



## รายงานการวิจัย

# การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม (Combined Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Small Community)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

# การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม (Combined Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Small Community)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตน์บวร

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม/2554

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550 ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย สถานที่ในการทำวิจัย และเครื่องมือ-อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ นางสาวปิติพร มโนคุ่น และ นางสาว ศศิวิมล สุดแสน ผู้ช่วยในการวิจัย ทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จรียา ยิ้มรัตนบวร

22 กรกฎาคม 2554

## โครงการวิจัย เรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็ก โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

รายละเอียดการปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ชี้แจงประเด็นระยะเวลาการศึกษาวิจัย  
ช่วงเวลาที่ระบุในบทที่ 3 เป็นระยะเวลา 7 เดือน เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบทั้งหมด โดยเริ่มตั้งแต่การเดินระบบโดยการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 2 เดือน หลังจากนั้นจึงใช้น้ำเสียชุมชนจริงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนเข้าสู่ระบบ steady stage ประมาณ 1 เดือน และหลังจากนั้นจึงเริ่มเก็บข้อมูลของประสิทธิภาพของระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระยะเวลา 4 เดือนตามที่ระบุในบทที่ 4
2. เพิ่มเติมรายละเอียดของลักษณะน้ำเสียจริงที่เข้าระบบบำบัด ในตารางที่ 3-3
3. เพิ่มเติมในบทที่ 1 และ 2
4. สรุปประเด็นความสำคัญในท้ายบทที่ 2
5. ปรับแก้รายละเอียดและตรวจสอบความถูกต้องของเอกสารอ้างอิง และเพิ่มเติมข้อมูลอ้างอิงตามที่เสนอแนะ
6. ปรับปรุงแก้ไขคำศัพท์ทางวิชาการเป็นภาษาไทยตามคำแนะนำ
7. แก้ไขคำผิดและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมตามเล่มที่ส่งคืน

( จริญญา ยิ้มรัตนบวร)

หัวหน้าโครงการวิจัย

## บทคัดย่อ

# การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) เป็นทางเลือกทางหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างค่อนข้างต่ำ ใช้พลังงานน้อย แต่ให้คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบใกล้เคียงกับระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น และไม่มีควมยุ่งยากในการเดินระบบ เหมาะสำหรับเป็นระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับชุมชนขนาดเล็ก และได้มีการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetlands, FWS) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow Constructed Wetlands, SF) ทั้ง 2 ระบบมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันในเรื่องของประสิทธิภาพในการบำบัด จึงมีความพยายามนำเอาระบบทั้ง 2 แบบ มารวมกันภายในบ่อเดียวกัน เพื่อให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น และสามารถลดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบ ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง FWS:SF ในการรวมเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมจำนวน 4 ชุด ที่มีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 และปลูกต้นกกฝรั่ง (*Cyperus alternifolius* L.) ถูกสร้างขึ้นภายในพื้นที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย ผลการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมีอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และ บีโอดี, ทีเคเอ็น และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด มากกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ทั้งแบบ FWS และ SF และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทั้ง 4 ชุด พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ที่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อประเมินความเหมาะสมของอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF พบว่า ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:4 มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด สูงกว่าระบบแบบเดี่ยว เพื่อช่วยประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

# Combined Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Small Villages

Constructed wetlands are the alternative wastewater treatment for small villages because of their economic system, easy operation and require low energy therefore they are suitable for small community. The objective of this study was to combine both of systems, Free Water Surface Flow Constructed Wetland (FWS) and Subsurface Flow Constructed Wetland (SF) in the same pond to enhance the removal efficiencies and reduce the area for construction. Four ponds of combined wetland systems with difference ratio between FWS: SF of 1:1, 1:2, 1:4 and 2:1 with umbrella plant (*Cyperus alternifolius L.*) were constructed to treat the wastewater from Suranaree University of Technology. The results showed combined constructed wetlands had COD, BOD, TKN and TSS higher than both of single constructed wetlands (FWS and SF). There were no differences significant except TP removal efficiency, when compare between four combined wetland ponds, And in conclusion, the combined constructed wetlands with ratio of FWS:SF, 1:4 is the suitable ratio to apply for combined constructed wetlands design to use for small community to reduce area construction and to enhance in COD, BOD, TKN and TSS removal.

# สารบัญ

## หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3

## บทที่ 2 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands).....	4
2.2 ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	4
2.2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว.....	4
2.2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน.....	5
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF .....	7
2.3 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland Component).....	7
2.3.1 ตัวกลาง (substrate) .....	7
2.3.2 จุลินทรีย์ (microbial organisms).....	9
2.3.3 พืช (plants) .....	9
2.4 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	10
2.4.1 ออกซิเจน (Oxygen).....	10
2.4.2 อุณหภูมิ (Temperature) .....	10
2.4.3 ความเป็นกรด-ด่าง (Acidity-Alkalinity).....	11

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5	กลไกการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 11
2.5.1	การกำจัดสารอินทรีย์.....11
2.5.2	การกำจัดไนโตรเจน..... 12
2.5.3	การกำจัดฟอสฟอรัส..... 14
2.6	การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 16
2.6.1	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT).....16
2.6.2	ความลึกน้ำ (Water Depth)..... 16
2.6.3	อัตราการระบรทุกชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)..... 16
2.6.4	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)..... 16
2.6.5	ความลึกของตัวกลาง (Depth of media)..... 16
2.6.6	ความพรุนของดิน (porosity)..... 16
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 17
2.7.1	ต้นกกรังกา..... 17
2.7.2	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS..... 18
2.7.3	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF..... 19
2.7.4	ข้อเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและ แบบไหลใต้ผิวดิน..... 20
2.7.5	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม..... 22
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย..... 23</b>
3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย..... 23
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย..... 23
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 23
3.3.1	การออกแบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม..... 23
3.3.2	อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์และภาระบรทุกสารอินทรีย์ของระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....28
3.3.3	การศึกษา <b>tracer study</b> ..... 29
3.3.4	การเริ่มเดินระบบกับน้ำเสียสังเคราะห์..... 31



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.5 การเดินระบบกับน้ำเสียจริง.....	31
3.3.6 การเก็บตัวอย่าง.....	31
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	33
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย.....</b>	<b>35</b>
4.1 การหาระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	35
4.2 ผลการศึกษาการเดินระบบโดยน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์.....	37
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	38
4.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์.....	38
4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ในรูปที่เคเอ็น.....	39
4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส.....	42
4.3.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็ง.....	44
4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ FWS และระบบ SF ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม และ อัตราการกำจัดต่อพื้นที่.....	44
4.4.1 การกำจัดสารอินทรีย์.....	44
4.4.2 การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	48
4.4.3 การกำจัดของแข็ง.....	50
4.5 การศึกษาน้ำหนักแห้งของพืชในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	51
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....</b>	<b>53</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2-1	ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบที่น้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง.....	8
2-2	ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช.....	10
2-3	สรุปกลไกการกำจัดมลสารต่าง ๆ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	15
2-4	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ แบบ SF.....	17
2-5	ข้อดี - ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF.....	21
3-1	รายละเอียดการออกแบบของชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	24
3-2	ค่าการกระจายของการไหล.....	31
3-3	ลักษณะสมบัติน้ำเสียสังเคราะห์ชุมชนที่ใช้ในการศึกษา.....	33
3-4	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้า- ออก ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	34
4-1	ผลการศึกษาสารติดตาม.....	35
4-2	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์.....	37
4-3	ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	40
4-4	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว จากงานวิจัยของ สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548).....	40
4-5	ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านเข้า-ออกและประสิทธิภาพการบำบัด TKN และ TP ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์แบบผสม.....	41
4-6	สรุปขนาดพื้นที่ และปริมาตรตัวกลางในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....	43
4-7	ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็ง ที่ผ่านเข้า-ออกชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์แบบผสม.....	43
4-8	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 1 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:1.....	46
4-9	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 2 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:2.....	46
4-10	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 2 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:4.....	47

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-11 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 2 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:2.....	47
4-12 อัตราการกำจัดต่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม (kg/d.ha).....	48
4-13 ผลการศึกษาน้ำหนักแห้งของต้นกกริงกาในแต่ละชุดการทดลอง.....	52

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2-1	พื้นที่น้ำชุ่มประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว.....5
2-2	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS.....6
2-3	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว.....6
2-4	ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....8
2-5	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....13
2-6	กลไกการกำจัดไนโตรเจนของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....13
2-7	กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....15
2-8	ต้นกกรงก้า..... 18
3-1	ภาพจำลองชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม..... 24
3-2	ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 25
3-3	ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (1:1)..... 26
3-4	ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (1:2)..... 26
3-5	ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 3 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ผสมแบบ FWS-SF (1:4)..... 27
3-6	ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (2:1)..... 27
3-7	ต้นกกรงก้า ( <i>Cyperus alternifolius</i> L.) ในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม..... 28
3-8	แผนผังการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....32
3-9	จุดเก็บตัวอย่างน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุด.....32
4-1	ผลการศึกษาสารติดตาม ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....36
4-2	ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....45
4-3	อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD (ก) และรูป BOD (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....48
4-4	ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....49
4-5	ประสิทธิภาพการกำจัด TKN (ก) และ TP (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม..49
4-6	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-7	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง ในรูป TS (ก) TSS (ข) และ TDS (ค) ของชุดจำลองพื้นที่ ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....51
4-8	น้ำหนักแห้งของต้นกกรงกาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม.....52

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาของการวิจัย

ปัจจุบันปัญหามลพิษในแหล่งน้ำมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการปนเปื้อนสารมลพิษจากน้ำเสียในแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน น้ำเสียจากการเกษตรกรรม น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำผิวดินซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาเสื่อมโทรมลง บางครั้งเกิดการเน่าเสียไม่สามารถนำไปใช้ในการอุปโภค-บริโภคได้ ทำให้แหล่งน้ำผิวดินในประเทศไทยที่มีคุณภาพน้ำดีมีจำนวนลดลงมาก เกิดการขาดแคลนแหล่งน้ำเพื่อนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆของประชาชน ดังนั้นจึงนโยบายของกรมควบคุมมลพิษในการส่งเสริมให้ชุมชนขนาดเล็กทั่วทั้งประเทศไทย มีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียของชุมชน ระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับชุมชนขนาดเล็กควรจะเป็นระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด มีราคาในการก่อสร้างถูก ง่ายต่อการดำเนินงาน ไม่ซับซ้อนในการดูแลระบบ ไม่ต้องอาศัยเจ้าหน้าที่ที่มีความรู้เฉพาะทาง ดังนั้นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) จึงนับเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างค่อนข้างต่ำ ใช้พลังงานน้อย แต่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น และไม่มีควมยุ่งยากในการเดินระบบ จึงได้มีงานวิจัยจำนวนมากนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน เพื่อต้องการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้อย่างปลอดภัย ไม่ทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็นเป็นที่น่ารังเกียจ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบกลไกการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพืชที่ปลูกกับจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetland, FWS) เป็นระบบที่น้ำเสียไหลผ่านผิวดินหรือตัวกลางสัมผัสกับอากาศโดยตรง จากนั้นจึงไหลซึมลงสู่พื้น ซึ่งระบบนี้สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow Constructed Wetland, SF) เป็นระบบที่น้ำเสียไหลผ่านลงไปในตัวกลางซึ่งมีพืชน้ำจืดอยู่ในระบบนี้ น้ำเสียที่ผ่านจะถูกบำบัดระหว่างสัมผัสพื้นผิวดินตัวกลาง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีข้อดี-ข้อเสียในเรื่องของประสิทธิภาพในการบำบัด เช่น กลไกหลักของการบำบัดที่เคเอ็น เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน (Kadlec and Knight, 1996; U.S.EPA, 2000) ดังนั้นระบบไหลผ่านพื้นผิว จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น มากกว่าระบบไหลใต้ผิวดินตัวกลาง ขณะที่กลไกหลักของการกำจัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับและการกรองที่ตัวกลาง (Drizo et al, 1997) และจากการศึกษาของ Lin et al. (2002) และ Lu et al.(2008) พบว่าระบบ SF จะมีกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสเอาไว้ที่ตัวกลาง และพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต ดังนั้นจึงมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินตัวกลางมาต่อกันหรือต่อขนานกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่นำมาต่อ

อนุกรมหรือต่อขนานก็ยังมีข้อเสีย คือ ยังมีความต้องการในการใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบค่อนข้างมาก ทำให้ไม่เหมาะสมกับแหล่งชุมชนที่มีพื้นที่จำกัด จึงมีความพยายามในการลดพื้นที่ของระบบ โดยนำทั้งระบบไหลผ่านพื้นผิว และระบบไหลใต้ผิวดังกล่าวมารวมกันภายในบ่อเดียวกัน เป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น และประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้าง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เป็นการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่างๆมาใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปจะเป็นการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับแบบไหลใต้ผิวดังกล่าวมาต่ออนุกรมหรือต่อขนานกัน เนื่องจากการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าวอย่างเดียว พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว จึงมีการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าว นอกจากนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าวสามารถกรองของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำได้ แต่ถ้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากจะทำให้เกิดการสะสมและอุดตัน(ศุขดา กานตวนิชกูร, 2544) จึงมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมารวมเพื่อทำการตกตะกอนของแข็งแขวนลอยบางส่วนออกจากน้ำ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน จะมีข้อดีในการไม่เกิดกลิ่นเหม็น (U.S. EPA,1993) และปัญหาบวมต่างๆจากระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น ปัญหาเรื่องยุ่ง และแมลงต่างๆ เป็นต้น จากช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมาใช้ โดยนำข้อดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าวมาใช้ร่วมกัน และจากการศึกษาของ สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) พบว่าเมื่อนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF มารวมกันภายในบ่อเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 5.2 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน ระบบยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ซีโอดี TKN และ TP ใกล้เคียงกับระบบเดี่ยว ทั้งแบบ FWS และ SF ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 2.5 และ 3.1 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน และการจัดลำดับก่อน-หลังระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยการหาสัดส่วนที่พอเหมาะของระบบแบบ FWS และแบบ SF ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของชุมชนให้มากยิ่งขึ้น ทำให้ลดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบเป็นการแก้ปัญหาการใช้ปริมาณพื้นที่ในการก่อสร้างระบบให้ลดน้อยลง และนำพื้นที่ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก เป็นระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับชุมชนขนาดเล็ก และปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการเกษตรกรรมต่อไปได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อนำไปใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชนขนาดเล็ก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างระบบแบบ FWS และแบบ SF ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ซึ่งมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.5 เมตร x 3.0 เมตร x 0.8 เมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS-SF ซึ่งมีอัตราส่วนผสมระหว่างแบบ FWS :แบบ SF เท่ากับ 1:1 1:2 1:4 และ 2:1 โดยพืชที่ใช้ได้แก่ ต้นกกฝรั่งกา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออก จากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ค่าบีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และค่าของแข็ง และทำการสู่มตัวอย่างพืช เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม และประเมินสัดส่วนระหว่างระบบแบบ FWS และ แบบ SF ที่เหมาะสมในเรื่องประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียในน้ำ เพื่อนำไปประยุกต์กับระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชนขนาดเล็ก

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถนำผลที่ได้เพื่อไปพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกับระบบที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน เพื่อเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ, ประหยัดพลังงาน ง่ายต่อการดูแลรักษา และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปใช้สำหรับชุมชนขนาดเล็กที่มีงบประมาณจำกัด เช่น องค์การบริหารตำบล หรือเทศบาลที่มีขนาดเล็ก

1.4.2 สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียจากการเกษตรกรรม เช่น ฟาร์มเลี้ยงกุ้ง ฟาร์มเลี้ยงสุกร หรือฟาร์มเลี้ยงสัตว์ต่างๆ เนื่องจากระบบนี้สามารถบำบัดสารอาหารจำพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ดี



## บทที่ 2

### การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอึดตัวด้วยน้ำไว้ได้ (Kadlec and Kngiht, 1996) ความลึกของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีระดับแตกต่างกันไปและน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในบริเวณพืชขึ้นกันอยู่หนาแน่นอย่างช้าๆ พืชส่วนใหญ่ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพน้ำท่วมและสภาพขาดออกซิเจนของดินได้ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น พืชจำพวกอ้อ (*Phragmites*) กก (*Scirpus*) และธูปฤาษี (*Typha*) บนตัวกลางตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ได้แก่ ทราย กรวดหรือดินซึ่งใช้เป็นตัวกรอง ในบางครั้งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาจถูกออกแบบให้มีรูปร่างแตกต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นร่องหรือช่องแคบๆ และยาว โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงกระบวนการทำงานต่างๆภายในบ่อได้ตามความต้องการโดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่นๆ ของระบบ (Reed et al., 1988) ในปัจจุบันระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เป็นทางเลือกทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้าง การควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ (Kadlec and Kngiht, 2006; Cooper et al., 1996; Lamchaturapatr et al., 2007) ลดภาระการกำจัดตะกอนน้ำเสียซึ่งเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป ตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป จะมีปริมาณมากและต้องไปเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการถ้าเลือกใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะไม่มีตะกอนน้ำเสียเกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้ลดภาระค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ และยังเป็น การเพิ่มทัศนียภาพและเป็นสถานที่พักผ่อน เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต และเพิ่มความหลากหลายของระบบนิเวศได้

#### 2.2 ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

##### 2.2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Systems: FWS)

ระบบนี้จะประกอบด้วยแอ่งหรือร่อง ทำจากดินเหนียวหรือจากวัสดุทางด้านธรณีวิทยาอื่นๆ ทั้งที่สร้างขึ้นหรือมีอยู่ตามธรรมชาติบนพื้นบ่อเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ และประกอบไปด้วยดินและวัสดุตัวกรองต่างๆ ที่จะช่วยให้รากพืชสามารถยึดเกาะอยู่ได้ โดยน้ำที่ความลึกระดับหนึ่งจะไหลอยู่เหนือผิวดินหรือตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าการกระจายน้ำเข้าสู่ระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีพื้นที่แคบ ยาว และมีระดับความลึกของน้ำในบ่อไม่มากนัก ประกอบกับน้ำมีการไหลอย่างช้าๆ

ผ่านกิ่งก้านของพืชที่แผ่กระจายอยู่ทั่วไปในระบบ จะทำให้เกิดการไหลของน้ำแบบไหลตามกัน (Plug-Flow) ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาการไหลลัดวงจรของระบบลดลงได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าภาระบีโอดีอยู่ในช่วง 45 -60 kg/ha-d (U.S.EPA, 2000)

### รูปที่ 2.1 พื้นที่น้ำชุ่มประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Polprasert, 2004)

การกำจัดสารอินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบและแหล่งออกซิเจนที่จะใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดของเสียโดยจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนหนึ่งได้มาจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำและปริมาณออกซิเจนที่จะถูกลำเลียงผ่านไปยังส่วนรากของพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยรูปที่ 2.2 ก. เป็นบริเวณใกล้ผิวน้ำซึ่งระบบมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับบรรยากาศ จะเกิดขึ้นที่ส่วนของลำต้นพืชหรือชั้นตัวกลางซึ่งเป็นบริเวณที่มีการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบริเวณรอบๆต้นพืชก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ต้นพืชและเกิดกระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนรูปที่ 2.2 ข. แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณรากพืช ซึ่งเป็นบริเวณที่จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนทำการบำบัดน้ำเสียซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่มาจากการแพร่กระจายจากบรรยากาศผ่านในต้นพืชและแพร่ออกทางรากของพืช และรูปที่ 2.2 ค. แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณตัวกลางที่อยู่ลึกลงไปจากรากพืช เป็นบริเวณที่จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนทำการบำบัดน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

**2.2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow Systems: SF)** ระบบนี้ประกอบด้วยร่องยาวหรือพื้นดิน มีตัวกลางเพื่อช่วยให้พืชสามารถยึดเกาะและพืชเจริญเติบโตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตัวกลางที่ใช้อาจเป็นหินหรือหินบด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 cm) กรวดและดินชนิดต่างๆ ใดๆอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน (Reed et al., 1988) น้ำเสียที่ไหลผ่านด้านข้างหรือไหลในแนวตั้งของตัวกลางจะทำให้ น้ำเสียถูกบำบัดในระหว่างสัมผัสกับผิวน้ำของตัวกลางและส่วนรากของพืช บริเวณใต้ชั้น

กลางจะอึดตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น แต่พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยัง ส่วนรากซึ่งทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ สามารถเจริญเติบโตในส่วนรากและไรโซมของพืชได้

รูปที่ 2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS  
(กรมควบคุมมลพิษ,2548)

รูปที่ 2.3 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิว (Polprasert,2004)

### 2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบFWS และแบบ SF

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียมีข้อดี คือ สามารถปรับเปลี่ยนพื้นที่ที่จะใช้สร้างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ง่าย การทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบไม่ยุ่งยาก การควบคุมและบำรุงรักษาง่าย ระบบมีเสถียรภาพแม้ว่าสภาวะแวดล้อมจะเปลี่ยนแปลงไป ค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการควบคุมดูแลระบบค่อนข้างต่ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว จะทำให้เกิดความสมดุลของระบบนิเวศและสภาพแวดล้อม เป็นที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของสัตว์และนกชนิดต่างๆ เป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจและศึกษาทางธรรมชาติ เป็นแหล่งอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพได้ และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวยังสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ได้โดยการตกตะกอนโดยพืช และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน เป็นระบบที่แยกน้ำเสียไม่ให้ถูกรบกวนจากแมลงหรือสัตว์ที่ทำให้เกิดโรคมานับพันปีกับคนได้ และยังสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและธาตุอาหารต่างๆ ได้โดยการกรอง และตัวกลางดูดซับเพื่อให้พืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโต แต่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ต้องใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่ 1 หรือ 2 มาก่อน เพราะระบบรับน้ำเสียหรือสารมลพิษที่ไหลเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นในปริมาณมากกว่าปกติอย่างกะทันหันไม่ได้มาก และระบบบำบัดจะขึ้นกับสภาวะอากาศ จึงทำให้มีประสิทธิภาพไม่คงที่ ถ้าอากาศหนาวจะมีโอกาสที่ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังต้องการพื้นที่มากกว่าในการก่อสร้างระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียชนิดอื่นๆ ทั่วไป นอกจากนี้ปัญหาที่เกิดจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว คือ อาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินมักเกิดปัญหาการอุดตันของระบบ แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้คล้ายกันในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวดิน คือ ปัญหาในการเริ่มต้นเดินระบบเพื่อให้พืชชนิดต่างๆ มีการเจริญเติบโตตามความต้องการได้ยาก และถ้ามีความแตกต่างกันของพืชที่ใช้ในระบบ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

## 2.3 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Wetland Component)

องค์ประกอบของระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สำหรับบำบัดน้ำเสียและสิ่งปฏิกูลมีดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ตัวกลาง (substrate)

ตัวกลางที่เลือกนำมาใช้ในพื้นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ คือ กรวด หิน และทราย ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไปโดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใดหรือใช้รวมกันก็ได้ช่องว่างในตัวกลางเหล่านี้จะใช้เป็นช่องทางไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นอกจากจะเป็นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ ด้วย ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางก็มีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วยตัวอย่างเช่น ตัวกลางที่เป็นทรายหรือกรวดนิยมนำมาใช้สำหรับในการบำบัดน้ำเสียเพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบและพืชสามารถยึดเกาะได้ง่ายเพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบและพืชสามารถยึดเกาะได้ง่าย โดยลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบนี้ที่น้ำไหลใต้

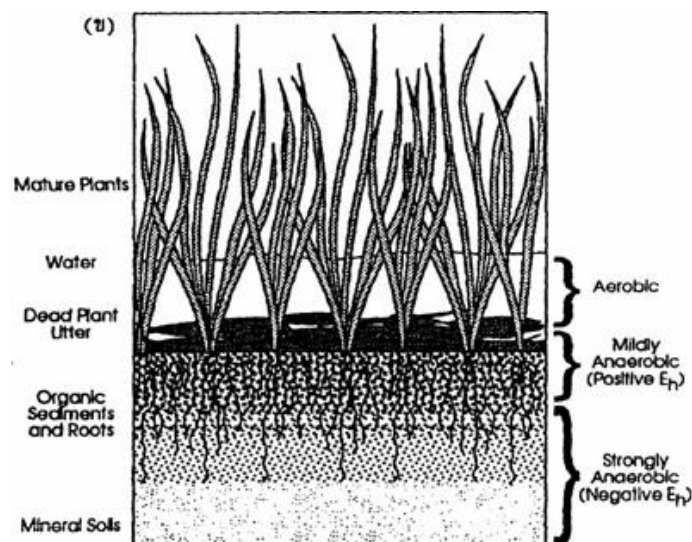
ผิวตัวกลางในแนวนอน แสดงดังตารางที่ 2.1 ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มประดิษฐ์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ แยกตามปริมาณของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งได้แก่

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

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบที่น้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดตัวกลาง (มิลลิเมตร)	ค่าความพรุน (n)	ค่าสภาพน้ำเชิงกลศาสตร์(เมตรต่อวัน)
ทรายหยาบ	2	0.28 – 0.32	100 – 1,000
หินทราย	8	0.30 – 0.35	500 – 5,000
หินเล็ก	16	0.35 – 0.38	1,000 – 10,000
หินกลาง	32	0.36 – 0.40	10,000 – 50,000
หินใหญ่	128	0.38 – 0.45	50,000 – 250,000

ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; U.S.EPA, 2000



รูปที่ 2.4 ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Kedlec and Knight, 2006)

### 2.3.2 จุลินทรีย์ (microbial organisms)

จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืชและที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป จุลินทรีย์ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีมากมายหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่ายและโปรโตซัว โดยทั่วไป จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหาร และพลังงานสำหรับการดำรงชีพของจุลินทรีย์พืช ซึ่งแหล่งพลังงานหลักของจุลินทรีย์คือสารอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีการจัดสถานะแวดล้อมให้มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการกำจัดของเสียที่ดี

### 2.3.3 พืช (Plants)

หน้าที่หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คือการลำเลียงออกซิเจน โดยผ่านทางระบบรากพืช ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเจริญเติบโตอยู่ในชั้นดินหรือแทรกตัวเข้าไปในตุ่มกลางที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวประมาณ 50 – 150 cm โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบและลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ปกติแล้วพันธุ์ของพืชที่จะปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศ และพื้นที่ในบริเวณนั้นจึงสามารถเจริญเติบโตได้ดี (U.S.EPA, 2000) อย่างไรก็ตามลักษณะของน้ำเสียที่จะใช้บำบัดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงด้วย เช่น พืชที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอาหารสูงๆ เช่น สิ่งปฏิกูล หรือน้ำเสียจากการเกษตร คือ ธูปฤาษี กก อ้อ และหญ้าคมบาง เป็นต้น นอกจากนี้การใช้สารอาหารของพืชมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนฟอสฟอรัส และมลสารอื่นๆในน้ำเสียด้วย อัตราการใช้สารอาหารของพืชถูกจำกัดโดยอัตราการเจริญเติบโตสุทธิและความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อ ในพืชที่มีอายุน้อยความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อมีค่าสูง (มากกว่า 25 กรัมต่อกิโลกรัมเนื้อเยื่อ) และลดลงเมื่อโตเต็มที่ (กลอยกาญจน์ เก้า เนตรสุวรรณ, 2544) ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อและอัตราการนำไปใช้ของพืชแต่ละชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช

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

ที่มา : Reddy and Dedusk, 1987

## 2.4 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

### 2.4.1 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถมีได้ด้วยการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer) จากบรรยากาศสู่น้ำและการดึงออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเกิดขึ้นที่ใบพืชผ่านไปยังก้านพืช เข้าสู่ระบบรากพืช ในส่วนของตัวกลางซึ่งสัมผัสกับรากและไรโซมสามารถเกิดสภาวะแอโรบิกและแอนแอโรบิกได้ (Reed et al., 1988) ออกซิเจนจากรากจะถ่ายออกสู่บริเวณราก (Root Zone) ทำให้เกิดสภาวะแอโรบิก ดังนั้น สภาวะแอโรบิกและสภาวะแอนแอโรบิกจึงเป็นส่วนประกอบของชั้นตัวกลางนั่นเอง Reed et al.(1988) ได้รายงานว่ามีพืชไหล่น้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนจากพื้นผิวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ 5-45 กรัมออกซิเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับความเค็มของดิน (Soil Stress)

### 2.4.2 อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อการทำงานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนการทำงานของระบบ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูง การระเหยและการคายน้ำของพืชจะมากทำให้ความเข้มข้นของมลสารเพิ่มขึ้น จึงต้องมีการทำให้เจือจางก่อนเข้าระบบหรือมีการบำบัดขั้นต้นเพิ่มเติม ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำมากจนทำให้น้ำเป็นน้ำแข็ง ต้องมีการเติมอากาศเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำ ป้องกันไม่ให้น้ำแข็งตัว กรณีอุณหภูมิสูงอาจทำให้การบำบัดเป็นไปไม่ได้ เพราะความร้อนจะทำลายพืชบางชนิดหรือเพิ่มอัตราการย่อยสลายอาหารของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเสียมวลของอัตราการลดค่าบีโอดีและการละลายออกซิเจนจากบรรยากาศ นอกจากนี้ น้ำที่ร้อนขึ้นอาจทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีอุณหภูมิสูงกว่ามาตรฐาน แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำอัตราการย่อยสลายจะลดลง และพืชบางชนิดอาจตายได้ ทำให้แบคทีเรียไม่มีที่ยึดเกาะ และไม่มีกรไหลซึมของสารประกอบบางอย่างในพืช และถ้าอุณหภูมิลดลงถึงศูนย์ องศาเซลเซียสการย่อยสลายจะหยุดลง (ศุภา กานตวนิชกูร, 2538)

### 2.4.3 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชมีผลต่อลักษณะทางเคมีของน้ำ และสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการชีววิทยาจะเกิดในช่วงพีเอชที่จำกัด เช่น การบำบัดโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 4.0-9.5 และการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยสิ่งมีชีวิตอยู่ในช่วงพีเอช 6.5-7.5 แต่จะดีที่สุดในช่วงพีเอชเท่ากับ 7.2 หรือมากกว่า เป็นต้น นอกจากนี้พีเอชยังเป็นสิ่งสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ด้วย (Kadlec and Knight, 2006)

## 2.5 กลไกการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดของเสียจะถูกกำจัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับโดยอนุภาคของชั้นกรอง การสะสมในพืชและการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ พืชในระบบสามารถกำจัดมลสารต่างๆ ได้ด้วยการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ กลไกสำคัญที่ใช้ในการบำบัดของเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แสดงไว้ใน มีดังต่อไปนี้

### 2.5.1 การกำจัดสารอินทรีย์

จุลินทรีย์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมลงสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืช และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจนสารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งการกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง โดยจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดสำหรับกรณีที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544)

กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แสดงดังรูปที่ 2.5 จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมลงสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืช และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งการกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง โดยจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดสำหรับกรณีที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ

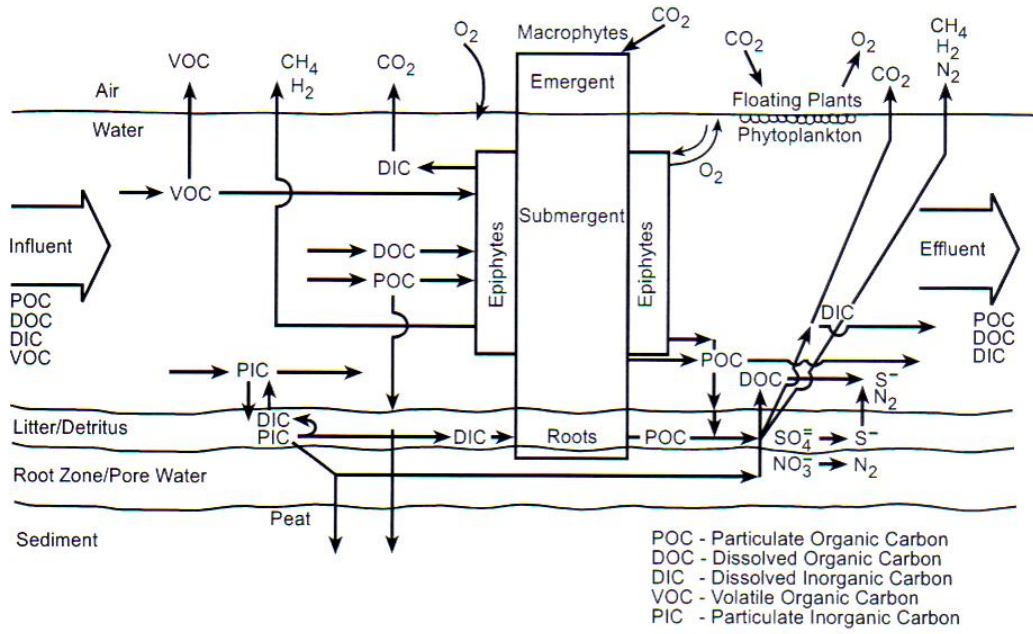


ไหลใต้ผิวตัวกลางจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง โดยออกซิเจนสามารถถ่ายเทผ่านได้ง่าย

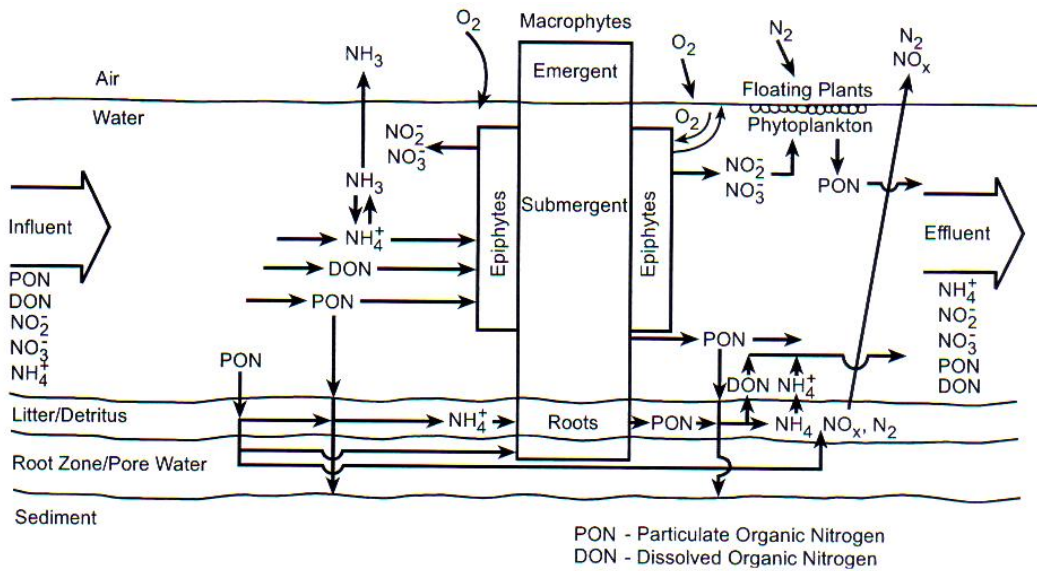
#### 2.5.2 การกำจัดไนโตรเจน

การกำจัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีหลายกลไก คือ การนำไปใช้โดยพืช การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนในดิน การระเหยในรูปของแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งการบำบัดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ เช่น แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่มีออกซิเจน และ ไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน โดยออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันมาจากทั้งการถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ และที่ซึมผ่านจากรากพืช (กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ, 2544)

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แสดงดังรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าในการกำจัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้น มีทั้งการกำจัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพโดยส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะถูกกำจัดด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การดูดซึมไนโตรเจนเข้าไปในพืช และการระเหยของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่วนมากจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย ในสภาวะที่มีพีเอชและอุณหภูมิสูงกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) ไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน เป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากนั้นจะเกิดกระบวนการ ไนตริฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนเตรทไนโตรเจน โดยมีไนเตรทไนโตรเจน เป็นสารที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดในน้ำหรือดินที่มีออกซิเจนเพียงพอ (Aerobic) ซึ่งจะรวมถึงบริเวณรอบ ๆ รากพืชด้วย แต่ถ้าระบบอยู่ในสภาพที่ไร้อากาศหรือออกซิเจน (Anoxic) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) จะเกิดขึ้นและ ไนเตรทไนโตรเจน จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนโตรทไนโตรเจน และ ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ในที่สุด นอกจากการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่เกิดจากจุลินทรีย์แล้ว ยังเกิดการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนและแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวกลางโดยประจุลบของ ไนเตรทไนโตรเจนจะถูกยึดติดกับไอออนบวกบริเวณพื้นผิวของตัวกลาง เช่น แร่ดินเหนียวด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางด้านไฟฟ้า (Electrostatic Bonding) คือ ประจุลบของไนเตรทไนโตรเจนจะถูกยึดอยู่กับประจุบวกของตัวกลาง และยังเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย เมื่อ ไนเตรทไนโตรเจนเข้าไปแทนที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับโครงสร้างของแร่ที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางได้ เช่น โลหะหนักพวก อะลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้น การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวกลางจะเป็นการดูดซับไอออนบวก (Adsorption of Cation) ของอนุภาคตัวกลางที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบ โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของตัวกลางจะการยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่นได้ (ปัทมาวิทยากร, 2533) นอกจากนี้แอมโมเนียมไนโตรเจนยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะอยู่บริเวณผิวของตัวกลางได้ เช่น โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน เป็นต้น (Evangelou, 1998; Demir et al., 2002)



รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)



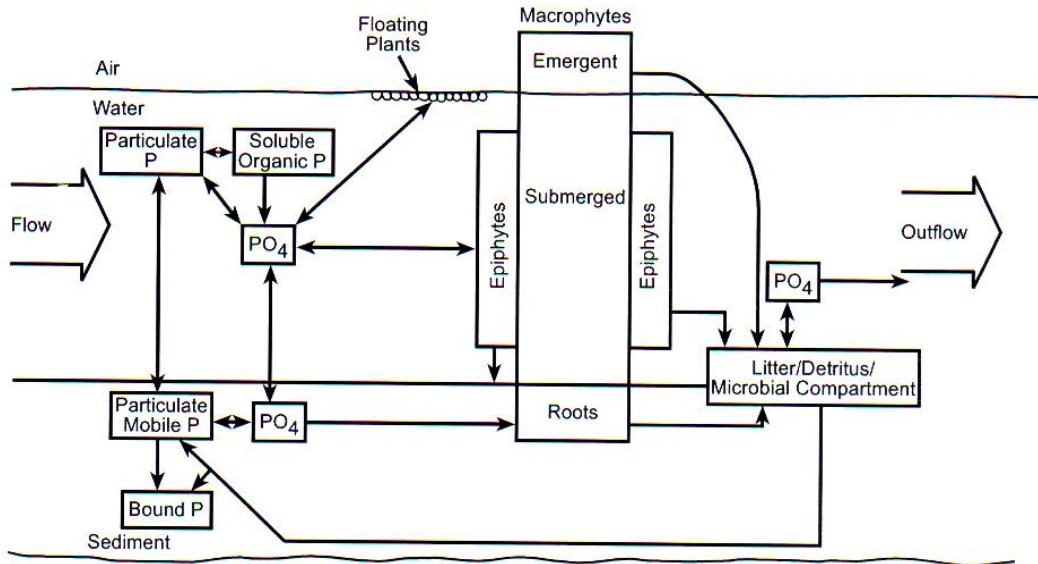
รูปที่ 2.6 กลไกการกำจัดไนโตรเจนของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

### 2.5.3 การกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง และการดูดซึมโดยพืช ซึ่งส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวกลาง ถ้าหากตัวกลางมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียม และแคลเซียม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ดียิ่งขึ้น เมื่อตัวกลางดูดซับฟอสฟอรัสไว้พืชจะดูดซึมผ่านราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป โดยเมื่อฟอสฟอรัสยึดติดกับตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว จากนั้นจะเกิดการดูดซับ และตกตะกอนผลึก โดยความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของตัวกลางชนิดนั้น ๆ (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) สารประกอบฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำจะมาจากน้ำที่ไหลเข้า และการพัดพาของบรรยากาศ ส่วนใหญ่จะพบฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ ของแข็ง และฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปของแข็ง การกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง การย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการดูดซึมโดยพืช ซึ่งส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวกลาง โดยการทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมที่ประกอบอยู่ในตัวกลาง (Zhu et al., 1997; Bubba et al., 2003) จากนั้นพืชจะดูดซึมผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป โดยเมื่อฟอสฟอรัสยึดติดกับตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว จากนั้นจะเกิดการดูดซับ และตกตะกอนผลึก โดยความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของของตัวกลางชนิดนั้น ๆ

กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำทั่วไป แสดงในรูปที่ 2.7 โดยจะเห็นได้ว่าวงจรของฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีส่วนประกอบสำคัญหลายอย่างได้แก่ น้ำ พืช สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก อนุภาคต่าง ๆ ในระบบ และตัวกลาง ฟอสฟอรัสตามธรรมชาติที่เข้าสู่ระบบมาจากน้ำที่เข้าสู่ระบบ และการพัดพาในอากาศ ทั้งในรูปสารละลายและรูปของแข็ง ส่วนฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจะปนไปกับน้ำออก และซึมลงไปในชั้นตัวกลางและชั้นตะกอน ฟอสฟอรัสบางส่วนก็ระเหยไปในอากาศ กลไกของการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สำคัญที่สุดคือ การซึมลงไปในชั้นตัวกลาง และมีการสะสมที่ตัวกลางขึ้น ส่วนในแง่ของการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ของพืช และกิจกรรมการนำไปใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิต เช่น ปลา หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำถือเป็นส่วนน้อยในกรณีที่ต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้น การใช้ส่วนผสมระหว่างชั้นตัวกลางที่มีเหล็กและอลูมิเนียมได้รับความนิยม โดยอาจจะมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำการไหล ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น (Steiner and Freeman, 1989)

กลไกการบำบัดมลสารต่าง ๆ ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีทั้งกระบวนการทางกายภาพเคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การดูดซับ การตกตะกอน การกรองของตัวกลาง การสะสมในพืช และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ สรุปกลไกการบำบัดที่สำคัญของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแสดงดังตารางที่



รูปที่ 2.7 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

ตารางที่ 2.3 สรุปกลไกการกำจัดมลสารต่าง ๆ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

มลสาร	กลไกการกำจัด
สารอินทรีย์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ โดยสภาวะแอโรบิก แพคัลเททีฟ และแอนแอโรบิกแบคทีเรีย ที่อาศัยอยู่บนพืชและชั้นตะกอน</li> <li>- กระบวนการดูดซับ</li> <li>- การกรอง</li> <li>- การตกตะกอน</li> </ul>
ไนโตรเจน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน / ดีไนตริฟิเคชัน</li> <li>- การดูดซับโดยตัวกลาง</li> <li>- การดูดซึมโดยพืช</li> <li>- การระเหยเป็นไอ</li> </ul>
ฟอสฟอรัส	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การกรอง</li> <li>- การตกตะกอน</li> <li>- การดูดซับด้วยตัวกลาง</li> <li>- การดูดซึมโดยพืช</li> </ul>

## 2.6 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้พื้นผิว ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยจะมีปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้ (U.S.EPA, 2000)

### 2.6.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT)

มีหน่วยเป็น วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ใช้จะกำหนดโดยตั้งสมมุติฐานว่ามีการกวนผสมหรือเป็นปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) การหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงทำได้ยากเพราะการไหลในระบบจะซับซ้อน เนื่องจากมีพืชเจริญเติบโตอยู่ และพืชจะไปแทนที่ปริมาตรน้ำจำนวนหนึ่งด้วย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2538) ระยะเวลาเก็บกักน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาหรือการย่อยสลายสารอินทรีย์

### 2.6.2 ความลึกน้ำ (Water Depth)

ความลึกของน้ำมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวเท่านั้นระดับน้ำจะเป็นปัจจัยหลักในการเลือกและบำรุงรักษาพืชในระบบ เพราะพืชบางชนิดต้องการที่จะอยู่ในน้ำตื้นไปจนถึงระดับที่ลึกขึ้นตามแต่ชนิดของพืช

### 2.6.3 อัตราภาระบรรทุกทุกชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)

มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/ (ตารางเมตร.วัน) เป็นปริมาตรของน้ำที่เติมต่อวันต่อพื้นที่ผิวของระบบปกติแล้วระบบพืชน้ำส่วนใหญ่จะดำเนินแบบไหลต่อเนื่อง

### 2.6.4 อัตราภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ (เฮกแตร์.วัน) เช่น ค่าบีโอดี เป็น กิโลกรัม บีโอดี/ (เฮกแตร์.วัน) เป็นมวลของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่อหน่วยพื้นที่ผิวของระบบต่อหน่วยวัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

### 2.6.5 ความลึกของตัวกลาง (Depth of media)

มีหน่วยเป็น เมตร มีความสัมพันธ์กับความยาวของรากพืช หากความความลึกของชั้นตัวกลางมีความเหมาะสมกับความยาวของรากพืชจะส่งผลให้พืชสามารถพัฒนาระบบรากได้ดี

### 2.6.6 ความพรุนของดิน (porosity)

มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบ หากตัวกลางที่เลือกใช้มีความพรุนสูงประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงด้วย และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยลง

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบ FWS และแบบ SF

รายละเอียด	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลผ่านพื้นผิว ตัวกลาง	อ้างอิง	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลใต้ผิวดินตัวกลาง	อ้างอิง
ระดับความสูง น้ำ (เมตร)	0.1 – 0.6	Reed et al. (1988); Metcalf and Eddy (1991); Crites (1994);	0.3 – 0.8	Metcalf and Eddy (1991); US.EPA (2000)
	0.6 – 0.9	US. EPA (2000)		
ระดับความสูง ตัวกลาง (เมตร)	0.2-0.3	Reed et al (1988); Watson and Hobson (1989); Cooper et al (1996)	0.5-0.6	US.EPA (2000); Ong et al (2009)
ระยะเวลาเก็บ กัก (วัน)	2-3	US. EPA (2000)	2 - 15	Metcalf and Eddy (1991); Crites (1994); Ong et al (2009)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 ต้นกกฝรั่ง

