประชุมวิชาการ *International Conference on Civil Engineering and Building Materials (2011 CEBM)* ในระหว่างวันที่ 29-31 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 ณ เมือง Kunming, ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี