



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์ระบบบึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัวหลวงและกกตั้งกา

Application of Constructed Wetland System for Treating Domestic Wastewater by
Nelumbo nucifera Gaertn and *Cyperus alternifolius* L.

นามผู้วิจัย นางสาวลลิตี ทับทิมทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
(.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล จานุดตมวงศ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....
(.....รองศาสตราจารย์สุภกิจ นนทนันทน์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา.....
(.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr. Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(.....รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ระบบบึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัวหลวงและกกตั้งกา

Application of Constructed Wetland System for Treating Domestic Wastewater by *Nelumbo*
nucifera Gaertn. and *Cyperus Alternifolius* L.

โดย

นางสาวลลิตา ทับทิมทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลลิตี ทับทิมทอง 2553: การประยุกต์ระบบบึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัว
หลวงและกกกลิ้งกา ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D. 86 หน้า

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาความสามารถของกกกลิ้งกาและบัวหลวงในการลดค่า
สารอินทรีย์ ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งทั้งหมด ด้วยระบบบึง
ประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินในแนวนอนร่วมกับระบบไหลผิวดิน โดยใช้ น้ำเสียจากหอพักนิสิต
หญิงและตึกพักบุคลากร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ระบบนี้ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง คือ บ่อทดลองหลัก บ่อควบคุมการทดลอง โดยบ่อควบคุม
จะแบ่งเป็น บ่อปลูกพืชและไม่ปลูกพืช อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าบ่อทดลองหลักเป็น 400 ลิตร
ต่อวัน คิดเป็น ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ $0.35 \text{ ม}^3/\text{วัน-ม}^2$ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าบ่อ
ควบคุมการทดลองเป็น 200 ลิตรต่อวัน คิดเป็น ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ $0.16 \text{ ม}^3/\text{วัน-ม}^2$
โดยทั้ง 3 ชุดการทดลองจะควบคุมระยะเวลาเก็บเท่ากับ 3 วัน ซึ่งทั้ง 3 ชุดการทดลองนี้
ดำเนินการทดลองระบบไปพร้อมกับบ่อควบคุมการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ของทั้ง 3 ชุดการทดลองนั้นมีประสิทธิภาพ
โดยรวมค่อนข้างดี โดยประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีของบ่อทดลองหลัก บ่อควบคุมที่ปลูกพืช
และไม่ปลูกพืช เท่ากับ 94.66, 95.40 และ 94.49 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี
เท่ากับ 85.42, 86.26 และ 83.72 ประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็นเท่ากับ 77.12, 81.25 และ 77.62
ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวม เท่ากับ 64.24, 69 และ 64.95 จากผล
การทดลองพบว่าระบบบ่อควบคุมที่มีพืช ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนบ่อทดลองหลักและบ่อ
ควบคุมให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ใกล้เคียงกันมาก

Lalinee Tubtimtong 2010: Application of Constructed Wetland System for Treating Domestic Wastewater by *Nelumbo nucifera* Gaertn. and *Cyperus Alternifolius* L. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 86 pages.

In this study, the performance of a pilot-scale HSF and FWS constructed wetland in treating domestic wastewater from domestic in Kasetsart University Sakonnakhon Campus for the construction and operation of a full-scale in the future. This research is a study of capacity of *Nelumbo nucifera* Gaertn and *Cyperus alternifolius* L for Organics matter, Total phosphorus (TP), Total Kjeldahl Nitrogen, Ammonia Nitrogen and Total suspended Solid. This pilot-scale Constructed wetlands system is combined with HFS unit and FWS unit. The flow rate of 400 liters/day which was equivalent to a hydraulic loading rate = $0.35 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$. A control experimental systems is combined with plants and without plants. The flow rate of 200 liters/day which was equivalent to a hydraulic loading rate = $0.16 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$.

The results showed that three experimental unit quite well. The percentage removal of BOD were 94.66, 95.40 and 94.49, respectively. For COD were 85.42, 86.26 and 83.72, respectively. For TKN were 77.12, 81.25 and 77.62, respectively. For Phosphorus were 64.24, 69 and 64.95, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์ กรรมการที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำ อคร พัทธราพร อธิสุขนันท์ ประธานการสอบ และ อ.ดร. วรรณสินี พุกยาสีทธิ์ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิสำหรับคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัด สกลนคร ในความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัย อ.ดร.สมณพร สุทธิบาท สำหรับคำแนะนำและช่วยเหลือ เจ้าหน้าที่ฝ่ายอาคารสถานที่ ที่อำนวยความสะดวกทุกอย่างในการทำงานครั้งนี้ คุณ ชนยิตรี แสงวิจิตร คุณเกียรติคุณ ทองแดง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (มก.ฉกส) ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือตลอดการทดลอง ขอขอบคุณน้องๆวิทยาเขตสกลนครทุกคนที่ช่วยเหลือแรงกายในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ อันเป็นดวงใจของลูกและเป็นทุกอย่างของชีวิต ทั้งกำลังกาย กำลังใจ ที่ดีเสมอมา