สำหรับพืชที่เลือกใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ ต้นกกฝรั่ง (รูปที่ 2.8) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cyperus alternifolius* L. เป็นพืชใล่พื้นน้ำ (Aquatic plant) ลำต้นสั้นอยู่ใต้ดินมีลักษณะเป็นเหง้า สามารถแตกกอได้ ส่วนของลำต้นอยู่เหนือดินสูงประมาณ 1.0 – 1.5 เมตร ลำต้นมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมที่ค่อนข้างมนกลม ใบเป็นแผ่นบางเป็นกระจุกหุ้มอยู่ที่ส่วนโคนของลำต้น รูปร่างเรียวยาวแบนเป็นวงประมาณ 20 อัน มีลักษณะเรียวยาวแบนปลายตัด ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร กว้างประมาณ 1 เซนติเมตร สีเขียวสด ดอกออกจากโคนต้นตามซอกใบ เป็นช่อดอกเล็กๆ ช่อหนึ่งสองชั้น ดอกมีขนาดเล็กสีขาวอมเขียว เมื่อดันแก่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ก้านช่อดอกสีเขียวอ่อน และมีใบประดับเป็นจำนวนมาก สามารถพบตามที่มีน้ำขัง ริมคลอง และตามทีลุ่มชื้นแฉะทั่วไป ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดและการแตกกอ ประโยชน์ของต้นกกฝรั่งสามารถใช้เป็นสมุนไพรแก้ไข้ การตกเลือดจากอวัยวะภายใน แก้ปากเป็นแผล ฯลฯ (สุรชัย มัจฉาชีพ, 2538)

การเลือกใช้ต้นกกฝรั่ง เนื่องจากมีความทนต่อสารพิษสามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติของน้ำเสียได้ดี และสามารถเจริญเติบโตและดำเนินกิจกรรมต่างๆ ได้ตลอดการทดลอง นอกจากนี้โครงสร้างของต้นกกฝรั่งเป็นพืชที่มีเส้นใยที่ไม่เน่าสลายง่าย จึงมีผลน้อยในการก่อให้เกิดการเจือปนของสารอินทรีย์กลับคืนสู่น้ำเสียอีกครั้งหนึ่ง (กิตติ เอกอำพน และสำอาง หอมชื่น, 2529) และต้นกกฝรั่งยังเป็นพืชที่พบได้เกือบทุกแห่งในประเทศไทย สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 5 – 7.5 ส่วนอุณหภูมิ 16 – 26 องศาเซลเซียส และมี

ความสามารถทนต่อความเค็มได้สูงสุด 20 ppt (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) โดยที่ผ่านมามีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับต้นกกฝรั่งที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จากการศึกษาของเกียรติศักดิ์ และ ศุวศา (2546) ได้ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ซึ่งใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร พบว่าต้นกกฝรั่งสามารถดูดซึมไนโตรเจนได้ร้อยละ 0.43 – 3.68 ของไนโตรเจนรวม และต้นกกฝรั่งก็ยังมีความทนต่อโลหะหนัก จึงมีการนำต้นกกฝรั่ง มาใช้เพื่อกำจัดแคดเมียม และแมงกานีส โดยต้นกกฝรั่งจะดูดซึมโลหะต่างๆ ไปไว้บริเวณราก (Cheng et al., 2002) ดังนั้นการกำจัดมลสารโดยตรงขึ้นกับความสามารถของรากพืชที่จะดูดซึมสารต่างๆ และกระบวนการทางชีวเคมีภายในพืชเอง



รูปที่ 2.8 ต้นกกฝรั่ง

## 2.7.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS

การศึกษาของ Cameron et al (2003) ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง เพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน ซึ่งน้ำทิ้งจากชุมชนมีปริมาณสารอินทรีย์ และธาตุอาหารมาก จากการศึกษาพบว่า สามารถบำบัด BOD, TKN, TSS, TP และ ortho-PO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ได้ร้อยละ 34, 37, 93, 90 และ 82 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัด *Fecal Coliforms* และ *E.coli* ได้ร้อยละ 52 และ 58 อีกด้วย จากการศึกษาของ Lim et al (2001) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน และทองแดง (Cu) โดยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทำการปลูกต้นธูปฤาษี พบว่า สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 22 และกำจัดค่าทองแดงร้อยละ 30-57 ซึ่งการบำบัดไนโตรเจนเกิดจากการดูดซึมโดยต้นธูปฤาษี นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษานำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก จากการศึกษาของ Pimpan and Jindal, (2009) ได้นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการกำจัดแคดเมียม พบว่า แคดเมียมถูกกำจัดโดยการดูดซับของดิน และการนำไปใช้โดยพืช ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 61.7 – 99.6 และจากการศึกษาของ Maine et al (2009) พบว่าสามารถบำบัดโครเมียมได้ร้อยละ 53 และกำจัดนิเกิลร้อยละ 39 จากงานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดมลสารได้หลากหลายประเภท แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง คือ ปัญหาเรื่องยูงและใช้พื้นที่มาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

Schulz and Rennert (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเทราต์โดยใช้ระบบ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 ค่า คือ 3.5, 5.5 และ 11 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 67-72 ซีโอดีร้อยละ 30-31 ฟอสฟอรัสทั้งหมด ร้อยละ 41-53 และไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 19-30 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและแอมโมเนียมีค่าต่ำ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5.5 ชั่วโมง และ 11 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ 3 ชั่วโมง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาได้

### 2.7.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF

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

Summerfelt et al. (1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวในแนวตั้งและแบบไหลแนวนอน ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราส์ พืชที่ใช้ในระบบคือหญ้าแฝก จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดแบบไหลในแนวนอนและแนวตั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัด ของแข็งแขวนลอย ร้อยละ 98 และ 96 COD ทั้งหมด ร้อยละ 91 และ 72 ฟอสฟอรัสทั้งหมด ร้อยละ 90 และ 82 แอมโมเนียทั้งหมด ร้อยละ 89 และ 86 ตามลำดับ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป บีโอดี, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และสามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ (Brix et al, 2001; Vymazal et al, 1998) ปัจจุบันมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางไปใช้ในการกำจัดมลสารต่าง ๆ ในน้ำ เช่น จากการศึกษาของ Poggi-Varaldo et al (2002) ได้ใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยปล่อยน้ำไหลเข้าระบบแนวราบ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD, BOD และ TSS ร้อยละ 90, 91 และ 85 ตามลำดับ นอกจากนี้ Zachritz and Jacquez (1993) ศึกษาการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงปลา พบว่าสามารถลดของแข็งและฟอสฟอรัสในน้ำเสียร้อยละ 67.2 และ 87.0 ตามลำดับ โดยการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากการดูดซับโดยตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Zhu et al, 1997; Drizo, 1998; Grüneberg and Kern, 2001; Sakadevan and Bavor, 1998). จากการศึกษา Mantovi et al (2003) ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มนม พบว่า สามารถกำจัดสารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้ร้อยละ 90.8, 91.9, 79.1 และ 60.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม โดย Maine et al (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ โครเมียม นิ



เกิด และสังกะสี ซึ่งเกิดจากโรงงานเหล็กโดยมีการปนเปื้อนในน้ำเสียโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 86 และกำจัดนิเกิลและสังกะสีร้อยละ 67 จากการศึกษาของ Ojstršek et al (2007) นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม สามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 70 และ COD ร้อยละ 88 ซึ่งกลไกสำคัญในการบำบัดสีและสารอินทรีย์เกิดจากกระบวนการใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

#### 2.7.4 ข้อเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดิน

Kadlec (2009) ได้ทำการเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลใต้พื้นผิว และพบว่า ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนทั้งหมดค่อนข้างดี แต่ในฤดูหนาวประสิทธิภาพของระบบจะลดลงและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและแมลงต่างๆ ส่วนระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้พื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ไนเตรทและเชื้อโรคได้ค่อนข้างดี สามารถรับอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูงกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว แต่จะมีปัญหาเรื่องการอุดตันของตัวกลาง

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

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

Naz et al (2009) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ชนิดไหลในแนวขวาง (Horizontal subsurface flow; HSSF) และระบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) พบว่า ระบบ HSSF มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และค่าซีโอดี สูงกว่าระบบแบบ FWS

โดยเฉพาะในช่วงสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และปัญหาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ในสภาวะที่มีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง ๆ ในเฉพาะช่วงฤดูใบไม้ผลิ จะทำให้เกิดปัญหาสาหร่ายเกิดขึ้นมาก

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลางและแบบไหลใต้ผิวดักกลาง สามารถสรุปข้อดี และข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อดี – ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF

ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง (FWS)	Cameron et al (2003) Pimpan and Jindal, (2009)  กรมควบคุมมลพิษ, 2546 Maine et al (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● สามารถบำบัด กำจัด สารอินทรีย์, ของแข็ง แขนวลอยทั้งหมด , ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและ กำจัดเชื้อโรคได้</li> <li>● รับออกซิเจนจาก บรรยากาศได้โดยตรง</li> <li>● สามารถกำจัดโลหะหนัก ได้ เช่น ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิเกิล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เกิดปัญหาในเรื่องของการ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง</li> <li>● ใช้พื้นที่ในการก่อสร้าง มาก</li> </ul>
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF)	Brix et al, 2001; Vymazal et al, 1998)  Maine et al (2006)  (Zhu et al, 1997; Drizo, 1998; Grüneberg and Kern, 2001; Sakadevan and Bavor, 1998) กรมควบคุมมลพิษ, 2554	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีประสิทธิภาพในการกำจัด สารอินทรีย์, ของแข็ง แขนวลอยทั้งหมด, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้</li> <li>● สามารถกำจัดโลหะหนัก ได้ เช่นโครเมียม นิเกิล และ สังกะสี</li> <li>● เกิดการกำจัดฟอสฟอรัส โดยการดูดซับของตัวกลาง ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์</li> <li>● จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนสามารถ เจริญเติบโตได้ในบริเวณ รากของพืช</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เกิดปัญหาการอุดตันของ ชั้นตัวกลาง</li> <li>● เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ได้น้อยกว่าแบบไหลผ่าน พื้นผิว</li> </ul>

### 2.7.5 ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

เป็นการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่างๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปจะเป็นการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับแบบไหลใต้ผิวดักกลางมาต่ออนุกรมหรือต่อขนานกัน เนื่องจากการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางอย่างเดียว พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว จึงมีการนำเอาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง นอกจากนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถกรองของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำได้ แต่ถ้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากจะทำให้เกิดการสะสมและอุดตัน จึงมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมารวมเพื่อทำการตกตะกอนของแข็งแขวนลอยบางส่วนออกจากน้ำ (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) จากช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมาใช้ โดยนำข้อดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมาใช้ร่วมกัน

Lin et al. (2003) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางต่ออนุกรมกัน เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาให้สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 47 – 86 เนื่องจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวช่วยตกตะกอนของแข็งแขวนลอยบางส่วนออก จากนั้นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางจึงกรองของแข็งแขวนลอยออกอีกครั้ง ส่วนค่าซีโอดีพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมสามารถกำจัดได้อยู่ในช่วงร้อยละ 22 – 55 โดยซีโอดีสามารถกำจัดได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว โดยจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามพืชจำนวนมากย่อยสลายสารอินทรีย์ ในการกำจัดสารอินทรีย์จากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ต่อกับแบบ SF ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 1.8-13.5 cm/d พบว่าค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปไนโตรเจนได้ดี ส่วนระบบ SF จะมีค่าในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปฟอสฟอรัสได้ดี ต่อมา Lin et al., (2002) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางต่ออนุกรมกันอีกครั้ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมสามารถกำจัดแอมโมเนีย และฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 86 – 98 และ 32 – 71 ตามลำดับ เนื่องจากการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวดักกลางมาต่ออนุกรมกัน ซึ่งทำให้เกิดทั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันได้ดี และพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถดูดซับมลสารต่างๆ ไว้ในดักกลางได้มากกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว

จากรายงานการวิจัยจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ มีข้อดี-ข้อเสีย แตกต่างกัน เช่น ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ และไนโตรเจน ได้ดีกว่า ขณะที่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส และของแข็งแขวนลอย ดังนั้นหากนำทั้งสองระบบมาผสมกันจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF ของระบบผสม ในการบำบัดน้ำเสียจากน้ำเสียชุมชนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ทำการวัดพารามิเตอร์ทั้งหมด ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 และชุดการทดลองติดตั้งอยู่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

#### 3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 14 เดือน ตั้งแต่เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2551 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552

#### 3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 3.3.1 การออกแบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

###### 3.3.1.1 ขนาดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีขนาดกว้าง × ยาว × ลึก เท่ากับ 1.0 เมตร × 3.0 เมตร × 0.8 เมตร จำนวน 4 ชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3-1 โดยมีการวางผังระบบดังแสดงในรูปที่ 3-2 รายละเอียดของชุดการทดลองดังสรุปในตารางที่ 3-1 ดังต่อไปนี้

ชุดการทดลองที่ 1 มีสัดส่วนระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS : แบบ SF เท่ากับ 1:1 โดยการแบ่งพื้นที่บ่อออกเป็น 2 ส่วน ที่ความยาว 1.5 เมตรจากส่วนต้นของบ่อ ในส่วนแรกของบ่อทำการออกแบบเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และในส่วนที่ 2 ของบ่อ ออกแบบตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ดังแสดงในรูปที่ 3-3

ชุดการทดลองที่ 2 มีสัดส่วนระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS : แบบ SF เท่ากับ 1:2 โดยการแบ่งพื้นที่บ่อออกเป็น 2 ส่วน ที่ความยาว 1.0 เมตรจากส่วนต้นของบ่อ ในส่วนแรกของบ่อทำการออกแบบเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และในส่วนที่ 2 ของบ่อ ออกแบบตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ดังแสดงในรูปที่ 3-4

ชุดการทดลองที่ 3 มีสัดส่วนระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS : แบบ SF เท่ากับ 1:4 โดยการแบ่งพื้นที่บ่อออกเป็น 2 ส่วน ที่ความยาว 0.6 เมตรจากส่วนต้นของบ่อ ในส่วนแรกของบ่อทำการออกแบบเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และในส่วนที่ 2 ของบ่อ ออกแบบตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ดังแสดงในรูปที่ 3-5

ชุดการทดลองที่ 4 มีสัดส่วนระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS : แบบ SF เท่ากับ 2:1 โดยการแบ่งพื้นที่บ่อออกเป็น 2 ส่วน ที่ความยาว 2.0 เมตรจากต้นบ่อ ในส่วนแรกของบ่อทำการออกแบบเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และในส่วนที่ 2 ของบ่อ ออกแบบตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ดังแสดงในรูปที่ 3-6

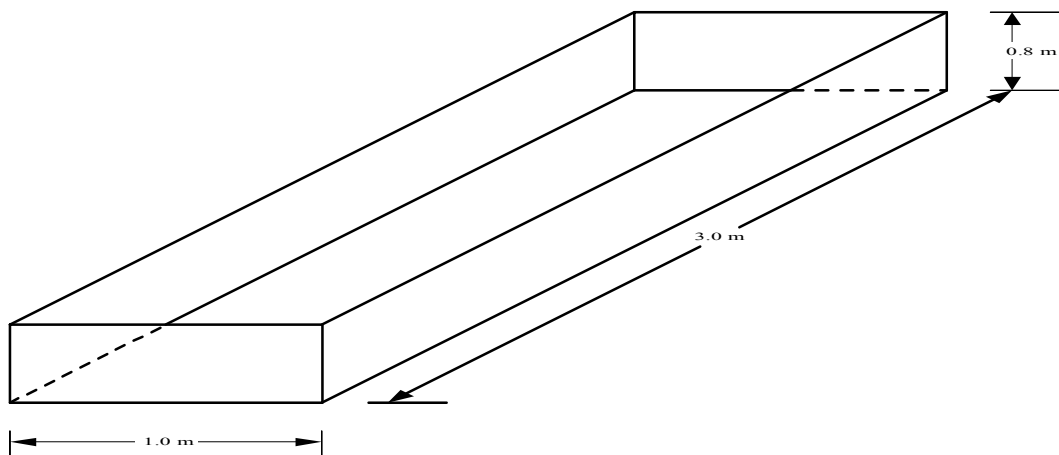
### 3.3.1.2 การปรับตัวกลางของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ส่วนแรกของแบบจำลองจะเป็นแบบ FWS นำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด ¾ นิ้ว และดินปนทรายใส่ลงในแบบจำลองให้มีระดับความสูง 0.1 และ 0.3 เมตร ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.47 และปรับพื้นบ่อให้ราบเรียบสม่ำเสมอ

ในส่วนหลังเป็นแบบ SF นำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 นิ้ว ใส่ลงในแบบจำลอง ซึ่งอยู่บริเวณช่วงต้น และช่วงท้ายของแบบจำลองส่วนหลัง โดยมีความกว้างของชั้นหินเท่ากับ 0.1 เมตร ส่วนบริเวณที่ทำการปลูกพืชใส่ดินปนทรายผสมกรวด ซึ่งมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.53 โดยระดับความสูงของชั้นหิน และชั้นดินเท่ากับ 0.7 เมตร

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการออกแบบของชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

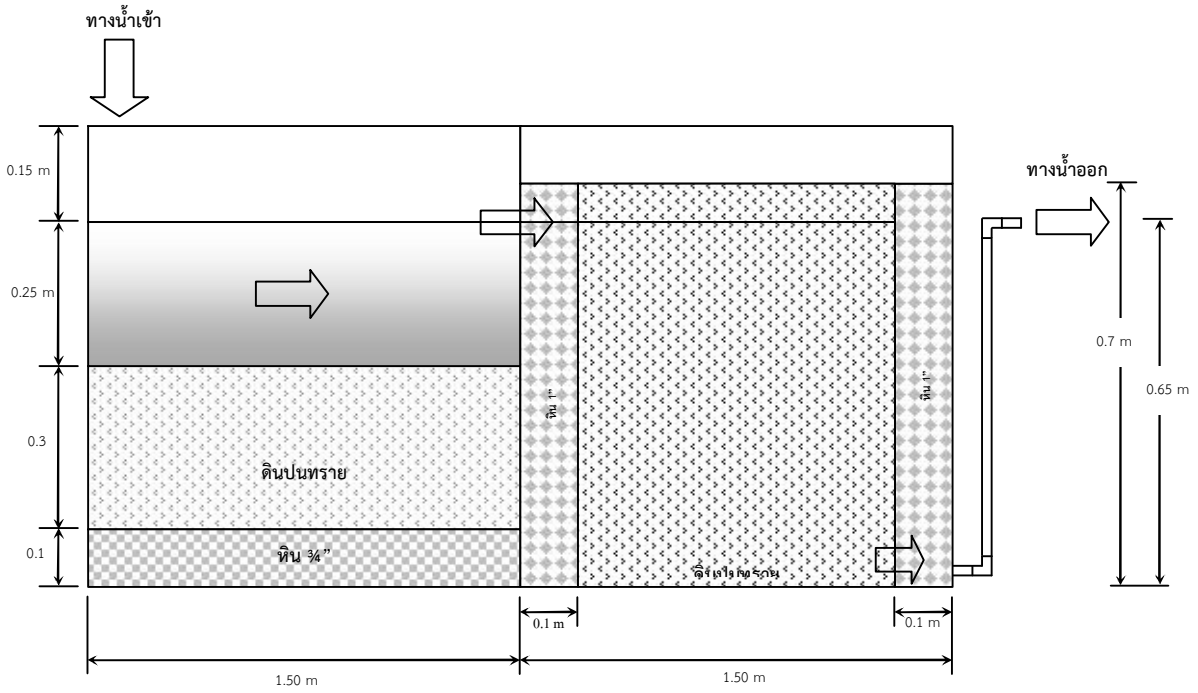
พารามิเตอร์	Unit	ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		FWS	SF	FWS	SF	FWS	SF	FWS	SF
อัตราส่วน	-	1	1	1	2	1	4	2	1
ความยาวของบ่อ	m	1.5	1.5	1.0	2.0	0.6	2.4	2.0	1.0
ความลึกระดับน้ำ	m	0.30	0.65	0.30	0.65	0.30	0.65	0.30	0.65
ความลึกของตัวกลาง	m	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
ความพรุนของดิน	-	0.47	0.53	0.47	0.53	0.47	0.53	0.47	0.53



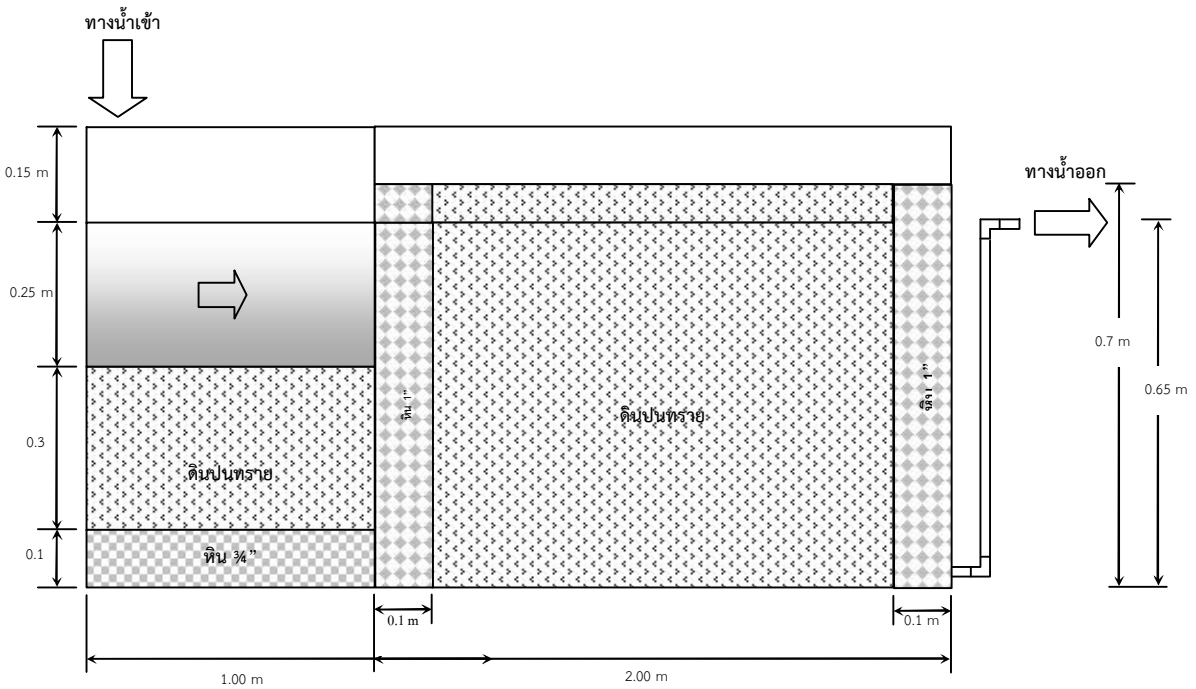
รูปที่ 3-1 ภาพจำลองชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม



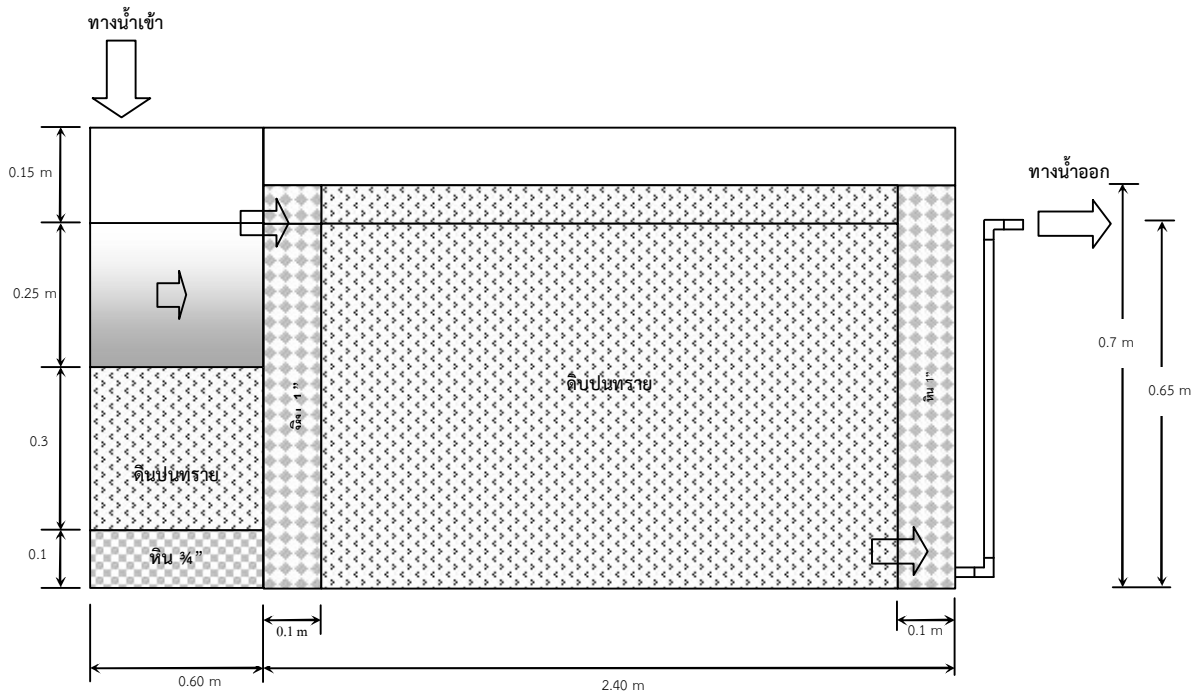
รูปที่ 3-2 ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



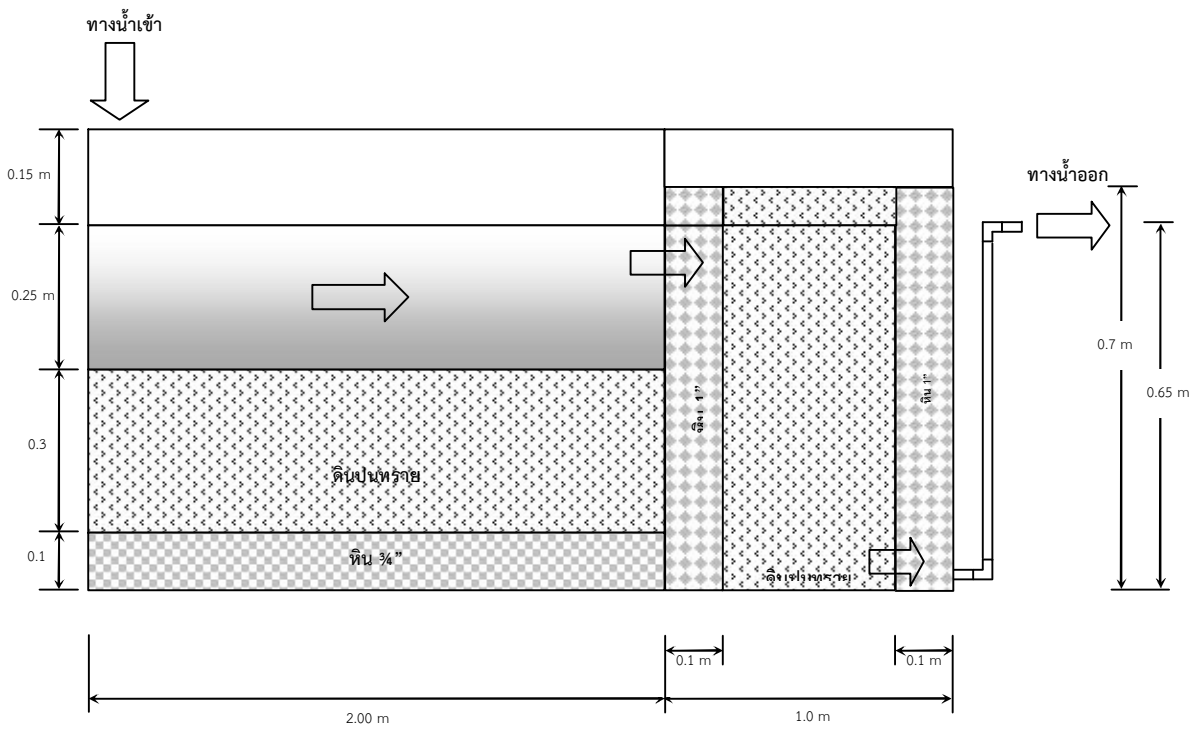
รูปที่ 3-3 ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (1:1)



รูปที่ 3-4 ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (1:2)



รูปที่ 3-5 ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 3 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ผสมแบบ FWS-SF (1:4)



รูปที่ 3-6 ภาพตัดตามขวางของชุดการทดลองที่ 4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม FWS:SF (2:1)



### 3.3.1.3 พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ ต้นกกฝรั่ง ชื่อสามัญ คือ umbrella plant (*Cyperus alternifolius* L.) โดยทำการคัดเลือกพืชที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แล้วนำมาปลูกในแบบจำลองโดยมีระยะปลูกระหว่างต้นห่างกัน 0.15 เมตร มีความหนาแน่นเท่ากับ 45 ต้น/ ตารางเมตร โดยทิ้งช่วงระยะเวลาให้พืชพักตัวในแบบจำลองก่อนเริ่มการทดลองประมาณ 2 – 3 สัปดาห์ (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3-7 ต้นกกฝรั่ง (*Cyperus alternifolius* L.) ในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

### 3.3.2 อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ และภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

กำหนดค่าอัตราการไหลของแต่ละชุดการทดลอง แล้วนำมาคำนวณหาระยะเวลาเก็บกักน้ำในแต่ละชุดการทดลอง โดยใช้สูตรการคำนวณของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

#### 3.3.2.1 การคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Reed et al., 1988)

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

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (Metcalf and Eddy, 2003)

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

- โดยที่ Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร /วัน)  
 L = ความยาวของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (เมตร)  
 W = ความกว้างของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (เมตร)  
 d<sub>n</sub> = ความลึกของชั้นดิน (เมตร)  
 d<sub>w</sub> = ความลึกของน้ำ (เมตร)  
 n = อัตราส่วนช่องว่างดิน  
 t = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน)

คำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (US.EPA, 2000)

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

โดย HLR = อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate) (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d)  
 Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (m<sup>3</sup>/d)  
 A = พื้นที่หน้าตัดของบ่อ (m<sup>2</sup>)

$$HLR = \frac{0.125}{3} = 0.042 \quad m^3/m^2-d$$

### 3.3.2.2 การคำนวณอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

จากค่าอัตราการไหล นำมาคำนวณหาค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม โดยใช้สมการที่ (3.4)

- ค่าอัตราการไหลของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เท่ากับ 0.125 m<sup>3</sup>/d
- น้ำเสียมีค่าบีโอดีเฉลี่ย 35.73 mg/L
- บ่อกว้าง 1 เมตร ยาว 3 เมตร

การคำนวณอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์:

$$OLR = \frac{Q \times BOD}{A} \quad (3.4)$$

$$= \frac{0.125 \times 35.73 \times 10000}{1 \times 3 \times 1000}$$

$$= 44.66 \text{ กิโลกรัม บีโอดี/ (เฮกแตร์.วัน)}$$

### 3.3.3 การศึกษา tracer study

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบ ซึ่งการศึกษาสารติดตามสามารถใช้ประเมินหาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม ประเมินการไหลลัดวงจรใน

ระบบและสามารถประเมินลักษณะการไหลในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจาก NaCl ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลและไม่ถูกดูดซับในชั้นตัวกลาง (Metcalf and Eddy, 2003) โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาระยะเวลาเก็บกักน้ำและค่ากระจายการไหลของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 4 ชุด โดยใช้สมการของ Levenspiel (1972) ดังสมการ (3.5) - (3.8) ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) มีหน่วยเป็น วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ใช้จะกำหนดโดยตั้งสมมุติฐานว่ามีการกวนผสมหรือเป็นปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) ซึ่งในสภาพจริงจะไม่พบทั้ง 2 กรณี การหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงทำได้ยาก เพราะการไหลในระบบจะซับซ้อนเนื่องจากมีพืชเจริญอยู่ และพืชก็ไปแทนที่ปริมาตรน้ำจำนวนหนึ่งด้วย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2538)

จากผลการศึกษาสารติดตามนำมาคำนวณหาค่าระยะเวลากักเก็บน้ำ โดยใช้สมการที่ 3.5 เพื่อหาค่า  $T_{mean}$  และจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 นำมาคำนวณหาค่า  $T_{theory}$  ของระบบจำลองทั้ง 4 ชุด และนำค่าที่ได้มาปรับค่าอัตราการไหลของระบบให้ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี และจากค่า  $T_{mean}$  นำมาคำนวณหาค่าการกระจายการไหล (d) จากสมการที่ 3.6-3.8 เพื่อประเมินลักษณะการไหลของน้ำในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3-2

$$\text{ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย;} \quad T_{mean} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} \quad (3.5)$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน;} \quad \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{mean} \quad (3.6)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{T_{mean}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.7)$$

$$\text{ค่ากระจายการไหล (d)} \quad d = \frac{D}{uL_1} \quad (3.8)$$

โดย	$T_{mean}$	=	ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย (d)
	$\sigma^2$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	$t_i$	=	ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ (d)
	$C_i$	=	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบที่เวลาใดๆ (mg/l)
	$\Delta t$	=	ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ (d)
	D	=	สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวนอน
	u	=	อัตราการเร็วไหล (m/d)
	$L_1$	=	ระยะทางของการไหลจากทางเข้าถึงทางออก (m)
	d	=	ค่ากระจายการไหล

ตารางที่ 3-2 ค่าการกระจายของการไหล

ค่าการกระจายการไหล (d)	ลักษณะการไหล
0	การไหลแบบท่อ
0.002	การกระจัดกระจายมีน้อย
0.025	การกระจัดกระจายปานกลาง
0.2	การกระจัดกระจายมีมาก
$\infty$	การไหลแบบกวนสมบูรณ์

ที่มา; Levenspiel (1972)

### 3.3.4 การเริ่มเดินระบบกับน้ำเสียสังเคราะห์

ทำการปลูกต้นกรังกานตัวกลาง (ดินปนทราย) ของแต่ละบ่อ หลังจากนั้นนำน้ำประปาเข้าสู่ระบบ เพื่อเป็นระยะพักตัวให้ต้นไม้สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมในบ่อเป็นระยะเวลา 1 อาทิตย์ หลังจากนั้นจึงนำน้ำเสียสังเคราะห์ชุมชนเข้าสู่ระบบ ลักษณะของน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากแต่ละชุดการทดลอง เพื่อตรวจวัด ค่าซีไอดี (COD) และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด เป็นระยะเวลาประมาณ 60 วัน จนกระทั่งมี ประสิทธิภาพในการบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady stage) คือ มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี และ ทีเคเอ็น เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10

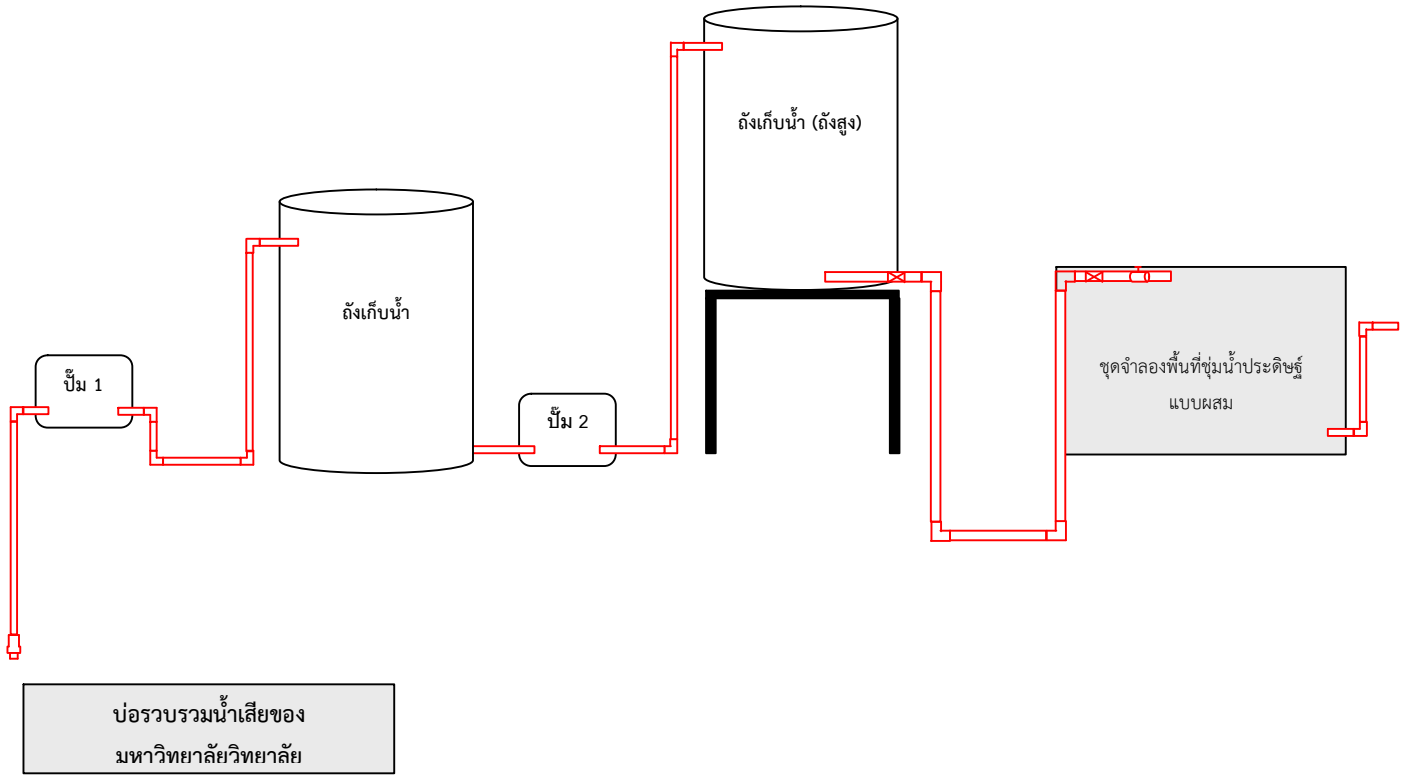
### 3.3.5 การเดินระบบกับน้ำเสียจริง

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียจริง โดยนำน้ำเสียจากบ่อ รวบรวมน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ระบบบ่อผึ่ง (Oxidation pond) ของมหาวิทยาลัย เข้าสู่ถังสูงเพื่อเก็บน้ำก่อนเข้าชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 บ่อ แผนผังของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3-8 ทำการเดินระบบเพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของ ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุด เป็นระยะเวลาประมาณ 7 เดือน

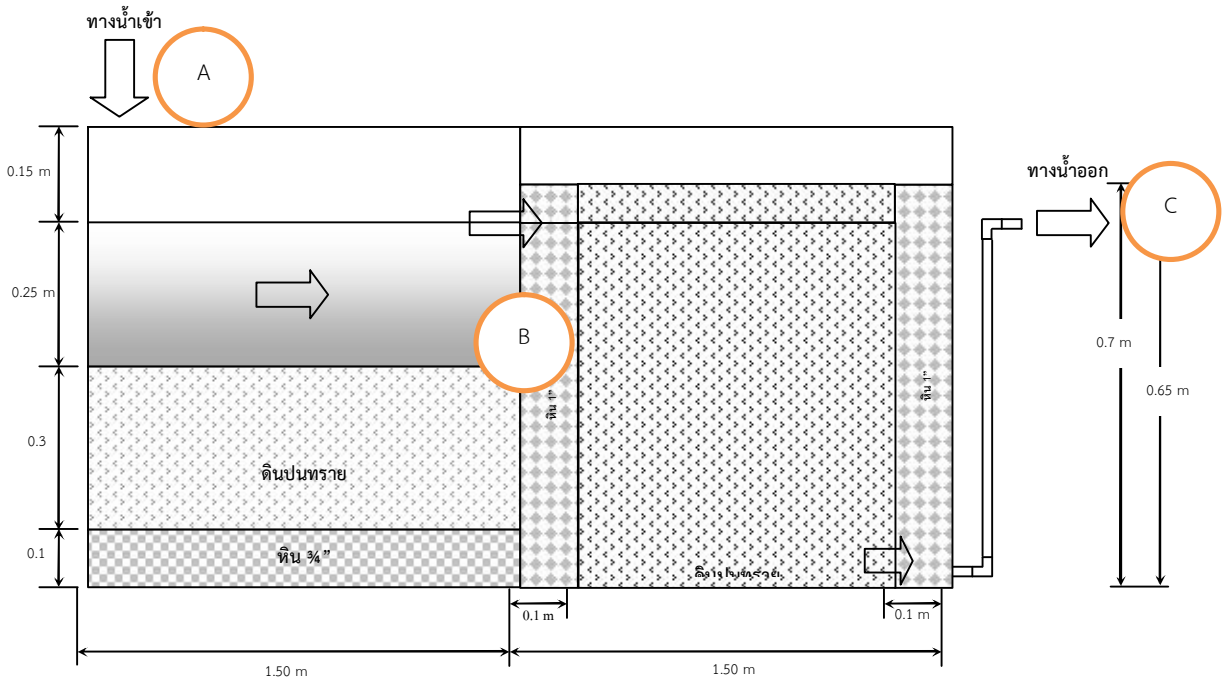
### 3.3.6 การเก็บตัวอย่าง

ช่วงระยะเวลาการเดินระบบชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมตลอดระยะเวลา 7 เดือน ทำการเดินระบบโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 2 เดือน หลังจากนั้นจึงใช้น้ำเสียจริงของมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี (ตารางที่ 3-3) จนระบบชุดจำลองเข้าสู่ระยะ steady stage หลังจากนั้นจึงทำการเก็บ ตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการศึกษา โดยมีรายละเอียดของการเก็บตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

1) การเก็บตัวอย่างพืช โดยจะทำการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยวัดความสูงของต้นกรังกาน ทุกอาทิตย์ และสังเกตอาการผิดปกติของพืชในระบบ เช่น ภาวะซีด ลักษณะที่ผิดปกติทางกายภาพ เช่น แครก แกรน เป็นต้น ในช่วงท้ายของการเดินระบบ ทำการเก็บตัวอย่างพืชในแต่ละจุดเพื่อชั่งน้ำหนักแห้ง (Biomass)



รูปที่ 3-8 แผนผังการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม



รูปที่ 3-9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 จุด

ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ใช้ใน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้ในการศึกษา	เกรียงศักดิ์* (2547)	Prochaska** (2009)	Rottiers* (1999)	น้ำเสียชุมชนจริงของ มทส.***
COD	mg/L	285.67-354.63	192.5-770	458 (±1.16)	460 (±200)	-
BOD <sub>5</sub>	mg/L	-	-	-	-	13.7-39.0
TKN	mg/L	15.44-21.12	20-85	49 (±0.41)	7 (±3)	7.80-42.8
TP	mg/L	5.37-29.23	4-15	8.18 (±0.19)	25 (±7)	-
pH		25.12-30.21	-	-	-	7.6-7.9
Temperature	°C	6.06-7.21	-	7.07 (±0.06)	6.90-7.50	-

การศึกษา (min-max)

**หมายเหตุ** \*เป็นค่าน้ำเสียชุมชนจริง\*\*เป็นค่าน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ \*\*\* ค่าน้ำเสียจริงของ มทส. ก่อนเข้าระบบบำบัดชีวภาพ (ตค. 51- กย. 52)

ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียสังเคราะห์ชุมชน ที่ใช้ในการศึกษา

2) การเก็บตัวอย่างน้ำ โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่จุดน้ำก่อนเข้าระบบ FWS (A), จุดน้ำออกจากระบบ FWS (B) และ จุดที่น้ำออกจากส่วน SF ของระบบ (C) เพื่อทำการวัดตรวจวิเคราะห์ค่า COD, BOD<sub>5</sub>, TKN, NH<sub>4</sub>-N, TP, TS, TSS และ TDS อาทิตย์ละ 1 ครั้ง เพื่อนำไปประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละชุดจำลอง วิธีการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

3) ตรวจวัดสถานะแวดล้อมภายในระบบ โดยจะทำการวัดค่า pH, DO และ อุณหภูมิ น้ำ ภายในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียสังเคราะห์ชุมชน ที่ใช้ในการศึกษา

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการเดินชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยทำการศึกษาดังนี้

3.4.1 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาดังนี้

1) การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยวัดความสูงของต้นกิ้งก่าทูกาอาทิตย์ ค่ามวลชีวภาพของต้นกิ้งก่า

2) การศึกษาปัจจัยสภาวะแวดล้อมภายในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ได้แก่ อุณหภูมิ pH และ DO เป็นต้น

3) ประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ในแต่ละพารามิเตอร์

3.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ ด้วยวิธี one-way ANOVA

ทดสอบความแปรปรวนของชุดจำลองระบบ FWS-SF ทั้ง 4 ชุด โดยทดสอบด้วยวิธี One way ANOVA สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

$H_0$  : ค่าเฉลี่ยของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่มีอัตราส่วนของ FWS-SF ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 เท่ากัน หรือระบบ FWS-SF ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 ไม่แตกต่างกัน

$H_1$  : ค่าเฉลี่ยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่มีอัตราส่วนของ FWS-SF ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 เท่ากัน หรือระบบ FWS-SF ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 แตกต่างกัน

จะปฏิเสธ  $H_0$  หรือยอมรับ  $H_1$  เมื่อ Sig. < 0.05

3.4.3 การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี Student T-test

**ตารางที่ 3.4** วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้า - ออกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียเข้า - ออก	วิธีการวิเคราะห์
COD (mg/l)	Close Reflux Method
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	Azide Modification Method
TS(mg/L)	Evaporation
TSS (mg/l)	Filtration/Evaporation
TDS (mg/L)	Filtration/Evaporation
TKN (mg/l)	TKN method
Ammonia (mg/l)	Nesslerization
TP (mg/l)	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method

## บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย

### 4.1 การหาระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

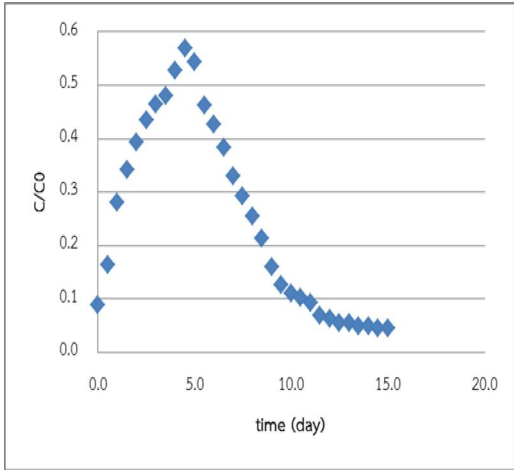
จากการศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมของชุดการทดลองทั้ง 4 ชุด ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์  $0.125 \text{ m}^3/\text{d}$  โดยใช้ สมการ (3.4) – (3.7) ผลการศึกษาสารติดตามดังสรุปในตารางที่ 4-1 และจากรูปที่ 4-1 (ผลการศึกษาและรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลา จากผลการศึกษาได้เส้นกราฟเป็นรูประฆังคว่ำ โดยในช่วงแรกความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของคลอไรด์ใกล้เคียงความเข้มข้นเริ่มต้นโดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันทั้ง 4 ชุดจำลอง