ลลิตี ทับทิมทอง

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	(5)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	41
ผลการทดลองและวิจารณ์	43
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก มาตรฐานคุณภาพน้ำ	74
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและความสูงของพีช	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในบึงธรรมชาติ	4
2	หน้าที่ของพืชโพลีพืชน้ำในระบบบึงประดิษฐ์	11
3	กลไกในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์	16
4	ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายมายังราก	24
5	ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช	25
6	เกณฑ์การออกแบบสำหรับระบบบึงประดิษฐ์	26
7	ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์	26
8	ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์	27
9	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของลักษณะตัวกลางต่างๆ	28
10	การเปรียบเทียบอัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ 20 °C	30
11	ค่าที่แนะนำในการออกแบบความลึกของบ่อแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน	31
12	ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์	32
13	สรุปประสิทธิภาพการกำจัดของระบบในแต่ละชุดการทดลอง	58
14	สรุปประสิทธิภาพการกำจัดของระบบในแต่ละอัตราการไหล	64
ตารางผนวกที่		
ก1	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด	75
ก2	ประเภทของอาคารเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อย	76
ข1	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่อัตราการไหล 400 ลิตรต่อวัน	78
ข2	ความสูงของพืช	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน	6
2	ระบบบึงประดิษฐ์ไหลใต้ผิวดินกรวดแวนอน	7
3	ระบบบึงประดิษฐ์ไหลใต้ผิวดินกรวดในแนวดิ่ง	8
4	ลักษณะของพืชลอยน้ำ	9
5	ลักษณะของพืชใต้อ่างน้ำ	9
6	ลักษณะของพืชใต้น้ำ	12
7	ลักษณะชั้นตัวกลางของบึงประดิษฐ์	13
8	รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์	15
9	วัฏจักรของไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์	19
10	การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์	23
11	แผนผังระบบบ่อบำบัด	35
12	แสดงภาพด้านข้างของบ่อบำบัดหลัก (ชุดการทดลองที่ 1)	36
13	แสดงภาพชั้นดินของบ่อบำบัดหลัก (HSF unit)	36
14	แสดงภาพด้านข้างของบ่อบำบัดควบคุมทดลองปลูกพืช(ชุดการทดลองที่ 2)	37
15	แสดงภาพด้านข้างของบ่อบำบัดควบคุมทดลองไม่ปลูกพืช(ชุดการทดลองที่ 3)	37
16	ลักษณะ โครงข่ายท่อ	39
17	ระบบจ่ายน้ำและถังเก็บน้ำ	39
18	ดินอ่อนของพืช	40
19	รายละเอียดและจุดเก็บตัวอย่างน้ำของระบบ	41
20	ค่าพีเอชของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	44
21	ค่าซีโอดีของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	45
22	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบตลอดการทดลอง	46
23	ค่าบีโอดีของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	47
24	ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีของระบบตลอดการทดลอง	47
25	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเฉลี่ยของบ่อบำบัดต่างๆ	48
26	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยของบ่อบำบัดต่างๆ	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ค่าTSSของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	50
28	ประสิทธิภาพการกำจัดTSSของระบบตลอดการทดลอง	51
29	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดTSSเฉลี่ยของบ่อต่างๆ	51
30	ค่าTKNของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	52
31	ประสิทธิภาพการกำจัดTKNของระบบตลอดการทดลอง	52
32	ค่าแอมโมเนียของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	53
33	ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของระบบตลอดการทดลอง	54
34	ค่าไนเตรทของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	55
35	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยของบ่อต่างๆ	56
36	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดTKNเฉลี่ยของบ่อต่างๆ	56
37	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยของบ่อต่างๆ	57
38	ค่าฟอสฟอรัสของน้ำเข้าและออกตลอดการทดลอง	58
39	ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบตลอดการทดลอง	58
40	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยของบ่อต่างๆ	59
41	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์	61
42	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน	62
43	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส	64
44	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย	65

ภาพผนวกที่

ข1	กกลังกา (บ่อดูดหลัก) HSF unit	85
ข2	บัวหลวง (บ่อดูดหลัก) FWS unit	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD5	=	Biochemical Oxygen Demand at 5 day
COD	=	Chemical Oxygen Demand
cm	=	Centimetre
FFP	=	Floating Plant
FWS	=	Free Water Surface
g	=	Gram
hr	=	hour
HRT	=	Hydraulic Loading Rate
HSF	=	Horizontal Subsurface Flow System
in	=	inch
m	=	metre
m ²	=	Square metre
m ³	=	Cubic metre
mg	=	Milligram
N	=	Nitrogen
N ₂	=	Nitrogen gas
NH ₃ -N	=	Ammonia Nitrogen
PH	=	พีเอช
Q	=	Flow rate
SFS	=	Subsurface Flow System
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TP	=	Total Phosphorus
VF	=	Vertical Flow
VSF	=	Vertical Subsurface Flow

การประยุกต์ระบบบึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัวหลวงและกกตั้งกา

Application of Constructed Wetland System for Treating Domestic Wastewater by *Nelumbo nucifera* Gaertn. and *Cyperus Alternifolius* L.

คำนำ

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตมนุษย์ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต เช่น สัตว์น้ำต่างๆ อีกทั้งมนุษย์ยังมีการนำน้ำมาใช้ในการอุปโภค บริโภคเป็นเวลานาน ซึ่งน้ำเมื่อผ่านการใช้แล้วจะมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไป หากเราใช้น้ำโดยปราศจากการวางแผนที่เหมาะสม และไม่มีการอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำ จะทำให้เกิดผลกระทบต่างๆตามมามากมาย เช่น ปัญหามลพิษของแหล่งน้ำ เป็นต้น

แนวคิดในการปรับปรุงแหล่งรองรับน้ำทิ้งโดยใช้กระบวนการและกลไกทางธรรมชาติช่วยนั้นถือว่าเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งวิธีการนี้เป็นการใช้หลักธรรมชาติมาช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งน้ำ เช่น กลไกการตกตะกอน กลไกการย่อยสลาย กลไกการกำจัดธาตุอาหาร กลไกของการกำจัดเชื้อโรค การหมุนเวียนของก๊าซออกซิเจนในระบบจากการที่น้ำสัมผัสกับสายลมและแสงแดด นอกจากนี้พืชที่อยู่ในระบบยังช่วยหมุนเวียนก๊าซออกซิเจนในแหล่งน้ำได้ พืชที่นำมาใช้ในระบบนั้นนอกจากจะช่วยทำให้กระบวนการและกลไกต่างๆเกิดการทำงานร่วมกันที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นแล้ว การเลือกใช้พืชก็สำคัญเช่นกันนอกจากจะช่วยในการบำบัดน้ำเสียและเรื่องของความสวยงามแล้วหากพืชที่นำมาใช้สามารถให้ประโยชน์และสร้างรายได้ให้แก่คนในชุมชนแล้วก็ถือได้ประโยชน์สองทางทั้งทางด้านการบำบัดน้ำเสียและเรื่องของรายได้จากพืช โดยบัวหลวงที่นำมาใช้ในระบบนี้จัดเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตของคนไทยมาช้านาน เนื่องจากบัวหลวงนี้คนไทยนำดอกไปไหว้บูชาพระ จัดว่าเป็นพืชตัดดอกที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอีกตัวหนึ่ง นอกจากนี้ ในพื้นที่บริเวณข้างเคียงคลองพืชจะทำการปรับปรุงให้เป็นสวนน้ำเปิด เป็นการปรับแต่งภูมิทัศน์โดยรอบให้สวยงามลดพื้นที่เสื่อมโทรมลงเป็นการพื้นที่ให้เกิดประโยชน์ สร้างความพึงพอใจและคุณภาพชีวิตที่ดีแก่ผู้อยู่อาศัยข้างเคียง และเป็นการป้องกันและแนวทางป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งน้ำภายในวิทยาเขตอีกทาง

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัวหลวง และกกตั้งกา ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ขอบเขตการศึกษา

การประยุกต์ระบบบึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บัวหลวงและกกตั้งกา ด้วยระบบแบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอนร่วมกับระบบแบบไหลผิวดิน โดยใช้น้ำเสียจากหอพักนิสิตหญิงและตึกบุคลากร ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติสกลนคร มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ใช้บ่อจำลองเป็นบ่อคอนกรีตจำนวน 6 บ่อ แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง โดยแต่ละชุดทดลองประกอบด้วย ระบบบ่อแบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอนและระบบบ่อแบบไหลผิวดิน ไหลยาวต่อเนื่องกันจากระบบแรกมาระบบที่สอง แบบ Plug Flow โดยอีก 2 ชุดการทดลองเป็นบ่อควบคุมการทดลองที่ทำการปลูกพืชและไม่ปลูกพืช