ตารางที่ 4-1 ผลการศึกษาสารติดตาม

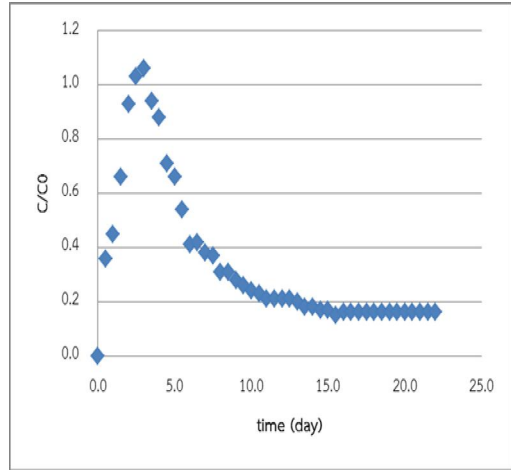
Q ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	ชุดจำลองที่	T (hr)		ค่าการกระจาย การไหล (d)
		$T_{\text{theory}}$	$T_{\text{mean}}$	
0.125	1	10.31	6.86	0.498
	2	9.84	7.49	0.224
	3	9.46	7.30	0.223
	4	10.77	7.30	0.223

จากตารางที่ 4.1 เมื่อนำผลการศึกษามาคำนวณหาระยะเวลากักเก็บน้ำ โดยใช้สมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า  $T_{\text{mean}}$  และจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เพื่อหาค่า  $T_{\text{theory}}$  ของระบบจำลองทั้ง 4 ชุด รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก พบว่า ค่า  $T_{\text{theory}}$  ของทั้ง 2 ระบบ มีค่ามากกว่า  $T_{\text{mean}}$  ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ เท่ากับ  $0.125 \text{ m}^3/\text{d}$  เนื่องจากเกิดการไหลของคลอไรด์เฉพาะส่วนที่เป็นน้ำเหนือผิวดิน การไหลของคลอไรด์ในชั้นดินมีน้อย เนื่องมาจากการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง ความหนาแน่นของพืชและรากพืช มีผลต่อการไหลของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ ซึ่งเมื่อต้นไม้ที่ปลูกในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โตและมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ระยะเวลาเก็บกักของระบบ  $T_{\text{mean}}$  จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี  $T_{\text{theory}}$  มากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าการกระจายการไหล (d) ของชุดจำลองที่ 2-4 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 0.223 – 0.224 ส่วนในชุดจำลองที่ 1 มีค่าการกระจายการไหล เท่ากับ 0.498 (รายละเอียดการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ข) จากผลการคำนวณพบว่าค่าการกระจายการไหลมีลักษณะการไหลแบบกระจัดกระจายค่อนข้างมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของน้ำ ทำให้เกิดการกวนภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Metcalf and Eddy, 2003)

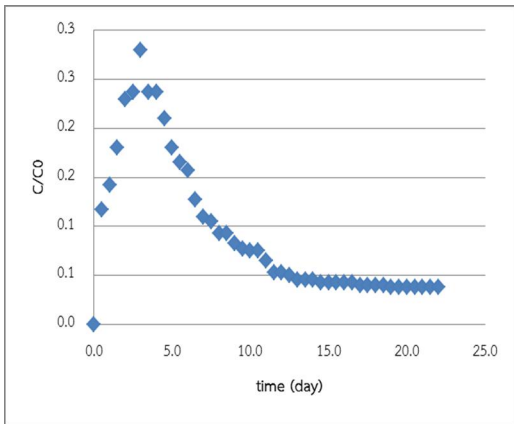




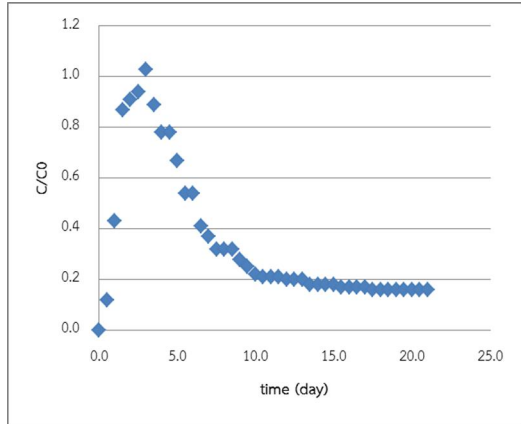
ก. ชุดจำลองที่ 1



ข. ชุดจำลองที่ 2



ค. ชุดจำลองที่ 3



ง.ชุดจำลองที่ 4

รูปที่ 4-1 ผลการศึกษาสารติดตาม ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

#### 4.2 ผลการศึกษาการเดินระบบโดยน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์

หลังจากต้นกึ่งกาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมในแต่ละบ่อ สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมแล้ว จึงนำน้ำเสียสังเคราะห์ชุมชนเข้าสู่ระบบ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากแต่ละชุดการทดลอง เพื่อตรวจวัด ค่าซีโอดี (COD) และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด เป็นระยะเวลาประมาณ 60 วัน จนกระทั่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady stage) ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ทั้ง 4 ชุด อยู่ในช่วงร้อยละ 96 และประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ P อยู่ในช่วงร้อยละ 86.54- 99.50 โดยพบว่าชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งมีอัตราส่วนของ FWS-SF เท่ากับ 1:4 มีร้อยละของประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดถึงร้อยละ 99.50 ผลที่ได้สนับสนุนการศึกษาของ Drizo et al. (1997; 1999) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานโดยใช้น้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 98 -100 และ Koiv et al. (2010) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยมี hydrated oil shale ash เป็นตัวกลาง ในน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบ 0.13-17.0 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำชะขยะมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเข้าระบบ 3.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส เท่ากับร้อยละ 99 โดยฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับแคลเซียมเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างพืช จุลินทรีย์และตัวกลาง มีกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาการดูดซับและตกตะกอนกับองค์ประกอบของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวกลาง จากนั้นฟอสฟอรัสจะถูกพืชและจุลินทรีย์นำฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์เนื้อเยื่อ ตัวกลางจึงเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Johnsson et al., 1997; Zhu et al., 1997; Adam et al., 2007)

ตารางที่ 4-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

No.	FWS:SF	COD			TP		
		Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% Removal	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	% Removal
1	1:1	2680 ± 742.96	87.68 ± 75.80	96.73	3.64 ± 2.31	0.37 ± 0.33	89.84
2	1:2		93.09 ± 96.02	96.53		0.44 ± 0.64	87.91
3	1:4		95.64 ± 97.86	96.43		0.0183 ± 0.022	99.50
4	2:1		103.64 ± 110.62	96.13		0.49 ± 0.48	86.54

#### 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียจริง โดยนำน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ระบบบ่อผึ่ง (Oxidation pond) ของมหาวิทยาลัย เข้าสู่ถังสูงเพื่อเก็บน้ำก่อนเข้าสู่ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 บ่อ ทำการเดินระบบและเก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากระบบ เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุด เป็นระยะเวลาประมาณ 4 เดือน(ช่วงระยะการเก็บตัวอย่าง) ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

จากตารางที่ 4-3 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD ของทั้ง 4 ชุดจำลองมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 82.42-85.40 โดยชุดจำลองที่ 3 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:4 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด ร้อยละ 85.40 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ ระบบ SF มีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด COD และชุดจำลองที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 2:1 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ต่ำสุด ร้อยละ 82.42 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป BOD พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยประสิทธิภาพการบำบัด BOD อยู่ในช่วงร้อยละ 88.71-94.32 มีค่าสูงสุดในชุดจำลองที่ 3 และต่ำสุดในชุดจำลองที่ 4 เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมของทั้ง 4 ชุดจำลอง เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ทำการเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ระหว่าง แบบ FWS และ แบบ SF เพื่อบำบัดน้ำเสียจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเช่นเดียวกับงานวิจัยในครั้งนี้ พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์  $0.10-0.13 \text{ m}^3/\text{d}$  โดยบ่อมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ  $1.0 \times 3.0 \times 0.8$  เมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุดในรูป COD และ BOD เท่ากับร้อยละ  $64.1 \pm 13.1$  และ  $75.9 \pm 14.3$  ตามลำดับ สำหรับระบบแบบ FWS และเท่ากับร้อยละ  $63.7 \pm 13.9$  และ  $74.4 \pm 16.5$  ตามลำดับ (รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4-4) สำหรับระบบแบบ SF จากการศึกษาของ Van de Moortel et al (2009) ได้ทำการศึกษเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวดินพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD เท่ากับร้อยละ  $60.8 \pm 7.1$  และ  $88.1 \pm 3.5$  ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการศึกษานี้ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD สูงกว่าแบบเดี่ยวทั้งแบบ FWS และ SF ในสภาวะแวดล้อมและการออกแบบระบบที่ใกล้เคียงกัน และจะเห็นได้ว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป BOD สูงกว่า COD และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของทั้ง 4 ชุดจำลอง พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของระบบ SF มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งในรูป COD และ BOD ไปทดสอบความแปรปรวนทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค) ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ศุวศา กานตวนิชกูร (2544) และ สุชาติา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และไหลใต้ผิวดินจะถูกกำจัดโดย

จุลินทรีย์ทั้งแบบที่ใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืชและที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ จึงทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ใกล้เคียงกัน และจากการศึกษาของ Lim et al (2001) และจากงานวิจัยอื่นๆ สรุปว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านผิวดิน (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดินแบบแนวนอน HSSF (Horizontal subsurface flow system) ในการบำบัดสารอินทรีย์ ในรูป BOD Schulz et al, (2003) ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาเทราท์โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF พบว่าถ้าความเข้มข้นของ COD ที่เข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีค่าต่ำ เมื่ออัตราการรับน้ำชลศาสตร์เพิ่มขึ้น (1 3 และ 5 m<sup>3</sup>/d.m<sup>2</sup>) จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD เนื่องจากระบบมีระยะเวลาเก็บกักน้อย อีกทั้ง COD เกิดการตกตะกอนและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์บริเวณรากพืช และในการศึกษาคั้งนี้มีอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.125 m<sup>3</sup>/d และมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 25.85-85.87 kg COD/(ha.d) ในขณะที่ผลการศึกษาของ Li et al (2008) พบว่าระบบ SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ดีกว่าระบบ FWS และงานวิจัยของ Naz et al (2009) สนับสนุนผลการศึกษาของ Li et al (2008) โดยพบว่าระบบ HSSF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป Total COD สูงกว่า FWS โดยเฉพาะในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง จะเห็นได้ว่ามีผลงานวิจัยที่ได้ผลค่อนข้างแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น ชนิดตัวกลาง ชนิดของพืช เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาคั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนที่แตกต่างกันระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และ SF ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD

#### 4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ในรูปทีเคเอ็น (TKN)

จากตารางที่ 4-5 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด TKN ของทั้ง 4 ชุดจำลอง มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 92.91-95.66 โดยชุดจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:1 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TKN สูงสุด ร้อยละ 95.66 และชุดจำลองที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 2:1 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TKN ต่ำสุด ร้อยละ 92.91 ) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งทำการเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ระหว่าง แบบ FWS และ แบบ SF พบว่าที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 0.10-0.13 m<sup>3</sup>/d โดยบ่อมีขนาดเท่ากัน มีประสิทธิภาพการบำบัด TKN สูงสุด ของระบบ FWS และ SF เท่ากับร้อยละ 68.5±14.5 และ 75.7±7.5 จะเห็นว่าในการศึกษาคั้งนี้ ประสิทธิภาพการบำบัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ทั้ง 4 บ่อ มีค่าสูงกว่าผลการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัด TKN ไปทดสอบความแปรปรวนทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค) จากการศึกษาของ Lin et al. (2003) และกรมควบคุมมลพิษ (2548) พบว่าในระบบ FWS สามารถรับออกซิเจนได้โดยตรงจากอากาศทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายได้ทั้งแบบใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสาร อินทรีย์ไนโตรเจน เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน แต่ระบบ SF โดยส่วนใหญ่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบดีไนตริฟิเคชัน และจากการศึกษาของ Kadlec and Knight (2006) และ U.S. EPA (2000) พบว่ากลไกหลักของการกำจัดทีเคเอ็น

ตารางที่ 4-3 ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ลักษณะน้ำเสีย	บ่อ (FWS:SF)	ความเข้มข้นน้ำเข้า (mg/L) Mean±SD (Min-max)	ความเข้มข้นน้ำออก (mg/L) Mean±SD (Min-max)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
COD	1 (1:1)	206.08± 62.04 (115.20-324.00)	31.33± 13.57 (2.00-54.00)	84.00
	2 (1:2)		30.63± 15.46 (0.00-60.00)	84.50
	3 (1:4)		28.99± 13.52 (6.00-54.00)	85.40
	4 (2:1)		33.75± 15.16 (6.80-60.00)	82.42
BOD	1 (1:1)	35.73 ± 17.32 (13.50-101.80)	2.94 ± 4.51 (0.00-20.96)	91.62
	2 (1:2)		3.11 ± 7.23 (0.00-38.92)	92.75
	3 (1:4)		1.79± 2.85 (0.00-11.98)	94.32
	4 (2:1)		3.38± 3.30 (0.00-13.10)	88.71

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว จากงานวิจัยของ .  
สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548)

ลักษณะ น้ำเสีย	อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (m <sup>3</sup> /d)					
	0.11		0.13		0.16	
	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย* (%) Mean ± S.D					
	FWS	SF	FWS	SF	FWS	SF
COD	24.9 ± 9.5	50.1 ± 15.7	64.1 ± 13.1	63.7 ± 13.9	62.5 ± 11.1	63.1 ± 16.9
BOD	41.6 ± 18.7	60.8 ± 14.0	75.9 ± 14.3	74.4 ± 16.5	70.6 ± 12.7	71.1 ± 11.2
TSS	61.7 ± 17.5	66.0 ± 19.6	62.5 ± 12.3	68.3 ± 7.2	65.4 ± 17.0	68.9 ± 10.5
TKN	42.4 ± 10.2	58.5 ± 9.9	68.5 ± 14.5	75.7 ± 7.5	66.2 ± 16.7	64.0 ± 12.5
TP	24.1 ± 8.9	69.9 ± 13.7	51.0 ± 11.8	96.3 ± 5.5	22.7 ± 9.7	78.3 ± 2.8

ตารางที่ 4-5 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านเข้า-ออกและประสิทธิภาพการบำบัด TKN และ TP ชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ลักษณะน้ำเสีย	บ่อ (FWS:SF)	ความเข้มข้นน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่ำสุด-สูงสุด)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่ำสุด-สูงสุด)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
TKN	1 (1:1)	48.51± 14.66 (14.99-73.91)	2.03 ± 2.16 (0.00 - 8.99)	95.66
	2 (1:2)		2.01± 2.80 (0.00-13.51)	94.95
	3 (1:4)		2.15 ± 3.55 (0.00 - 18.02)	94.77
	4 (2:1)		3.30 ± 2.25 (0.00 - 9.75)	92.91
TP	1 (1:1)	4.89± 1.81 (2.07-8.35)	0.23± 0.36 (0.00-1.24)	96.37
	2 (1:2)		0.39± 0.47 (0.00-2.19)	90.82
	3 (1:4)		0.28± 0.28 (0.00-0.90)	94.02
	4 (2:1)		0.53± 0.54 (0.00-1.81)	88.92

เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ประสิทธิภาพการกำจัด TKN ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยทั่วไปที่ใช้ตัวกลางคือ ทราย กรวด และดิน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 27.00-60.30 (Zurita et al., 2009) และจากการศึกษาของ Van de Moortel et al (2009) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน ในรูป Total N ร้อยละ 36.6±3.3 และ 96.7±1.9 ตามลำดับ และ ไนโตรเจน ในรูป NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ร้อยละ 99.7±0.1 และ 99.1±0.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบ SF จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้ดีกว่าระบบ FWS โดยในช่วงแรกระบบ SF จะสามารถบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนได้เร็วกว่าระบบ FWS และจากการศึกษาของ Greenway et al., (2002) และ Akratos et al (2007) พบว่ากลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน จะเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนมาเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน และเกิดการย่อยสลายจากแอมโมเนียไนโตรเจนมาเป็นไนเตรตโดย Nitrifying bacteria ในสภาวะที่มีออกซิเจน จากนั้นไนเตรตจะถูกพืชดูดซึมขึ้นไปใช้ในการเจริญเติบโต (Gottschall et al., 2007) พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ

ประติษฐ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของ Nitrifying bacteria โดยการส่งผ่านออกซิเจนผ่านทางบริเวณรากไปยังจุลินทรีย์ที่อาศัยในรูพรุนของตัวกลาง เรียกว่า Root zone effect ซึ่งจะทำให้สภาวะของระบบมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณออกซิเจนในระบบกว่าร้อยละ 90 และมีการส่งผ่านออกซิเจนมาทางรากของพืช (Reddy et al., 1989; Brix, 1997; Schulz, 2006; Kadleck and Knight, 2006)

#### 4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4-5 แสดงผลการศึกษาศักยภาพการกำจัด TP ของทั้ง 4 ชุดจำลอง มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 88.92-96.37 โดยชุดจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:1 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TP สูงสุด ร้อยละ 96.37 และชุดจำลองที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 2:1 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TP ต่ำสุด ร้อยละ 88.92 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งทำการเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบเดี่ยว ระหว่าง แบบ FWS และ แบบ SF พบว่าที่อัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์  $0.10-0.13 \text{ m}^3/\text{d}$  โดยบ่อมีขนาดเท่ากัน มีประสิทธิภาพการบำบัด TP สูงสุดของระบบ FWS และ SF เท่ากับร้อยละ  $51.0 \pm 11.8$  และ  $96.3 \pm 5.5$  ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Van de Moortel et al (2009) ได้ทำการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบ FWS และแบบ SF พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ในรูป Total P ร้อยละ  $36.0 \pm 5.0$  และ  $71.1 \pm 7.7$  ตามลำดับ จะเห็นว่าในการศึกษาครั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัด TP ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบผสม ทั้ง 4 บ่อ มีค่าสูงกว่าผลการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบเดี่ยว แบบ FWS มาก แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบเดี่ยว แบบ SF ที่อัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกัน จากผลการศึกษาที่ผ่านมาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ทั่วไปจะมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 20-60 (Vymaza et al., 2007; Kotti et al., 2010) และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัด TP ไปทดสอบความแปรปรวนทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค) และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัด TP ไปทดสอบความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี Student T-test พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TP ของชุดจำลองที่ 1 และชุดจำลองที่ 4 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ ค-2 ในภาคผนวก ค) กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ตัวกลาง โดยการตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดซับ (Daizo et al., 1997; 1999; Forbes et al., 2004; Bubba et al., 2003) และจากการศึกษาของ Lin et al. (2002) พบว่าระบบ SF จะมีกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสเอาไว้ที่ตัวกลางและพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังพบว่าพืชที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในเนื้อเยื่อสูงจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์สูงด้วย (Drizo et al., 1999) จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบผสม ชุดที่ 4 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสน้อยที่สุด เป็นบ่อที่มีปริมาตรของตัวกลางน้อยที่สุด เท่ากับ  $1.50 \text{ m}^3$  (ตารางที่ 4-6) ขณะที่ บ่อที่ 1, 2 และ 3 มีปริมาตรของตัวกลางใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง  $1.65-1.92 \text{ m}^3$  ทำให้อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของทั้ง 3 ชุดจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน

**ตารางที่ 4.6** สรุปรูปขนาดพื้นที่ และปริมาตรตัวกลางในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ชุดจำลอง	FWS:SF	Area (m <sup>2</sup> )				Media (m <sup>3</sup> )				Total Volume (m <sup>3</sup> )
		FWS (LxW)		SF(LxW)		FWS (HxLxW)		SF(HxLxW)		
1	1:1	1.5x1.0	1.5	1.5x1.0	1.5	0.4x1.5x1.0	0.6	0.7x1.5x1.0	1.05	1.65
2	1:2	1.0x1.0	1.0	2.0x1.0	2.0	0.4x1.0x1.0	0.4	0.7x2.0x1.0	1.40	1.80
3	1:4	0.6x1.0	0.6	2.4x1.0	2.4	0.4x0.6x1.0	0.24	0.7x2.4x1.0	1.68	1.92
4	2:1	2.0x1.0	2.0	1.0x1.0	1.0	0.4x2.0x1.0	0.8	0.7x1.0x1.0	0.70	1.50

**ตารางที่ 4-7** ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็ง ที่ผ่านเข้า-ออกชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

ลักษณะน้ำเสีย	บ่อ (FWS:SF)	ความเข้มข้นน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่ำสุด-สูงสุด)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่ำสุด-สูงสุด)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
TS	1 (1:1)	619.08± 133.60 (262.67-734.67)	341.97 ± 152.58 (122.00 - 712.00)	45.23
	2 (1:2)		368.41 ± 118.11 (122.00 - 540.00)	38.69
	3 (1:4)		378.47 ± 4114.19 (143.00-674.00)	36.75
	4 (2:1)		358.42 ± 155.32 (124.67-671.33)	42.03
TSS	1 (1:1)	199.21± 157.96 (71.11-732.00)	8.34± 10.06 (0.00-37.78)	93.42
	2 (1:2)		9.19± 9.20 (0.00-28.67)	93.51
	3 (1:4)		10.07± 9.85 (0.00-42.00)	91.94
	4 (2:1)		9.37± 10.29 (0.00-40.00)	93.36
TDS	1 (1:1)	463.65± 133.60 (262.67-734.67)	372.29 ± 152.58 (122.00-712.00)	12.92
	2 (1:2)		357.15 ± 118.11 (122.00-540.00)	15.76
	3 (1:4)		379.48 ± 114.19 (143.00-674.00)	11.41
	4 (2:1)		370.23 ± 155.32 (124.67-671.33)	14.81