2. น้ำเสียจากหอพักนิสิตหญิงและตึกบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

3. ใช้บัวหลวง (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) และกกตั้งกา (*Cyperus alternifolius* L.) เป็นพืชที่ใช้ในการบำบัด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ทราบประสิทธิภาพของบัวหลวงและกกลังกาในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากหอพักอาศัยเป็นทางเลือกในการใช้พืชน้ำบำบัดน้ำเสียอีกทางหนึ่งและสามารถใช้ประโยชน์จากพืชได้
2. เป็นแนวทางให้กับมหาวิทยาลัยในการปรับปรุงแหล่งรองรับน้ำทิ้งให้มีสภาพดีขึ้นได้ และสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงในระบบต่อไป

การตรวจเอกสาร

1. ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland System)

ระบบบึงประดิษฐ์ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำที่ใดที่หนึ่ง ที่สร้างขึ้นมาเพื่อเลียนแบบกลไกการบำบัดของเสียตามธรรมชาติด้วยหลักการทางด้านวิศวกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียทั้งจากชุมชน โรงงาน หรือจากการทำเกษตรกรรม ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยกลไกในการบำบัดนั้นจะอาศัย พืช ดิน น้ำ และจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณรอบๆรากของพืช (เกรียงศักดิ์, 2547; Cheng *et al.* , 2008)

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าแท้จริงแล้วบึงนั้นจะมี 2 ประเภท คือ บึงธรรมชาติและบึงประดิษฐ์ และในบึงธรรมชาตินั้นมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ในบึงธรรมชาตินั้นเป็นแหล่งที่รองรับน้ำท่วมไปอยู่แล้วและยังมีสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ จึงไม่ควรที่จะนำบึงธรรมชาติเหล่านี้มาบำบัดน้ำเสียโดยตรง จากตารางที่ 1 เป็นข้อมูลในการบำบัดน้ำเสียของบึงธรรมชาติซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของบึงธรรมชาติ

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในบึงธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพในการบำบัด (ร้อยละ)
สารอินทรีย์	70 – 96
ของแข็งแขวนลอย	60 – 90
ไนโตรเจน	40 – 90

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (ม.ป.ป)

เนื่องจากว่าไม่สมควรที่จะนำระบบบึงธรรมชาติมาบำบัดน้ำเสียโดยตรง จึงมีการสร้างระบบบึงประดิษฐ์ขึ้นมาใช้เนื่องจากว่าสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้สูงสุดและสามารถสร้างได้ทุกที่และปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม

ระบบบึงประดิษฐ์นี้จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากซึ่งอาจจะสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำขึ้นมาเองเพื่อบำบัดน้ำเสียหรืออาจเป็นไปตามธรรมชาติที่มีอยู่แล้ว การก่อสร้างระบบบึงประดิษฐ์นี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำและการออกแบบก่อสร้างไม่ซับซ้อนและการดูแลรักษาระบบง่ายไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญสูงในการเดินระบบ

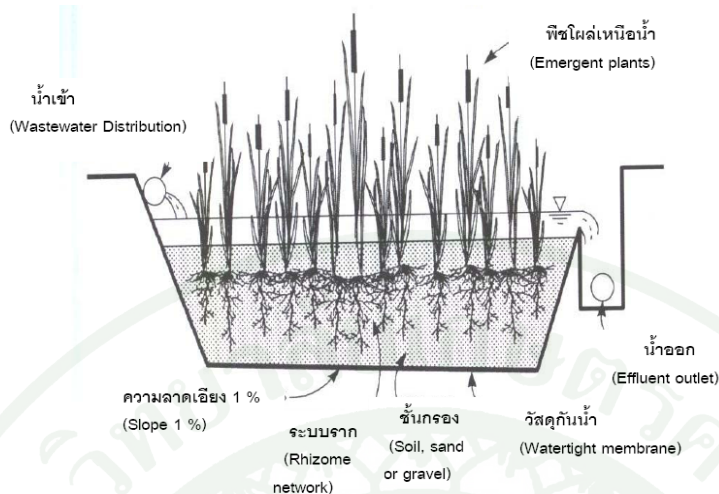
บึงประดิษฐ์ที่สร้างมานี้วัตถุประสงค์หลักอาจจะเพื่อการบำบัดน้ำเสียแต่สำหรับผลพลอยได้ก็ตามมาก็คือเป็นที่อยู่อาศัยตามธรรมชาติของสัตว์น้ำหรือถ้าหากพืชที่นำมาใช้นั้นมีความสวยงามหรือมีคุณค่าทางเศรษฐกิจแล้วก็อาจกลายเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สวยงามและสร้างรายได้แก่ชุมชนอีกทาง

ในระบบบึงประดิษฐ์นั้นประกอบไปด้วย ระบบบึงประดิษฐ์แบบใช้พืชลอยน้ำ (FFP), ระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลตามผิวดิน (FWS) และระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินทั้งในแนวดิ่ง(VSSF หรือ VF) และในแนวนอน (HSSF หรือ HF) (Vymazal,2006)

โดยบึงประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมานั้นจะแบ่งตามการไหลของน้ำในบึง ทำให้เกิดลักษณะการไหลของน้ำ 2 ลักษณะ คือ

1.1 บึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System , FWS)

บึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นบึงประดิษฐ์ที่น้ำเสียจะไหลผ่านหน้าดินหรือตัวกลางในลักษณะตามแนวยาว (plug flow) เจริญเติบโตเต็มพื้นที่ในบึง โดยบึงประดิษฐ์นี้จะเป็นบึงธรรมชาติ ระดับน้ำในบึงไม่ลึกมากนัก โดยบึงนี้ระดับน้ำลึกประมาณ 0.1-0.6 เมตร แต่โดยเฉลี่ยจะลึกประมาณ 0.3 เมตร น้ำเสียจะไหลเข้าบึงและผ่านต้นพืชและรากพืชอย่างช้าๆ โดยพืชที่ใช้อาจเป็นกลุ่มที่มีรากและลำต้นโผล่พ้นน้ำ เช่น กก แผลก ฐูปถาญี บัว แหน โดยพืชนั้นจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของแร่ธาตุ อากาศ แสงแดด บึงประดิษฐ์นี้ก้นบึงอาจมีชั้นดินเหนียวรองรับเพื่อไม่ให้น้ำเสียไหลซึมลงด้านล่าง



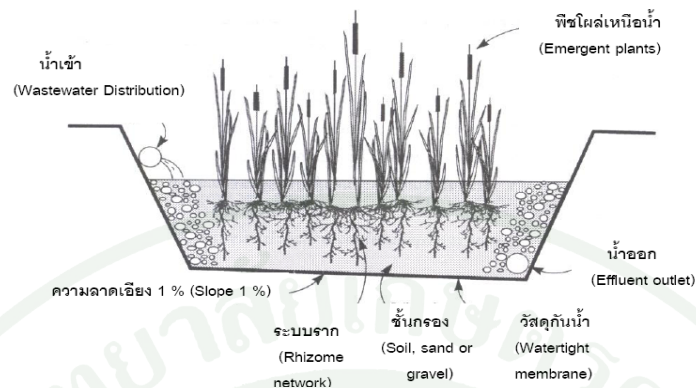
ภาพที่ 1 บึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System , FWS)

ที่มา: Ujang and Henze (2006)

1.2 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface flow System , SFS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 2 เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่ออกแบบให้น้ำไหลผ่านตัวกลาง โดยชั้นของตัวกลางนั้นจะทำหน้าที่เพื่อให้พืชยึดเกาะ โดยตัวกลางที่ใช้ อาจเป็น หินบด กรวด ทราย ซึ่งอาจใช้ชนิดเดียวกันหรือหลายชนิดร่วมกันได้ ความหนาของชั้นตัวกลางที่ใช้ประมาณ 0.6 – 0.7 เมตร ความลึกของบ่อชนิดนี้ประมาณ 0.3 – 0.8 เมตร โดยก้นบ่ออาจปูรองด้วย Polyethylene เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ความลาดชันของบ่อนั้นประมาณ 1 % เพื่อให้ น้ำไหลลงไม่เกิดการขังตัวของน้ำ (เกรียงศักดิ์, 2547) ซึ่งระบบนี้แบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่