#### 4.3.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็ง

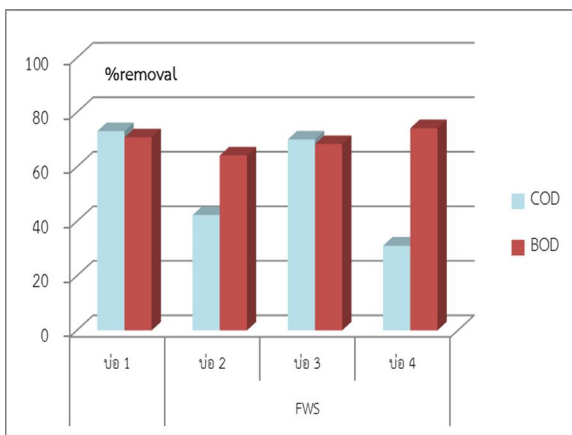
จากตารางที่ 4-7 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งในรูป TS, TSS และ TDS ของทั้ง 4 ชุดจำลอง มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 36.75-42.03, 91.94-93.51 และ 11.41-15.76 ตามลำดับ โดยชุดจำลองที่ 2 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:2 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TSS และ TDS สูงสุด และชุดจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:1 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัด TS สูงสุด ร้อยละ 88.92 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งทำการเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ระหว่าง แบบ FWS และ แบบ SF พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูป TSS สูงสุดของระบบ FWS และ SF เท่ากับร้อยละ 68.5±14.5 และ 75.7±7.5 ตามลำดับ และจากผลการศึกษาของ Gomez et al (2001) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF แบบไหลในแนวนอน และแนวตั้งโดยต่อแบบอนุกรม มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย SS ร้อยละ 96±6 และ 96±8 ตามลำดับ จะเห็นว่าในการศึกษาครั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัด TSS ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ทั้ง 4 บ่อ มีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยวมาก อาจเนื่องมาจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว แบบ FWS สามารถตกตะกอนของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยลงบนพื้นบ่อ โดยการสะสมของเศษตะกอนรวมทั้งซากพืชชั้นนั้นจะพบอยู่ในชั้นตัวกลาง และจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามรากพืชจะช่วยย่อยสลายตะกอนเหล่านี้ (จิตติมา เชื้อกุล, 2545) จากการศึกษาของ Vymazal (1998) พบว่ากลไกการกรองเป็นกระบวนการกำจัดของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลาง โดยของแข็งที่มีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กจะกรองผ่านชั้นตัวกลาง และรากพืชที่สานกันอยู่ในดิน ซึ่ง Kadlec and Knight (1996) กล่าวว่าชั้นของตัวกลางจะทำหน้าที่กรองและลดความเร็วของน้ำ ทำให้ของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยไม่ถูกพัดพาไปกับน้ำได้ ดังนั้นจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว แบบ FWS และแบบ SF สามารถเกิดการตกตะกอนและการกรองได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูป TS, TSS และ TDS ของทั้ง 4 ชุดการทดลองไปทดสอบความแปรปรวนทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค)

#### 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ FWS และระบบ SF ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม และ อัตราการกำจัดต่อพื้นที่

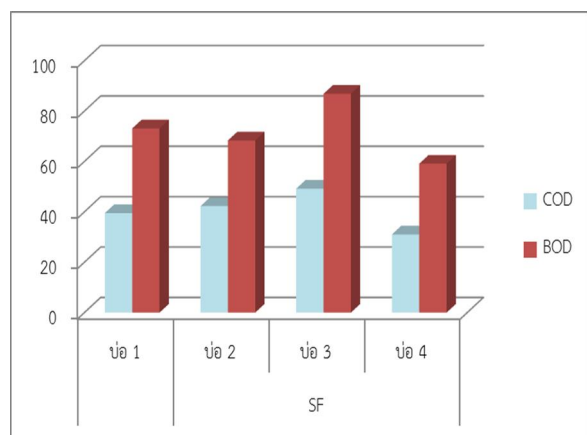
จากการเก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออก จากระบบ FWS และ SF ของแต่ละชุดการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดของ FWS และ SF ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4-8, 4-9 และนำไปกราฟเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนในแต่ละระบบ (รูปที่ 4-2, 4-4 และ 4-6) และเมื่อนำข้อมูลพื้นที่ของชุดจำลองแต่ละชุด(ข้อมูลตั้งสรุปในตารางที่ 4-6) ข้อมูลลักษณะน้ำเข้า-ออก และประสิทธิภาพการบำบัดของชุดการทดลองทั้ง 4 ชุด เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆต่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4-12 มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 การกำจัดสารอินทรีย์

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ดังแสดงในตารางที่ 4-8 ถึง 4-11 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟในรูปที่ 4-2 จะเห็นได้ชัดว่าสำหรับ FWS ของชุดจำลองบ่อที่ 1 และ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD สูงที่สุด ขณะที่ระบบ SF ของชุดจำลองบ่อที่ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้ง 2 รูปสูงสุด โดยระบบ FWS จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ดีกว่าระบบ SF ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป BOD มีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน และเมื่อนำไปพิจารณาพร้อมกับข้อมูลอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ต่อพื้นที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมของชุดจำลองทั้ง 4 ชุด พบว่าอยู่ในช่วง 71.86-73.85 และ 13.49-14.15 kg/d.ha ตามลำดับ (ตารางที่ 4-12) และเมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ ในรูป BOD ของระบบ FWS อยู่ในช่วง 3.95 kg BOD/d.ha และระบบ SF อยู่ในช่วง 2.98 kg BOD/d.ha จะเห็นว่าผลการศึกษาอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมในงานวิจัยครั้งนี้ มีค่ามากกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยวทั้งระบบ FWS และ ระบบ SF ดังนั้นถ้าหากนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมไปสร้างเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ จะสามารถลดพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างระบบได้ประมาณ 3 เท่าของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว และเมื่อนำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระบบ FWS:SF ในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมกับอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของระบบ SF จะช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดต่อพื้นที่มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม บ่อที่ 3 (อัตราส่วนระหว่าง FWS:SF = 1:4) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด



(ก) การกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ FWS



(ข) การกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ SF

รูปที่ 4-2 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

**ตารางที่ 4-8** ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 1  
อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:1

Parameter	C <sub>in</sub> (mg/l)	ชุดการทดลองที่ 1					
		FWS		SF		Total	
		C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด
COD	206.08	52.65	73.08	31.33	39.52	31.33	84
BOD	35.73	9.32	70.82	2.94	73.14	2.94	91.62
TKN	48.51	9.14	80.59	2.03	74.55	2.03	95.66
TP	4.89	2.26	49.43	0.23	88.83	0.23	96.37
TS	619.08	366.64	36.92	341.97	25.64	341.97	45.23
TSS	199.21	13	90.11	8.34	56.28	8.34	9342
TDS	463.65	364.47	15.8	372.29	0.00	372.29	12.92

**ตารางที่ 4-9** ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม ที่ 2  
อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:2

Parameter	C <sub>in</sub> (mg/l)	ชุดการทดลองที่ 2					
		FWS		SF		Total	
		C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการ กำจัด
COD	206.08	53.84	42.3	30.63	42.3	30.63	84.5
BOD	35.73	11.81	64.15	3.11	68.36	3.11	92.75
TKN	48.51	12.1	74.3	2.01	81.86	2.01	94.05
TP	4.89	2.51	43.69	0.39	84.35	0.39	90.82
TS	619.08	391.84	30.9	368.41	14.56	368.41	38.69
TSS	199.21	23	85.49	9.19	66.65	9.19	93.51
TDS	463.65	372.77	13.96	357.15	8.64	357.15	15.76

ตารางที่ 4-10 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดการทดลองที่ 3 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:4

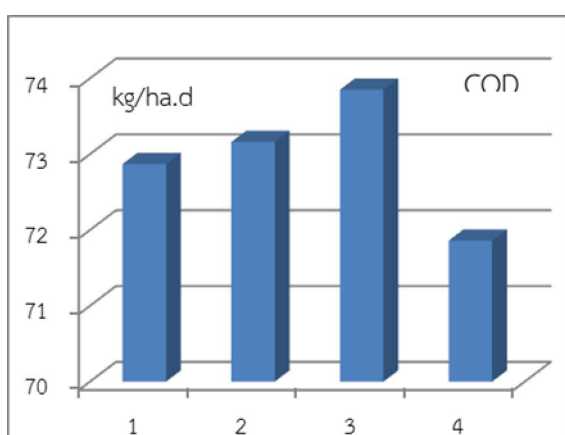
Parameter	C <sub>in</sub> (mg/l)	ชุดการทดลองที่ 3					
		FWS		SF		Total	
		C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด
COD	206.08	57.11	70.05	28.99	49.24	28.99	85.4
BOD	35.73	10.06	68.36	1.79	86.89	1.79	94.32
TKN	48.51	13.84	71.84	2.15	80.95	2.15	94.77
TP	4.89	2.62	45.19	0.28	89.6	0.28	94.02
TS	619.08	416.6	26.99	378.47	16.61	378.47	36.75
TSS	199.21	22.25	84.96	10.07	61.1	10.07	91.94
TDS	463.65	391.39	10.14	379.48	11.07	379.48	11.41

ตารางที่ 4-11 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของชุดการทดลองที่ 4 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 2:1

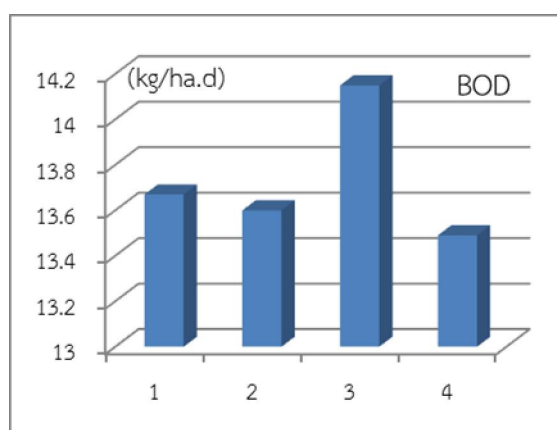
Parameter	C <sub>in</sub> (mg/l)	ชุดการทดลองที่ 4					
		FWS		SF		Total	
		C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด	C <sub>out</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพการกำจัด
COD	206.08	51.64	31.05	33.75	31.05	33.75	82.42
BOD	35.73	7.8	74.16	3.38	59.16	3.38	88.71
TKN	48.51	5.87	86.36	3.3	60.65	3.3	94.39
TP	4.89	1.49	67.64	0.53	67.64	0.53	88.92
TS	619.08	383.7	35.24	358.42	19.83	358.42	42.03
TSS	199.21	18.53	87.67	9.37	54.97	9.37	93.36
TDS	463.65	387.6	9.76	370.23	11.64	370.23	14.18

ตารางที่ 4-12 อัตราการกำจัดต่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม (kg/d.ha)

บ่อ FWS:SF	อัตราการกำจัด (kg/d.ha)						
	COD	BOD	TKN	TP	TS	TSS	TDS
1:1	72.87	13.67	19.38	1.68	115.55	79.59	38.1
1:2	73.16	13.6	19.39	1.33	104.53	79.24	44.41
1:4	73.85	14.15	19.33	1.22	100.33	78.87	35.1
2:1	71.86	13.49	18.85	1.20	108.7	79.16	38.96



(ก) ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD



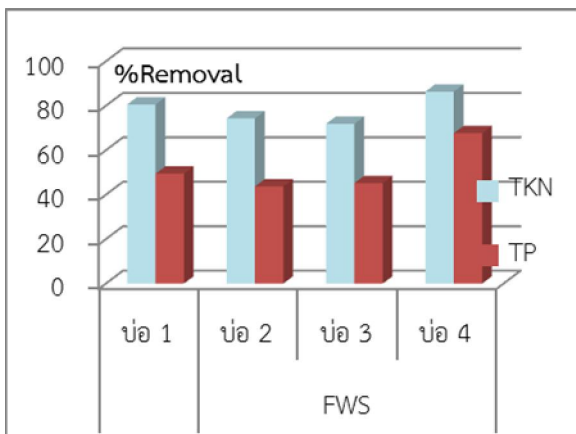
(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป BOD

รูปที่ 4-3 อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD (ก) และรูป BOD (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

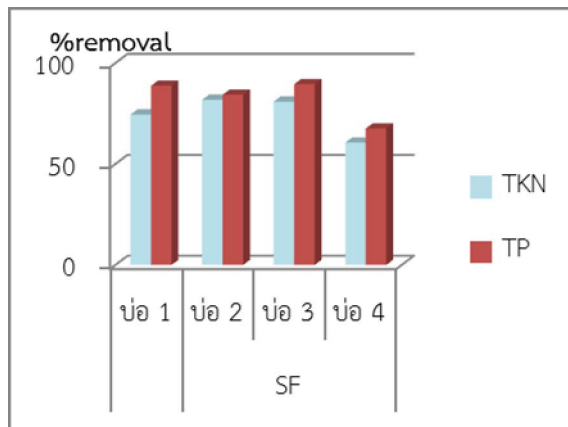
#### 4.4.2 การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ดังแสดงในตารางที่ 4-8 และ 4-9 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟในรูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าสำหรับ FWS เมื่อลดอัตราส่วนของระบบ FWS มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด TKN และ TP ลดลง โดยบ่อที่ 4 มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งผลที่ได้ตรงกันข้ามกับระบบ SF พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด TKN และ TP มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของระบบ SF โดยบ่อที่ 3 มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดและต่ำสุดในบ่อที่ 4 และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปพิจารณาร่วมกับข้อมูลอัตราการกำจัด TKN และ TP ต่อพื้นที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมของชุดจำลองทั้ง 4 ชุด พบว่าอยู่ในช่วง 18.85-19.39 และ 1.82-1.94 kg/d.ha ตามลำดับ(ตารางที่ 4-12) และเมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งมีอัตราการกำจัดไนโตรเจน ในรูป TKN ของระบบ FWS และระบบ SF อยู่ในช่วง 10.69 และ 11.81 kg/d.ha และอัตราการกำจัดไนโตรเจน ในรูป TP ของระบบ FWS และระบบ SF อยู่ในช่วง 4.64 และ 8.76 อัตราการกำจัดไนโตรเจน ในรูป TKN ของระบบ FWS และ

ระบบ SF อยู่ในช่วง 10.69 และ 8.76 kg/d.haตามลำดับ และจากผลการศึกษาของ Van de Moortel et al (2009) พบว่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสต่อพื้นที่ของระบบ FWS และระบบ SF เท่ากับ 0.14 และ 0.09 kg/d.ha จะเห็นว่าผลการศึกษาอัตราการกำจัดไนโตรเจนต่อพื้นที่ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมในงานวิจัยครั้งนี้ มีค่ามากกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยวทั้งระบบ FWS และ ระบบ SF ประมาณ 2 เท่า แต่มีค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสต่อพื้นที่ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมน้อยกว่าผลการศึกษาของ สุขาดา ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) แต่มีค่ามากกว่าที่พบจากผลงานวิจัยของ ของ Van de Moortel et al (2009) และเมื่อนำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระบบ FWS:SF ในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมกับอัตราการกำจัด TKN และ TP ต่อพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าบ่อที่ 1 และบ่อที่ 3 มีค่าสูงสุด

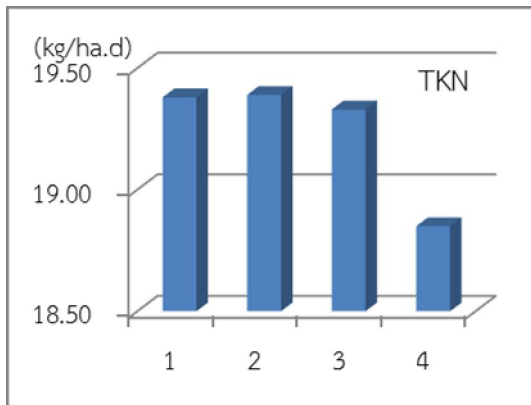


(ก) การกำจัด TKN และ TP ของระบบ FWS

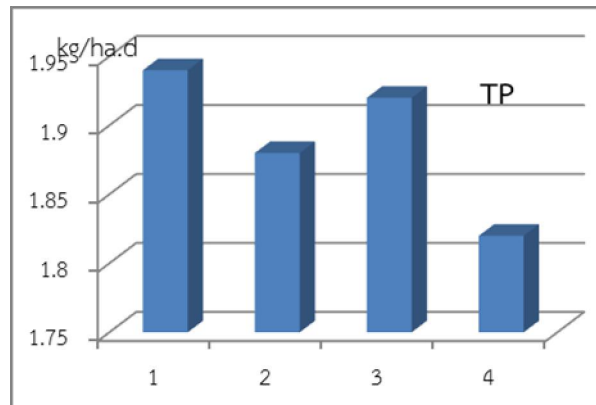


(ข) การกำจัดTKN และ TP ของระบบ SF

รูปที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม



(ก) ประสิทธิภาพการกำจัด TKN

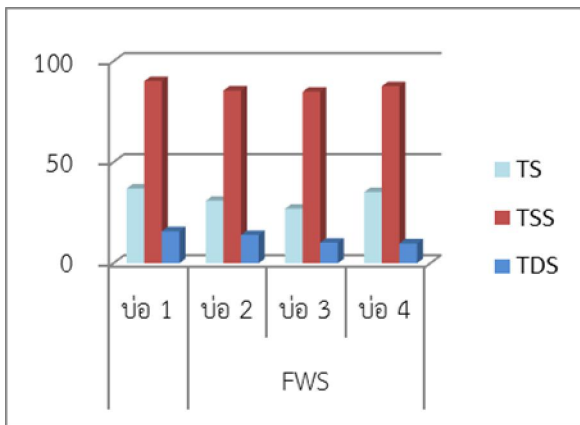


(ข) ประสิทธิภาพการกำจัด TP

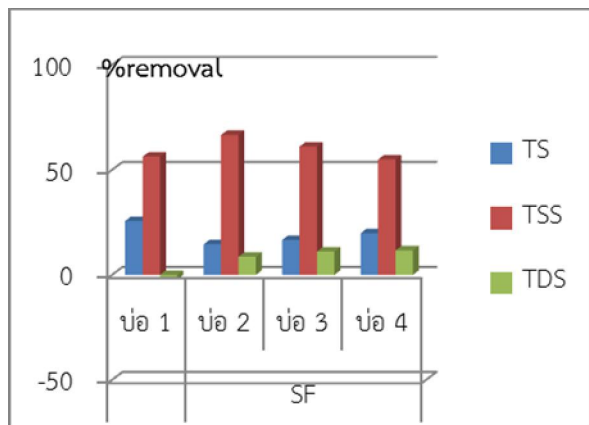
รูปที่ 4-5 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN (ก) และ TP (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

#### 4.4.3 การกำจัดของแข็ง

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดของแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4-8 และ 4-9 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟในรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าระบบ FWS มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในรูปต่างๆ ใกล้เคียงกันในทุกชุดจำลอง โดยจะมีประสิทธิภาพกำจัดของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอย TSS ค่อนข้างสูงกว่าค่าของแข็งในรูปอื่นๆ และผลการศึกษาของระบบ SF จะเป็นไปได้ในแนวโน้มเดียวกับ FWS และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปพิจารณาพร้อมกับข้อมูลอัตราการกำจัดของแข็งต่อพื้นที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมของชุดจำลองทั้ง 4 ชุด พบว่ามีค่า TS อยู่ในช่วง 100.33-115.55 kg/d.ha สำหรับค่า TSS อยู่ในช่วง 78.87-79.59 kg/d.ha ตามลำดับ และสำหรับค่า TDS อยู่ในช่วง 35.1-44.41 kg/d.ha (ตารางที่ 4-12) และเมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์ (2548) ซึ่งมีอัตราการกำจัดของแข็ง ในรูป TSS ของระบบ FWS และระบบ SF เท่ากับ 3.47 และ 2.16 kg/d.ha ตามลำดับ จะเห็นว่าผลการศึกษาอัตราการกำจัดของแข็งต่อพื้นที่ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมในงานวิจัยครั้งนี้ มีค่ามากกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยวทั้งระบบ FWS และ ระบบ SF และเมื่อนำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระบบ FWS:SF ในบ่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมกับอัตราการกำจัดของแข็งต่อพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าบ่อที่ 2 มีค่าสูงสุด

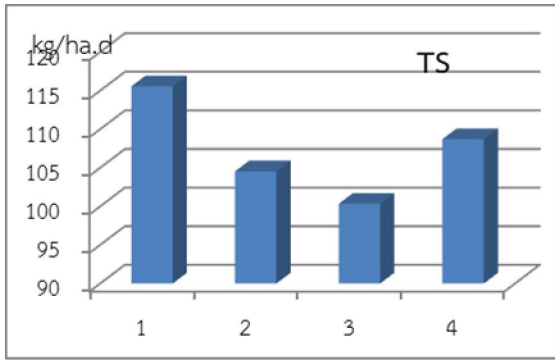


(ก) การกำจัดของแข็งของระบบ FWS

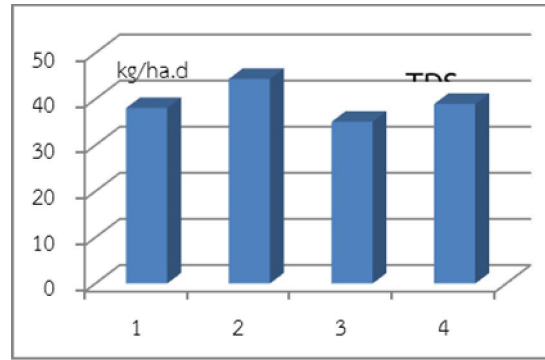


(ข) การกำจัดของแข็งของระบบ SF

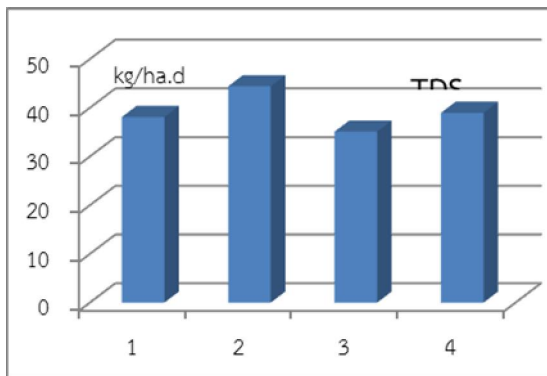
รูปที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบ FWS (ก) และระบบ SF (ข) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม



(ก) ของแข็งทั้งหมด (Total Solid)



(ข) ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended solids)



(ค) ค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved solid)

รูปที่ 4-7 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง ในรูป TS (ก) TSS (ข) และ TDS (ค) ของชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

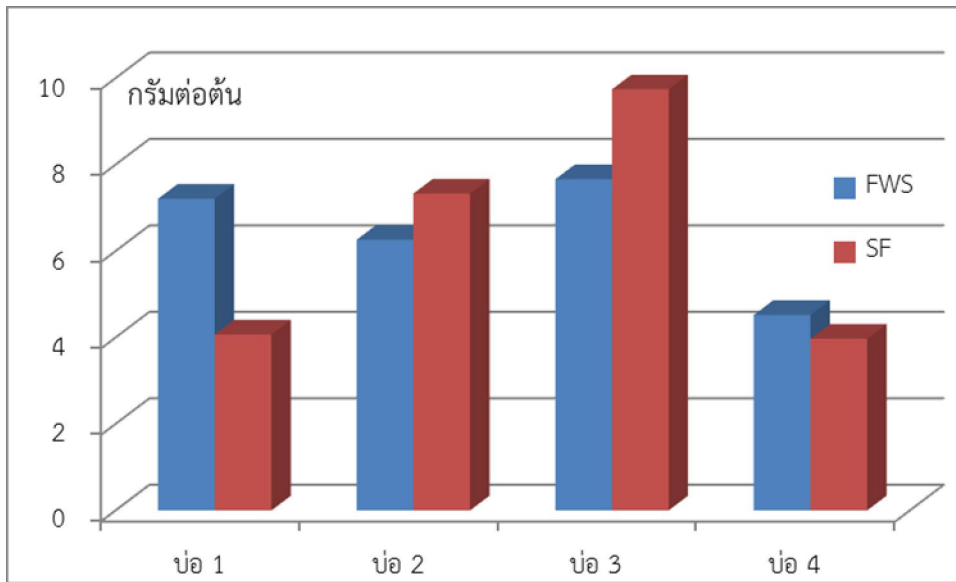
#### 4.5 การศึกษาน้ำหนักแห้งของพืชในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