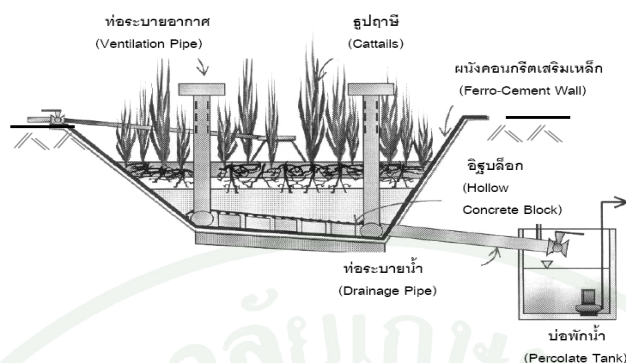
1.2.1 การไหลตามแนวนอน (Horizontal Subsurface System , HF) น้ำเสียจะไหลผ่านอย่างช้าๆผ่านตัวกลางในแนวนอน โดยตัวกลางที่ใช้ อาจจะเป็น หิน กรวด หรือ ทราย น้ำเสียที่ไหลจะผ่านช่องว่างของตัวกลาง ระหว่างที่ไหลผ่านตัวกลางนี้จะสัมผัสกับจุลินทรีย์ส่วนที่มีออกซิเจน (aerobic zones) ซึ่งเกิดรอบๆรากและชั้นรากพืช น้ำเสียจะถูกบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีโดยจุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณรากพืชและตัวกลาง (Cooper *et al*, 1996)



ภาพที่ 2 บึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรวดในแนวนอน (Horizontal Subsurface System ; HF)

ที่มา: Ujang and Henze (2006)

1.2.2 บึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรวดในแนวดิ่ง แสดงดังภาพที่ 3 การไหลตามแนวดิ่ง (Vertical Subsurface System ,VF) ระบบบึงประดิษฐ์นี้จะประกอบด้วยชั้นของตัวกลางหลายๆชั้นและอาจมีขนาดของตัวกลางต่างกัน โดยจะมีการกระจายน้ำที่ผิวหน้าของชั้นตัวกลาง มีระบบท่อที่อยู่ใต้ผิวตัวกลางทำการรับน้ำในระบบ ถัดจากชั้นของท่อนี้ขึ้นมาจะเป็นชั้นของทราย ทั้งทรายหยาบและละเอียด การให้น้ำแก่ระบบจะเป็นแบบครั้งคราว จะช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดิน เมื่อหยุดการใช้งาน และในขณะที่ให้น้ำแก่ระบบนั้น ระบบจะเกิดสภาพไร้อากาศ โดยสภาพไร้อากาศนี้จะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา ไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน และการดูดซับฟอสฟอรัส (P-adsorption) (ศุวศา, 2544)



ภาพที่ 3 บึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวดิ่ง (Vertical Subsurface System ,VF)

ที่มา: Ujang and Henze (2006)

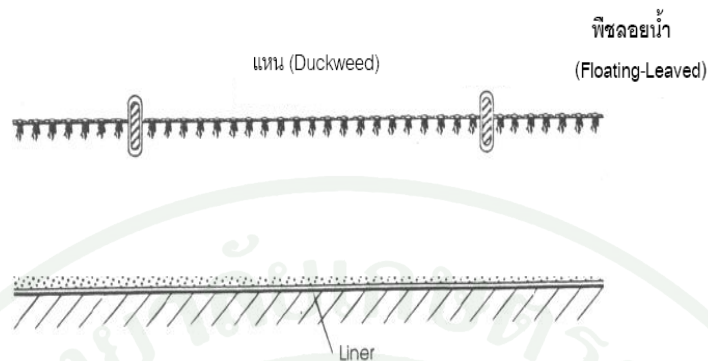
1.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน (Hybrid System)

เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่นำเอาระบบบึงประดิษฐ์แบบต่างๆมาทำงานร่วมกัน โดยส่วนมากแล้วจะรวมเอาระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและการไหลใต้ผิวดินในแนวนอน โดยข้อดีของการนำเอาระบบทั้งสองนี้มาทำงานร่วมกันคือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน เนื่องจากว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดี เพราะมีการถ่ายเทออกซิเจนดี (ศุวสา, 2544)

2. องค์ประกอบบึงประดิษฐ์

2.1 พืช

2.1.1 พืชลอยน้ำ (Floating Plant) พืชชนิดนี้จะลอยไปตามกระแสน้ำ การนำมาใช้จึง จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตให้แน่นอน พืชที่นิยมนำมาใช้ในระบบนี้ได้แก่ จอก แหน ผักตบชวา ผักบุ้ง เป็นต้น แต่ส่วนมากแล้วจะนิยมนำผักตบชวามาใช้เนื่องจากว่ามีความทนทานต่อสภาพน้ำเสียมากกว่าพืชลอยน้ำชนิดอื่น ระบบที่ใช้พืชลอยน้ำนี้เหมาะกับระบบที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไม่สูงนัก กลไกของการบำบัดนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากการดูดซึมของพืช ข้อดีของระบบที่ใช้พืชลอยน้ำคือ จะมีใบปกคลุมผิวน้ำจะทำให้แสงแดดผ่านน้อย ลดการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย (algae) ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการลอยตัวของพืชลอยน้ำในระบบ



ภาพที่ 4 ลักษณะของพืชลอยน้ำ

ที่มา: Kadlec and Knight (1996)

2.1.2 พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant) ลักษณะของพืชโผล่พ้นน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 5 พืชชนิดนี้จะมีรากอยู่ใต้ดินก้นน้ำ (ดินตมและชูใบและดอกอยู่เหนือน้ำ โดยพืชแต่ละชนิดนั้นก็มีความสามารถโตได้ในระดับน้ำที่ต่างกันได้ ตัวอย่างของพืชชนิดนี้ได้แก่ บัวชนิดต่างๆ กกบางชนิด ปัญหาที่พบของพืชชนิดนี้ก็คือ มักเป็นอาหารของสัตว์น้ำ หากจะใช้จะต้องเป็นไปในลักษณะของการปลูกพืชแบบไร้ดิน (สุกเกษมและสุนันทา, ม.ป.ป)



ภาพที่ 5 ลักษณะของพืชโผล่พ้นน้ำ

ที่มา: Kadlec and Knight (1996)

2.1.3 พืชชายน้ำ (Marginal Plant) พืชชนิดนี้จะขึ้นอยู่บนดินริมชายตลิ่ง จึงมีรากที่ต้องอาศัยสิ่งยึดเกาะ การใช้พืช ชนิดนี้มาปลูกเพื่อบำบัดน้ำเสียจึงจำเป็นที่จะต้องจำลองสภาพนิเวศเดิมเอาไว้โดยใช้ทรายเป็นเครื่องยึดเกาะแทนดิน พืชจะใช้สารอาหารจากน้ำเสีย พืชชนิดนี้นิยมนำมาใช้ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์ เพราะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ เช่น พุทธรักษา ฐปถายี หญ้าแฝก เตยหอม ปักยาสวรรค์ เป็นต้น

โดยทั้งพืชน้ำประเภทใล่พื้นน้ำและประเภทพืชชายน้ำนั้น มีคุณสมบัติพิเศษคือ ส่วนใบที่อยู่เหนือน้ำสามารถนำหรือลำเลียงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศไปสู่รากพืชได้ ส่งผลให้ชั้นกรองในบริเวณที่รากพืชยึดเกาะไม่เกิดสภาพไร้ออกซิเจน จากตารางที่ 2 ได้แสดงหน้าที่ที่สำคัญของพืชทั้งสองชนิดในระบบบึงประดิษฐ์ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2 หน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบบึงประดิษฐ์

ส่วนของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	- ลดความเข้มของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน - ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว - ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน - ช่วยให้ระบบดูสวยงาม - สะสมอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	- ลดความเร็วกระแสน้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ - กรองตะกอนขนาดใหญ่ - เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของไบโอฟิล์ม - ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน - ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	- ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำถูกกัดเซาะน้อย - ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบการไหลในแนวดิ่ง - ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลายและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน - ดูดซับสารอาหาร - ปล่อยสารปฏิชีวนะ (Antibiotic)

ที่มา: Brix (1997)

2.1.4 พืชใต้น้ำ (Submerged Plant) พืชชนิดนี้สามารถดำรงชีวิตอยู่ใต้น้ำได้ทั้งส่วนราก ลำต้น ใบ ดอกผล ซึ่งอาจจะใช้รากยึดติดหรือไม่ยึดติดกับพื้นดินน้ำก็ได้ ตัวอย่างของพืชประเภทนี้เช่น สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายจืด สาหร่ายพวงพะโค คีปลิ้นา ระบบที่ใช้พืชน้ำชนิดนี้ไม่นิยมนำมาบำบัดน้ำเสียมากนัก เพราะมักเป็นอาหารของสัตว์น้ำ แต่นิยมนำมาบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองพบว่าสามารถลดธาตุอาหาร ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ได้ดี ลักษณะของพืชใต้น้ำดังแสดงในภาพที่ 6