จากข้อมูลน้ำหนักแห้งของต้นกกกรังกา ดังแสดงในตารางที่ 4-13 เมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างชุดจำลองของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุด พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของต้นกกกรังกาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมบ่อที่ 3 มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ย เท่ากับ 7.76 กรัม/ต้น สำหรับบ่อ FWS และ 12.84 กรัม/ต้น สำหรับบ่อ SF จากการศึกษาของ กฤตธี วงศ์สถิตย์ (2544) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของพืชจะขึ้นอยู่กับ การดูดซึมธาตุอาหารต่างๆ ของพืช และ ธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล (2539) กล่าวว่าพืชจำพวกกกเป็นพืชที่มี ประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสไปใช้ได้ดี เนื่องจากรากของมันลึกถึง 1.5 เมตร หรือมากกว่า และมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน เช่น ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นต้น และจาก การศึกษาของ กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ (2544) และ สมพล เปรมปรามอมร และศุภา กานตวนิชกูร (2548) พบว่าพื้นที่ของตัวกลางสามารถสะสมธาตุอาหารต่างๆ ไว้ในดินได้ดี และพืชสามารถดูดซึมไปใช้ในการ เจริญเติบโตของใบ ลำต้น และเซลล์ของพืชได้เต็มที่ ดังนั้นอัตราการเจริญเติบโตของต้นกกกรังกาในพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณดูดซึมธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าชุด การทดลองบ่อที่ 3 เป็นบ่อที่มีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด และมีประสิทธิภาพในการกำจัด TKN, TP และ TSS ค่อนข้างสูง



ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาน้ำหนักแห้งของต้นกกกรังกาในแต่ละชุดการทดลอง

บ่อ		น้ำหนักสด (กรัมต่อต้น)				น้ำหนักแห้ง (กรัมต่อต้น)			
		ลำต้น	ราก	ใบ	รวม	ลำต้น	ราก	ใบ	รวม
1:1	FWS	32.47	2.25	7.12	41.84	5.03	0.09	2.09	7.21
	SF	23.45	2.07	3.31	28.83	3.46	0.01	0.60	4.07
1:2	FWS	22.33	1.16	10.01	33.50	2.86	0.14	3.26	6.26
	SF	22.60	1.31	9.16	33.07	4.26	0.10	2.97	7.33
1:4	FWS	21.79	1.43	12.84	36.06	4.94	0.52	2.20	7.66
	SF	20.01	1.74	14.20	35.95	5.47	0.60	3.67	9.74
2:1	FWS	21.03	1.99	6.67	29.69	2.03	0.55	1.94	4.52
	SF	19.40	0.89	8.54	28.83	1.22	0.64	2.11	3.97



รูปที่ 4-8 น้ำหนักแห้งของต้นกกกรังกาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาวิจัย

1. พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD BOD TKN และ TSS สูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบเดี่ยว ทั้งระบบแบบ FWS และ SF
2. เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD BOD TKN และ TSS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
3. เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสมทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด TP มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพบว่าชุดทดลองบ่อที่ 4 มีความแตกต่างกับชุดทดลองบ่อที่ 1, 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
4. เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่าง FWS:SF ที่เหมาะสมในด้านประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆโดยรวม พบว่าชุดจำลองบ่อที่ 3 ซึ่งมีสัดส่วนระหว่าง FWS:SF เท่ากับ 1:4 มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับชุมชนขนาดเล็ก
5. เมื่อนำผลการศึกษาไปคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD, BOD, TKN และ TSS ต่อพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม พบว่ามีค่าอัตราการกำจัดต่อพื้นที่สูงกว่าระบบแบบเดี่ยว ดังนั้นถ้านำไปใช้ในการออกแบบสร้างระบบจะช่วยให้การประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบได้มากยิ่งขึ้น
6. ผลการศึกษาน้ำหนักแห้งของต้นกกกรังกาของชุดจำลองทั้ง 4 ชุด สนับสนุนผลการศึกษาด้านประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2546). เทคนิคการบำบัดน้ำเสีย  
บางวิธีการนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่  
ที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมควบคุมมลพิษและสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. (2548).การศึกษาโครงการพัฒนาแนวทางด้าน  
เทคนิคและสาธิตระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ [ออนไลน์].ได้จาก:[http://www.pcd.go.th/  
public\\_Publications/print\\_water.cfm](http://www.pcd.go.th/public_Publications/print_water.cfm).
- กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. (2544). การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิทยาศาสตร์  
สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กิตติ เอกอำพน และสำอาน หอมชื่น .(2529). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้กาก  
กลมและผักตบวา รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ครั้งที่ 24 สาขาสิ่งแวดล้อม 27-29 มกราคม 2529 หน้า 20-1/20-18
- กฤตธี วงศ์สถิตย์. (2544). การบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2547). วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี:เอส.อาร์.  
พรินติ้ง แมสโปรดักส์.
- จิตตมา เชื้อกุล. (2545). การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ต้นพุทธรักษาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและ  
สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปัทมา วิทยากร. (2533). ดิน: แหล่งอาหารของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฉัญลักษณ์ แต่บรรพกุล. (2539).ประสิทธิภาพของดีปลีน้ำ Potamogeton malaianus และสาหร่าย  
หางกระรอก Hydrilla verticillata ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศา  
ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ราชบัณฑิตยสถาน. (2538). อนุกรมวิธานพืช อักษร ก. ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
กรุงเทพฯ: เพื่อนพิมพ์.
- ศุวศา กานตวนิชกูร. (2538). การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ. เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- ศุวศา กานตวนิชกูร. (2544). รายงานการวิจัยเรื่อง การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined constructed wetland ในเขตอากาศร้อน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- สมพล เปรมปรามอมร และ ศุวศา กานตวนิชกูร. (2548). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพืชต่างชนิดในระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวในแนวตั้ง. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. 20.(1). 49-60.
- สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. (2548). การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุรัชย์ มัชฉาชีพ. (2538). วัชพืชในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: แพร่พิทยา.
- Adam, Kinga., Krogstad, Tore., Vrale, Lasse, Sovik, Kristine, Anne., and Jenssen, D., Peter. (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.
- Brix, H., (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. Water Science Technology. 35:11-17.
- Brix, H., Arias, C.A., Del Bubba, M. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. Water Science and Technology. 44. 47-54.
- 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.
- Cameron, K., Madramootoo, C., Crolla, A. and Kinsley, C. (2003). Pollutant removal from municipal sewage lagoon effluents with a free-surface wetland. Water Research. 37. 2803-2812.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F. and Thoennesen, M. (2002). Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. Ecological Engineering.18 (3) 317-325.
- 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.
- Crites, R.W. (1994). Small and Decentralized Wastewater Management Systems, WCB-McGraw-Hill, NY.
- Demir, A., Gunay, A. and Debik, E. (2002). Ammonium removal from aqueous solution by ion-exchange using packed bed natural zeolite. Water SA. 28 (12). 329-335.
- 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.
- Forbes, M.G., Dickson, K.R., Golden, T.D., Hudak, P. and Doyle, R.D. (2004). Dissolved phosphorus retention of light-weight expanded shale and masonry sand used in subsurface flow treatment wetlands. Environmental Science and technology. 38. 892-898.
- Gomez C. R., Suárez, M.L. and Vidal-Abarca, M.R. (2001). The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain. Ecological Engineering. 16.(4) 501-517.
- Greenway, M., Dale, P., 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.
- Grüneberg, B., Kern, J. (2001). Phosphorus retention capacity of iron-ore and blast furnace slag in subsurface flow constructed wetlands. Water Science and Technology. 44. 69-75.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Iamchaturapatr, Janjit., Yia, Won, Su. and Rhee, Seong, Jae. (2007) Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland. Ecological Engineering. 29.287–293.
- 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.
- Kadlec, R.H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. Ecological Engineering. 35. 159-174.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (2006). Treatment Wetland. Boca Raton: Lewis Press.
- Koiv, M., Liira, M., Mander, U., Mõttlepp, R., Vohla, C. and Kirsimaäe, 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.
- 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.
- Levenspiel, O. (1972). Chemical reaction engineering (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Wiley.
- Li, L., Li, Y., Biswas, D.K., Nian, Y. and Jiang, G. (2008). Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water : Evidence from Taihu Lake of China. Bioresour Tech. 99. 1656-1663.
- Lim, P.E., Wong, T.E., Lim, D.V. (2001). Oxygen demand, nitrogen and copper removal by free-water-surface and subsurface-flow constructed wetlands under tropical conditions. Environmental International. 26. 425-431.
- Lin, Y-F., Jing, S-R., Lee, D-Y. and Wang, T-W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. Aquaculture. 209. 169-184.
- Lin, Y-F., Jing, S-R. and Lee, D-R. (2003). The potential use of constructed wetland in a recirculating aquaculture system for shrimp culture. International Journal of Environment and Pollution. 123.107-113.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Maine, M.A., Sune, N., Hadad, H. (2006). Nutrient and metal removal in a constructed wetland for wastewater treatment from a metallurgic industry. Ecological Engineering. 26. 341-347.
- Maine, M.A., Sune, N., Hadad, H., Sánchez, G., Bonetto, C. (2009). Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. Journal of Environmental Management. 90. 355-363.
- Mantovi P., Marmiroli M., Maestri E., Tagliavini S., Piccinini S. and Marmiroli, N. (2003). Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. Bioresource Technology. 88. 85-94.
- Metcalf and Eddy. (2003). Wastewater engineering, treatment and reuse (4<sup>th</sup> ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Moortel, A.M.K., Rousseau, D.P.L., Tack, F.M.G. and Pauw, N.D. (2009). A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetland for treatment of combined sewer overflows: A greenhouse experiment. Ecological Engineering. 35. 175-183.
- Naz, Muhsin. Uyanik, Sinan. Yesilnacar, M.Irfan. and Sahinkaya, E. (2009). Side-by side comparison of horizontal subsurface flow and free water surface flow constructed wetlands and artificial neural network(ANN) modelling, Ecological Engineering. 35. 1255-1263.
- Ojstršek, A., Fakin, D. and Vrhovšek, D. (2007). Residual dye bath purification using a system of constructed wetland. Dyes and Pigments. 74. (3). 503-507.
- Pimpan, P., Jindal, R. (2009). Mathematical modeling of cadmium removal in free water surface constructed wetlands. Journal of Hazardous Materials. 163. 1322-1331.
- Poggi-Varaldo, H.M., Gutiérrez-Saravia, A., Fernández-Villagómez, G., Martínez-Pereda, P., Rinderknecht-Seijas, N. (2002). A full-scale system with wetlands for slaughterhouse wastewater treatment. In: Nehring, K.W., Brauning, S.E. (Eds.), Wetlands and Remediation II. Battelle Press. Columbus. 213-223.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Polprasert C. (2004). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Principles and Practices. Dev Eco. AIT, Thailand.
- Prochaska C.A. and A.I. Zouboulis (2006). Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. Ecological Engineering. 26 .293–303.
- 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.
- Reed, R.C., Middlebrooks, E.J. and Crites, R.W. (1988). Natural Systems for Waste Management and Treatment. New York: McGraw-Hill.
- Rottiers André, Boeije Geert, Corstanje Ronald, Decraene Katrien, C. J. Feijtel Tom, Matthijs Eddy and Schowanek Diederik .(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.
- Sakadevan, K., Bavor, H.J. (1998). Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. Water Research. 32. 393-399.
- Schulz, C., Gelbrecht, J., Rennert, B. (2003). Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. Aquaculture. 217. 207-221.
- Scholz, M., (2006). Wetland Systems to Control Urban Runoff. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Steiner, G.R. and Freeman, R.J.Jr. (1989). Configuration and substrate design considerations for constructed wetlands wastewater treatment. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural. Michigan: Lewis.
- Summerfelt, S.T., Adler, P.R., Glenn, D.M. and Kretschmann R.N. (1999). Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. Aquaculture Engineering. 19. 81-92.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Van de Moortel, Annelies.M.K., Rousseau, Diederik.P.L., Tack, Filip M.G. (2009). A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflow: A greenhouse experiment. Ecological Engineering. 35. 175-183.
- 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. and Kropfelova, L. (2007). Removal of organics in constructed wetlands horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Sci Total Environ*, oi:10.1016/j.scitenv.2008.08.032.
- U.S.EPA. (1993). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat; 17 Case studies. EPA/832/R-93/005, Washington, DC.
- U.S. EPA. (2000). Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment. Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- 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 De J. and Belmont, B.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  
รายละเอียดผลการศึกษาระดับติดตาม

ตารางที่ ก-1 ผลการศึกษาสารติดตามของชุดการทดลองที่ 1 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:1

time (hr)	Time (d), ti	$\Delta ti$	$\Delta ti$ (d)	ml AgNO <sub>3</sub>	NaCl (mg/L), C	C/C <sub>0</sub> = Ci	Ci $\Delta ti$	tiCi $\Delta ti$	ti <sup>2</sup> Ci $\Delta ti$
0.0	0.0	0	0.00	3.57	89.14	0.1	0.0	0.0	0.0
12.0	0.5	12.0	0.50	6.60	164.95	0.2	0.1	0.0	11.9
24.0	1.0	12.0	0.50	11.2	279.91	0.3	0.1	0.1	80.6
36.0	1.5	12.0	0.50	13.7	342.39	0.3	0.2	0.3	221.9
48.0	2.0	12.0	0.50	15.7	392.38	0.4	0.2	0.4	452.0
60.0	2.5	16.8	0.70	17.4	434.87	0.4	0.3	0.8	1095.9
72.0	3.0	19.2	0.80	18.6	464.86	0.5	0.4	1.1	1927.9
84.0	3.5	21.6	0.90	19.2	479.85	0.5	0.4	1.5	3047.2
96.0	4.0	24.0	1.00	21.1	528.09	0.5	0.5	2.1	4866.8
108.0	4.5	26.4	1.10	22.7	568.07	0.6	0.6	2.8	7288.6
120.0	5.0	28.8	1.20	21.7	542.33	0.5	0.7	3.3	9371.5
132.0	5.5	31.2	1.30	18.5	462.36	0.5	0.6	3.3	10472.9
144.0	6.0	33.6	1.40	17.1	427.37	0.4	0.6	3.6	12406.6
156.0	6.5	36.0	1.50	15.3	382.38	0.4	0.6	3.7	13958.5
168.0	7.0	38.4	1.60	13.2	329.90	0.3	0.5	3.7	14897.7
180.0	7.5	40.8	1.70	11.7	292.41	0.3	0.5	3.7	16105.9
192.0	8.0	43.2	1.80	10.2	254.92	0.3	0.5	3.7	16915.3
204.0	8.5	45.6	1.90	8.5	212.43	0.2	0.4	3.4	16797.3
216.0	9.0	48.0	2.00	6.4	159.95	0.2	0.3	2.9	14925.3
228.0	9.5	50.4	2.10	5.1	127.46	0.1	0.3	2.5	13914.4
240.0	10.0	52.8	2.20	4.4	109.97	0.1	0.2	2.4	13934.9
252.0	10.5	55.2	2.30	4.1	102.47	0.1	0.2	2.5	14966.4
264.0	11.0	57.6	2.40	3.7	92.47	0.1	0.2	2.4	15467.7
276.0	11.5	60.0	2.50	2.8	69.98	0.1	0.2	2.0	13326.7
288.0	12.0	62.4	2.60	2.5	62.48	0.1	0.2	1.9	13474.2
300.0	12.5	64.8	2.70	2.2	54.98	0.1	0.1	1.9	13360.9
312.0	13.0	67.2	2.80	2.2	54.98	0.1	0.2	2.0	14986.3
324.0	13.5	69.6	2.90	2.0	49.98	0.0	0.1	2.0	15216.8
336.0	14.0	72.0	3.00	2.0	49.98	0.0	0.1	2.1	16929.2
348.0	14.5	74.4	3.10	1.8	44.99	0.0	0.1	2.0	16888.8
360.0	15.0	76.8	3.20	1.8	44.99	0.0	0.1	2.2	18656.6
sum							9.67	66.36	76.03

ตารางที่ ก-2 ผลการศึกษาสารติดตามของชุดการทดลองที่ 2 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:2

time (hr)	Time (d), ti	$\Delta ti$	$\Delta ti$ (d)	ml AgNO <sub>3</sub>	NaCl (mg/L), C	C/C <sub>0</sub> = Ci	Ci $\Delta ti$	tiCi $\Delta ti$	ti <sup>2</sup> Ci $\Delta ti$
0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0
12.0	0.5	12.0	0.5	3.6	719.78	0.4	0.18	0.09	0.0
24.0	1.0	12.0	0.5	4.5	899.72	0.4	0.22	0.22	0.2
36.0	1.5	12.0	0.5	6.6	1,319.59	0.7	0.33	0.49	0.7
48.0	2.0	12.0	0.5	9.3	1,859.42	0.9	0.46	0.93	1.9
60.0	2.5	12.0	0.5	10.3	2,059.36	1.0	0.51	1.29	3.2
72.0	3.0	12.0	0.5	10.6	2,119.34	1.1	0.53	1.59	4.8
84.0	3.5	12.0	0.5	9.4	1,879.42	0.9	0.47	1.64	5.8
96.0	4.0	12.0	0.5	8.8	1,759.45	0.9	0.44	1.76	7.0
108.0	4.5	12.0	0.5	7.1	1,419.56	0.7	0.35	1.60	7.2
120.0	5.0	12.0	0.5	6.6	1,319.59	0.7	0.33	1.65	8.2
132.0	5.5	12.0	0.5	5.4	1,079.67	0.5	0.27	1.48	8.2
144.0	6.0	12.0	0.5	4.1	819.75	0.4	0.20	1.23	7.4
156.0	6.5	12.0	0.5	4.2	839.74	0.4	0.21	1.36	8.9
168.0	7.0	12.0	0.5	3.8	759.76	0.4	0.19	1.33	9.3
180.0	7.5	12.0	0.5	3.7	739.77	0.4	0.18	1.39	10.4
192.0	8.0	12.0	0.5	3.1	619.81	0.3	0.15	1.24	9.9
204.0	8.5	12.0	0.5	3.1	619.81	0.3	0.15	1.32	11.2
216.0	9.0	12.0	0.5	2.8	559.83	0.3	0.14	1.26	11.3
228.0	9.5	12.0	0.5	2.6	519.84	0.3	0.13	1.23	11.7
240.0	10.0	12.0	0.5	2.4	479.85	0.2	0.12	1.20	12.0
252.0	10.5	12.0	0.5	2.3	459.86	0.2	0.11	1.21	12.7
264.0	11.0	12.0	0.5	2.1	419.87	0.2	0.10	1.15	12.7
276.0	11.5	12.0	0.5	2.1	419.87	0.2	0.10	1.21	13.9
288.0	12.0	12.0	0.5	2.1	419.87	0.2	0.10	1.26	15.1
300.0	12.5	12.0	0.5	2.1	419.87	0.2	0.10	1.31	16.4
312.0	13.0	12.0	0.5	2.0	399.88	0.2	0.10	1.30	16.9
324.0	13.5	12.0	0.5	1.8	359.89	0.2	0.09	1.21	16.4
336.0	14.0	12.0	0.5	1.8	359.89	0.2	0.09	1.26	17.6
348.0	14.5	12.0	0.5	1.7	339.89	0.2	0.08	1.23	17.9
360.0	15.0	12.0	0.5	1.7	339.89	0.2	0.08	1.27	19.1
372.0	15.5	12.0	0.5	1.5	299.91	0.1	0.07	1.16	18.0
384.0	16.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.28	20.5
396.0	16.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.32	21.8
408.0	17.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.36	23.1
420.0	17.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.40	24.5
432.0	18.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.44	25.9
444.0	18.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.48	27.4
456.0	19.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.52	28.9
468.0	19.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.56	30.4
480.0	20.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.60	32.0
492.0	20.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.64	33.6
504.0	21.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.68	35.3
516.0	21.5	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.72	37.0
528.0	22.0	12.0	0.5	1.6	319.90	0.2	0.08	1.76	38.7
						sum	7.70	57.65	65.35

ตารางที่ ก-3 ผลการศึกษาสารติดตามของชุดการทดลองที่ 3 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 1:4

time (hr)	Time (d), ti	$\Delta ti$	$\Delta ti$ (d)	ml AgNO <sub>3</sub>	NaCl (mg/L), C	$C/C_0 = Ci$	$Ci\Delta ti$	$tiCi\Delta ti$	$ti^2Ci\Delta ti$
0.0	0.0	0	0	0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.0
12.0	0.5	12.0	0.5	4.7	117.46	0.1	0.06	0.0	0.0
24.0	1.0	12.0	0.5	5.7	142.46	0.1	0.07	0.1	0.1
36.0	1.5	12.0	0.5	7.2	179.94	0.2	0.09	0.1	0.2
48.0	2.0	12.0	0.5	9.2	229.93	0.2	0.11	0.2	0.5
60.0	2.5	12.0	0.5	9.5	237.43	0.2	0.12	0.3	0.7
72.0	3.0	12.0	0.5	11.2	279.91	0.3	0.14	0.4	1.3
84.0	3.5	12.0	0.5	9.5	237.43	0.2	0.12	0.4	1.5
96.0	4.0	12.0	0.5	9.5	237.43	0.2	0.12	0.5	1.9
108.0	4.5	12.0	0.5	8.4	209.93	0.2	0.10	0.5	2.1
120.0	5.0	12.0	0.5	7.2	179.94	0.2	0.09	0.4	2.2
132.0	5.5	12.0	0.5	6.6	164.95	0.2	0.08	0.5	2.5
144.0	6.0	12.0	0.5	6.3	157.45	0.2	0.08	0.5	2.8
156.0	6.5	12.0	0.5	5.1	127.46	0.1	0.06	0.4	2.7
168.0	7.0	12.0	0.5	4.4	109.97	0.1	0.05	0.4	2.7
180.0	7.5	12.0	0.5	4.2	104.97	0.1	0.05	0.4	3.0
192.0	8.0	12.0	0.5	3.7	92.47	0.1	0.05	0.4	3.0
204.0	8.5	12.0	0.5	3.7	92.47	0.1	0.05	0.4	3.3
216.0	9.0	12.0	0.5	3.3	82.47	0.1	0.04	0.4	3.3
228.0	9.5	12.0	0.5	3.1	77.48	0.1	0.04	0.4	3.5
240.0	10.0	12.0	0.5	3	74.98	0.1	0.04	0.4	3.7
252.0	10.5	12.0	0.5	3	74.98	0.1	0.04	0.4	4.1
264.0	11.0	12.0	0.5	2.6	64.98	0.1	0.03	0.4	3.9
276.0	11.5	12.0	0.5	2.1	52.48	0.1	0.03	0.3	3.5
288.0	12.0	12.0	0.5	2.1	52.48	0.1	0.03	0.3	3.8
300.0	12.5	12.0	0.5	2	49.98	0.0	0.02	0.3	3.9
312.0	13.0	12.0	0.5	1.8	44.99	0.0	0.02	0.3	3.8
324.0	13.5	12.0	0.5	1.8	44.99	0.0	0.02	0.3	4.1
336.0	14.0	12.0	0.5	1.8	44.99	0.0	0.02	0.3	4.4
348.0	14.5	12.0	0.5	1.7	42.49	0.0	0.02	0.3	4.5
360.0	15.0	12.0	0.5	1.7	42.49	0.0	0.02	0.3	4.8
372.0	15.5	12.0	0.5	1.7	42.49	0.0	0.02	0.3	5.1
384.0	16.0	12.0	0.5	1.7	42.49	0.0	0.02	0.3	5.4
396.0	16.5	12.0	0.5	1.7	42.49	0.0	0.02	0.4	5.8
408.0	17.0	12.0	0.5	1.6	39.99	0.0	0.02	0.3	5.8
420.0	17.5	12.0	0.5	1.6	39.99	0.0	0.02	0.3	6.1
432.0	18.0	12.0	0.5	1.6	39.99	0.0	0.02	0.4	6.5
444.0	18.5	12.0	0.5	1.6	39.99	0.0	0.02	0.4	6.8
456.0	19.0	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	6.8
468.0	19.5	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	7.1
480.0	20.0	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	7.5
492.0	20.5	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	7.9
504.0	21.0	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	8.3
516.0	21.5	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	8.7
528.0	22.0	12.0	0.5	1.5	37.49	0.0	0.02	0.4	9.1
						sum	2.10	15.34	17.44

ตารางที่ ก-4 ผลการศึกษาสารติดตามของชุดการทดลองที่ 4 อัตราส่วน FWS:SF เท่ากับ 2:1

time (hr)	Time (d), ti	$\Delta ti$	$\Delta ti$ (d)	ml AgNO <sub>3</sub>	NaCl (mg/L), C	C/C <sub>0</sub> = Ci	Ci $\Delta ti$	tiCi $\Delta ti$	ti <sup>2</sup> Ci $\Delta ti$
0.0	0.0	0	0	0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
12.0	0.5	12.0	0.5	1.2	119.96	0.1	0.1	0.0	0.0
24.0	1.0	12.0	0.5	4.3	429.87	0.4	0.2	0.2	0.2
36.0	1.5	12.0	0.5	8.7	869.73	0.9	0.4	0.7	1.0
48.0	2.0	12.0	0.5	9.1	909.72	0.9	0.5	0.9	1.8
60.0	2.5	12.0	0.5	9.4	939.71	0.9	0.5	1.2	2.9
72.0	3.0	12.0	0.5	10.3	1,029.68	1.0	0.5	1.5	4.6
84.0	3.5	12.0	0.5	8.9	889.72	0.9	0.4	1.6	5.4
96.0	4.0	12.0	0.5	7.8	779.76	0.8	0.4	1.6	6.2
108.0	4.5	12.0	0.5	7.8	779.76	0.8	0.4	1.8	7.9
120.0	5.0	12.0	0.5	6.7	669.79	0.7	0.3	1.7	8.4
132.0	5.5	12.0	0.5	5.4	539.83	0.5	0.3	1.5	8.2
144.0	6.0	12.0	0.5	5.4	539.83	0.5	0.3	1.6	9.7
156.0	6.5	12.0	0.5	4.1	409.87	0.4	0.2	1.3	8.7
168.0	7.0	12.0	0.5	3.7	369.89	0.4	0.2	1.3	9.1
180.0	7.5	12.0	0.5	3.2	319.90	0.3	0.2	1.2	9.0
192.0	8.0	12.0	0.5	3.2	319.90	0.3	0.2	1.3	10.2
204.0	8.5	12.0	0.5	3.2	319.90	0.3	0.2	1.4	11.6
216.0	9.0	12.0	0.5	2.8	279.91	0.3	0.1	1.3	11.3
228.0	9.5	12.0	0.5	2.5	249.92	0.2	0.1	1.2	11.3
240.0	10.0	12.0	0.5	2.2	219.93	0.2	0.1	1.1	11.0
252.0	10.5	12.0	0.5	2.1	209.93	0.2	0.1	1.1	11.6
264.0	11.0	12.0	0.5	2.1	209.93	0.2	0.1	1.2	12.7
276.0	11.5	12.0	0.5	2.1	209.93	0.2	0.1	1.2	13.9
288.0	12.0	12.0	0.5	2.0	199.94	0.2	0.1	1.2	14.4
300.0	12.5	12.0	0.5	2.0	199.94	0.2	0.1	1.2	15.6
312.0	13.0	12.0	0.5	2.0	199.94	0.2	0.1	1.3	16.9
324.0	13.5	12.0	0.5	1.8	179.94	0.2	0.1	1.2	16.4
336.0	14.0	12.0	0.5	1.8	179.94	0.2	0.1	1.3	17.6
348.0	14.5	12.0	0.5	1.8	179.94	0.2	0.1	1.3	18.9
360.0	15.0	12.0	0.5	1.8	179.94	0.2	0.1	1.3	20.2
372.0	15.5	12.0	0.5	1.7	169.95	0.2	0.1	1.3	20.4
384.0	16.0	12.0	0.5	1.7	169.95	0.2	0.1	1.4	21.8
396.0	16.5	12.0	0.5	1.7	169.95	0.2	0.1	1.4	23.1
408.0	17.0	12.0	0.5	1.7	169.95	0.2	0.1	1.4	24.6
420.0	17.5	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.4	24.5
432.0	18.0	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.4	25.9
444.0	18.5	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.5	27.4
456.0	19.0	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.5	28.9
468.0	19.5	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.6	30.4
480.0	20.0	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.6	32.0
492.0	20.5	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.6	33.6
504.0	21.0	12.0	0.5	1.6	159.95	0.2	0.1	1.7	35.3
						sum	7.45	54.37	61.82

ภาคผนวก ข

รายละเอียดการคำนวณระยะเวลาเก็บกักของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม

หาค่า  $T_{\text{theory}}$

บ่อ 1

FWS

$$Q = \frac{LW[d_n n + d_w]}{t}$$

$$t = \frac{1.5 \times 1 [(0.4 \times 0.47) + (0.3)]}{0.125}$$

$$t = 5.86 \text{ วัน}$$

SF

$$Q = \frac{LWd_w n}{t}$$

$$t = \frac{1.5 \times 1 [0.70 \times 0.53]}{0.125}$$

$$t = 4.45 \text{ วัน}$$

ดังนั้น  $T_{\text{theory}}$  ของบ่อ 1 มีค่าเท่ากับ 10.31 วัน

Tracer study

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{66.36}{9.67} = 6.86 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{76.03}{9.67} - (6.86)^2 = 39.19$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{39.19}{(3.62)^2} = 2.99$$

$$d = 0.498$$



บ่อ 2

FWS

$$Q = \frac{LW[d_n n + d_w]}{t}$$
$$t = \frac{1 \times 1[(0.40 \times 0.47) + (0.30)]}{0.125}$$
$$t = 3.90 \text{ วัน}$$

SF

$$Q = \frac{LWd_w n}{t}$$
$$t = \frac{2 \times 1[0.70 \times 0.53]}{0.125}$$
$$t = 5.94 \text{ วัน}$$

ดังนั้น  $T_{\text{theory}}$  ของบ่อ 1 มีค่าเท่ากับ 9.84 วัน

Tracer study

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{57.65}{7.70} = 7.49 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{65.35}{7.70} - (7.49)^2 = 47.61$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{47.61}{(7.49)^2} = 0.85$$

$$d = 0.224$$

บ่อ 3

FWS

$$Q = \frac{LW[d_n n + d_w]}{t}$$

$$t = \frac{0.6 \times 1 [(0.4 \times 0.47) + (0.3)]}{0.125}$$

$$t = 2.34 \text{ วัน}$$

SF

$$Q = \frac{LWd_w n}{t}$$

$$t = \frac{2.4 \times 1 [0.70 \times 0.53]}{0.125}$$

$$t = 7.12 \text{ วัน}$$

ดังนั้น  $T_{\text{theory}}$  ของบ่อ 1 มีค่าเท่ากับ 9.46 วัน

Tracer study

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{15.34}{2.10} = 7.30 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{17.44}{2.10} - (7.30)^2 = 44.98$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{44.98}{(7.30)^2} = 0.84$$

$$d = 0.223$$

บ่อ 4

FWS

$$Q = \frac{LW[d_n n + d_w]}{t}$$

$$t = \frac{2 \times 1[(0.4 \times 0.47) + (0.3)]}{0.125}$$

$$t = 7.80 \text{ วัน}$$

SF

$$Q = \frac{LWd_w n}{t}$$

$$t = \frac{1 \times 1[0.70 \times 0.53]}{0.125}$$

$$t = 2.97 \text{ วัน}$$

ดังนั้น  $T_{\text{theory}}$  ของบ่อ 4 มีค่าเท่ากับ 10.77 วัน

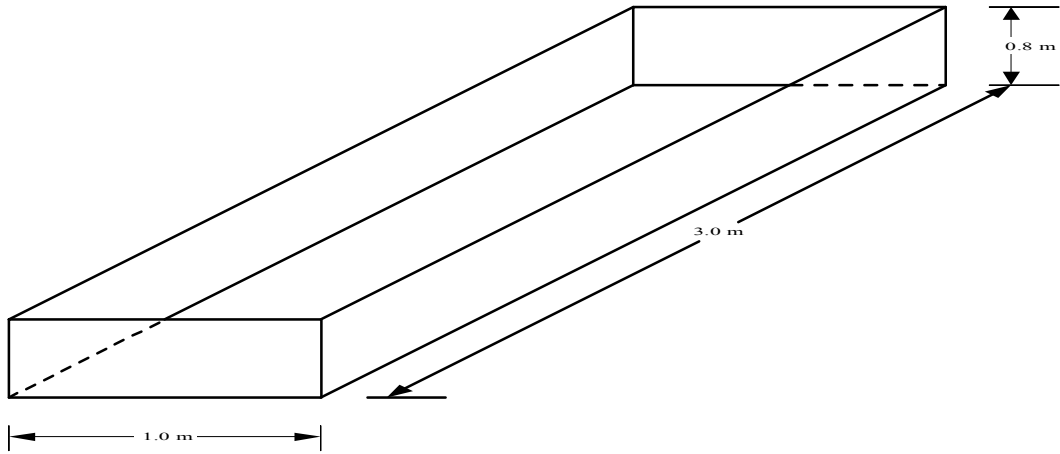
Tracer study

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{54.37}{7.45} = 7.30 \text{ วัน}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{61.82}{7.45} - (7.30)^2 = 44.99$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{44.99}{(7.30)^2} = 0.84$$

$$d = 0.223$$



HLR

$$\text{HLR} = \frac{Q}{A}$$

$$\text{HLR} = \frac{0.125 \text{ m}^3 / \text{d}}{0.7 \times 3 \text{ m}^2} = 0.059 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{-d}$$

ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบค่าทางสถิติ

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบทางสถิติของข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดของชุดจำลอง โดยวิธี One-way ANOVA

**ANOVA**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TKN	Between Groups	25.568	3	8.523	.183	.908
	Within Groups	5402.187	116	46.571		
	Total	5427.755	119			
BOD	Between Groups	505.102	3	168.367	1.303	.277
	Within Groups	14986.42	116	129.193		
	Total	15491.52	119			
TP	Between Groups	986.067	3	328.689	3.575	.016
	Within Groups	10664.77	116	91.938		
	Total	11650.84	119			
TDS	Between Groups	308.118	3	102.706	.053	.984
	Within Groups	224057.8	116	1931.532		
	Total	224365.9	119			
COD	Between Groups	141.256	3	47.085	.647	.586
	Within Groups	8436.515	116	72.729		
	Total	8577.772	119			

**Descriptives**

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
TKN	1.00	30	95.6637	4.48276	.81844	93.9898	97.3376	80.87	100.00
	2.00	30	94.9497	7.85326	1.43380	92.0172	97.8821	62.99	100.00
	3.00	30	94.7657	9.20291	1.68021	91.3292	98.2021	60.00	100.00
	4.00	30	94.3940	4.45195	.81281	92.7316	96.0564	84.52	100.00
	Total	120	94.9433	6.75362	.61652	93.7225	96.1640	60.00	100.00
BOD	1.00	30	91.6167	11.30878	2.06469	87.3939	95.8394	50.00	100.00
	2.00	30	92.7457	10.49255	1.91567	88.8277	96.6637	61.76	100.00
	3.00	30	94.3210	8.74480	1.59657	91.0556	97.5864	61.34	100.00
	4.00	30	88.7077	14.22390	2.59692	83.3964	94.0190	39.35	100.00
	Total	120	91.8478	11.40968	1.04156	89.7854	93.9101	39.35	100.00
TP	1.00	30	96.3687	5.67709	1.03649	94.2488	98.4885	82.89	100.00
	2.00	30	90.8243	12.02315	2.19512	86.3348	95.3139	53.81	100.00
	3.00	30	94.0203	6.36244	1.16162	91.6446	96.3961	78.60	100.00
	4.00	30	88.9240	12.26721	2.23968	84.3433	93.5047	55.09	100.00
	Total	120	92.5343	9.89476	.90326	90.7458	94.3229	53.81	100.00
TDS	1.00	30	12.9220	47.50915	8.67394	-4.8182	30.6622	-100.51	65.47
	2.00	30	15.7577	42.55748	7.76990	-.1336	31.6489	-87.07	71.20
	3.00	30	11.4047	38.80440	7.08468	-3.0851	25.8945	-91.88	66.24
	4.00	30	14.1833	46.39062	8.46973	-3.1392	31.5059	-100.51	76.19
	Total	120	13.5669	43.42151	3.96382	5.7182	21.4157	-100.51	76.19
COD	1.00	30	84.0000	8.03895	1.46771	80.9982	87.0018	65.38	98.94
	2.00	30	84.5020	8.39653	1.53299	81.3667	87.6373	65.38	100.00
	3.00	30	85.4057	7.10994	1.29809	82.7508	88.0606	69.23	96.97
	4.00	30	82.4167	10.25848	1.87293	78.5861	86.2472	50.00	95.28
	Total	120	84.0811	8.49012	.77504	82.5464	85.6157	50.00	100.00

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Student T-test

**Group Statistics**

	GR	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
TP	1.00	30	96.3687	5.67709	1.03649
	4.00	30	88.9240	12.26721	2.23968

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
TP	Equal variances assumed	18.272	.000	3.017	58	.004	7.4447	2.46789	2.50466	12.38468
	Equal variances not assumed			3.017	40.877	.004	7.4447	2.46789	2.46021	12.42912

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของประสิทธิภาพการบำบัดของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (SF)

Multiple Comparisons

TPSF

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	4.47333	5.49526	.882	-11.1166	20.0633
	3	-.77233	5.49526	.999	-16.3623	14.8176
	4	21.18533*	5.49526	.003	5.5954	36.7753
2	1	-4.47333	5.49526	.882	-20.0633	11.1166
	3	-5.24567	5.49526	.823	-20.8356	10.3443
	4	16.71200*	5.49526	.030	1.1221	32.3019
3	1	.77233	5.49526	.999	-14.8176	16.3623
	2	5.24567	5.49526	.823	-10.3443	20.8356
	4	21.95767*	5.49526	.002	6.3677	37.5476
4	1	-21.18533*	5.49526	.003	-36.7753	-5.5954
	2	-16.71200*	5.49526	.030	-32.3019	-1.1221
	3	-21.95767*	5.49526	.002	-37.5476	-6.3677

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ตารางที่ ค-4 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของประสิทธิภาพการบำบัดของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านผิวดิน (FWS)

Multiple Comparisons

TPFWS

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	5.74667	5.47462	.777	-9.7847	21.2780
	3	4.24033	5.47462	.896	-11.2910	19.7717
	4	-14.95067	5.47462	.064	-30.4820	.5807
2	1	-5.74667	5.47462	.777	-21.2780	9.7847
	3	-1.50633	5.47462	.995	-17.0377	14.0250
	4	-20.69733*	5.47462	.004	-36.2287	-5.1660
3	1	-4.24033	5.47462	.896	-19.7717	11.2910
	2	1.50633	5.47462	.995	-14.0250	17.0377
	4	-19.19100*	5.47462	.008	-34.7224	-3.6596
4	1	14.95067	5.47462	.064	-.5807	30.4820
	2	20.69733*	5.47462	.004	5.1660	36.2287
	3	19.19100*	5.47462	.008	3.6596	34.7224

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค-5 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของประสิทธิภาพการบำบัดของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Multiple Comparisons

TPTotal

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	5.54433	2.47572	.177	-1.4792	12.5679
	3	2.34833	2.47572	.825	-4.6752	9.3719
	4	7.44467*	2.47572	.033	.4211	14.4682
2	1	-5.54433	2.47572	.177	-12.5679	1.4792
	3	-3.19600	2.47572	.645	-10.2196	3.8276
	4	1.90033	2.47572	.899	-5.1232	8.9239
3	1	-2.34833	2.47572	.825	-9.3719	4.6752
	2	3.19600	2.47572	.645	-3.8276	10.2196
	4	5.09633	2.47572	.243	-1.9272	12.1199
4	1	-7.44467*	2.47572	.033	-14.4682	-.4211
	2	-1.90033	2.47572	.899	-8.9239	5.1232
	3	-5.09633	2.47572	.243	-12.1199	1.9272

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค-6 ผลการทดสอบความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูลอัตราการกำจัดมลพิษต่อพื้นที่ของชุดจำลอง โดยวิธี One-way ANOVA

**ANOVA**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TKN	Between Groups	25.568	3	8.523	.183	.908
	Within Groups	5402.187	116	46.571		
	Total	5427.755	119			
BOD	Between Groups	505.102	3	168.367	1.303	.277
	Within Groups	14986.42	116	129.193		
	Total	15491.52	119			
TP	Between Groups	986.067	3	328.689	3.575	.016
	Within Groups	10664.77	116	91.938		
	Total	11650.84	119			
TDS	Between Groups	308.118	3	102.706	.053	.984
	Within Groups	224057.8	116	1931.532		
	Total	224365.9	119			
COD	Between Groups	141.256	3	47.085	.647	.586
	Within Groups	8436.515	116	72.729		
	Total	8577.772	119			

**Descriptives**

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	
					Lower Bound	Upper Bound			
TKN	1.00	30	95.6637	4.48276	.81844	93.9898	97.3376	80.87	100.00
	2.00	30	94.9497	7.85326	1.43380	92.0172	97.8821	62.99	100.00
	3.00	30	94.7657	9.20291	1.68021	91.3292	98.2021	60.00	100.00
	4.00	30	94.3940	4.45195	.81281	92.7316	96.0564	84.52	100.00
	Total	120	94.9433	6.75362	.61652	93.7225	96.1640	60.00	100.00
BOD	1.00	30	91.6167	11.30878	2.06469	87.3939	95.8394	50.00	100.00
	2.00	30	92.7457	10.49255	1.91567	88.8277	96.6637	61.76	100.00
	3.00	30	94.3210	8.74480	1.59657	91.0556	97.5864	61.34	100.00
	4.00	30	88.7077	14.22390	2.59692	83.3964	94.0190	39.35	100.00
	Total	120	91.8478	11.40968	1.04156	89.7854	93.9101	39.35	100.00
TP	1.00	30	96.3687	5.67709	1.03649	94.2488	98.4885	82.89	100.00
	2.00	30	90.8243	12.02315	2.19512	86.3348	95.3139	53.81	100.00
	3.00	30	94.0203	6.36244	1.16162	91.6446	96.3961	78.60	100.00
	4.00	30	88.9240	12.26721	2.23968	84.3433	93.5047	55.09	100.00
	Total	120	92.5343	9.89476	.90326	90.7458	94.3229	53.81	100.00
TDS	1.00	30	12.9220	47.50915	8.67394	-4.8182	30.6622	-100.51	65.47
	2.00	30	15.7577	42.55748	7.76990	-.1336	31.6489	-87.07	71.20
	3.00	30	11.4047	38.80440	7.08468	-3.0851	25.8945	-91.88	66.24
	4.00	30	14.1833	46.39062	8.46973	-3.1392	31.5059	-100.51	76.19
	Total	120	13.5669	43.42151	3.96382	5.7182	21.4157	-100.51	76.19
COD	1.00	30	84.0000	8.03895	1.46771	80.9982	87.0018	65.38	98.94
	2.00	30	84.5020	8.39653	1.53299	81.3667	87.6373	65.38	100.00
	3.00	30	85.4057	7.10994	1.29809	82.7508	88.0606	69.23	96.97
	4.00	30	82.4167	10.25848	1.87293	78.5861	86.2472	50.00	95.28
	Total	120	84.0811	8.49012	.77504	82.5464	85.6157	50.00	100.00

ตารางที่ ค-7 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของอัตราการกำจัดมลพิษต่อพื้นที่ของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

Multiple Comparisons

FWSolr

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.78933	.51174	.500	-2.2411	.6625
	3	-2.53833*	.51174	.000	-3.9901	-1.0865
	4	.06333	.51174	.999	-1.3885	1.5151
2	1	.78933	.51174	.500	-.6625	2.2411
	3	-1.74900*	.51174	.011	-3.2008	-.2972
	4	.85267	.51174	.431	-.5991	2.3045
3	1	2.53833*	.51174	.000	1.0865	3.9901
	2	1.74900*	.51174	.011	.2972	3.2008
	4	2.60167*	.51174	.000	1.1499	4.0535
4	1	-.06333	.51174	.999	-1.5151	1.3885
	2	-.85267	.51174	.431	-2.3045	.5991
	3	-2.60167*	.51174	.000	-4.0535	-1.1499

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค-8 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของอัตราการกำจัดมลพิษต่อพื้นที่ของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน

Multiple Comparisons

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	.37000	.18958	.288	-.1678	.9078
	3	.47233	.18958	.108	-.0655	1.0102
	4	.49200	.18958	.087	-.0458	1.0298
2	1	-.37000	.18958	.288	-.9078	.1678
	3	.10233	.18958	.961	-.4355	.6402
	4	.12200	.18958	.937	-.4158	.6598
3	1	-.47233	.18958	.108	-1.0102	.0655
	2	-.10233	.18958	.961	-.6402	.4355
	4	.01967	.18958	1.000	-.5182	.5575
4	1	-.49200	.18958	.087	-1.0298	.0458
	2	-.12200	.18958	.937	-.6598	.4158
	3	-.01967	.18958	1.000	-.5575	.5182

ตารางที่ ค-9 ผลการทดสอบค่าสถิติ โดยใช้วิธี Scheffe ของอัตราการกำจัดมลพิษต่อพื้นที่ของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Multiple Comparisons

Scheffe

(I) Pond	(J) Pond	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	.06933	.18838	.987	-.4651	.6038
	3	.02200	.18838	1.000	-.5124	.5564
	4	.12500	.18838	.932	-.4094	.6594
2	1	-.06933	.18838	.987	-.6038	.4651
	3	-.04733	.18838	.996	-.5818	.4871
	4	.05567	.18838	.993	-.4788	.5901
3	1	-.02200	.18838	1.000	-.5564	.5124
	2	.04733	.18838	.996	-.4871	.5818
	4	.10300	.18838	.960	-.4314	.6374
4	1	-.12500	.18838	.932	-.6594	.4094
	2	-.05567	.18838	.993	-.5901	.4788
	3	-.10300	.18838	.960	-.6374	.4314

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวจรียา ยี่มรัตน์บวร

ที่อยู่ปัจจุบัน 79/2 ถนนนคร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044-224-457

### ประวัติการศึกษา

1990 B.Sc. (Sanitary Science) Mahidol University, Bangkok, Thailand

1994 M.Sc. (Environmental Science) Chulalongkorn University,  
Bangkok, Thailand

2000 M.Sc.(Environmental Chemistry) Kochi University, Japan

2003 Ph.D.(Environmental Technology) Ehime University, Japan