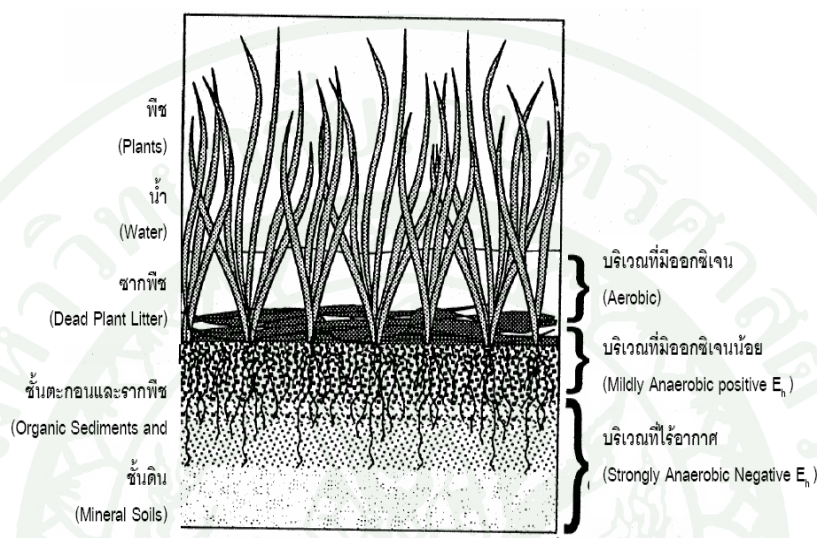
ภาพที่ 6 ลักษณะของพืชใต้น้ำ

ที่มา: Kadlec, R.H and Knight, R.L (1996)

2.2 ตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์นี้ ได้แก่ ดินทราย หรือกรวด ซึ่งตัวกลางเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะเพื่อให้พืชสามารถยืนต้นอยู่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ รวมทั้งเป็นตัวกรอง ดูดซับ และตกตะกอนมลพิษอีกด้วย ดินที่นำมาใช้นั้นจะต้องมีความซึมผ่านของน้ำต่ำ (น้อยกว่า 0.2 in/hr หรือ 0.07 cm/hr) (Metcalf and Eddy, 1991) จากการศึกษาของ ไพบูลย์และคณะ (2542) พบว่า ดินนั้นช่วยในการบำบัดสารอินทรีย์แล้วใช้พืชดูดไอออนชนิดต่างๆ ที่มีอยู่แล้วดั้งเดิมและที่แปรสภาพมาจากสารอินทรีย์ที่เจือปนมากับน้ำเสียให้เป็นสารอินทรีย์ที่พืชสามารถนำไปใช้งานได้ สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นสามารถถูกดินบำบัดได้เพราะในดินมีจุลินทรีย์ทั้งประเภท aerobes และ anaerobes และมีปัจจัยทางบวกที่ช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ครบถ้วนที่สุด กล่าวคือ มีตัวรับอิเล็กตรอน มีธาตุอาหารพืช และมีจุลินทรีย์ มี clay ซึ่ง

สามารถดูดซับไอออนบวกและมี buffering capacity สูง สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะ anaerobes สามารถหายใจและกินอาหารได้ตลอดเวลา และส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์จะถูกนำไปเพิ่มประชากรของจุลินทรีย์และกลายเป็นอินทรีย์วัตถุของดินต่อไป



ภาพที่ 7 ลักษณะชั้นตัวกลางของบึงประดิษฐ์

ที่มา: Kadlec and Knight (1996)

2.3 จุลินทรีย์ (Microorganism)

จุลินทรีย์ที่พบในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีอยู่หลายชนิด ในบึงประดิษฐ์นั้นบึงและพืชน้ำเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดและถ้าประกอบกับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแล้ว สิ่งมีชีวิตเล็กๆพวกจุลินทรีย์ก็จะเจริญเติบโตได้ดี จุลินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์ที่สำคัญมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบคทีเรีย (Bacteria) และรา (Fungi) (Kadlec and Knight, 1996) การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นนอกจากจะต้องมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแล้วยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหาร ปริมาณออกซิเจน พืชน้ำ และอุณหภูมิ ซึ่งจุลินทรีย์นี้จะเจริญเติบโตได้ในอุณหภูมิค่อนข้างสูงคือ 20 – 30 องศาเซลเซียส และที่พืชน้ำ 6 – 8

โดยจุลินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์นี้จะแบ่งตามลักษณะการอาศัยได้เป็นสองลักษณะ คือ ชนิดที่แขวนลอยอยู่ในน้ำซึ่งชนิดนี้ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิตและชนิดที่เกาะติดที่ผิวหน้าของชั้นตัวกลางหรือบริเวณที่จมอยู่ในน้ำของพืช เช่น ราก ลำต้น ใบ โดยหน้าที่เมื่อน้ำเสียผ่านเข้าสู่ระบบแล้วจุลินทรีย์ก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสารปนเปื้อนในน้ำให้เป็นพลังงานและสารอาหารสำหรับดำรงชีวิตต่อไป

2.4 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์

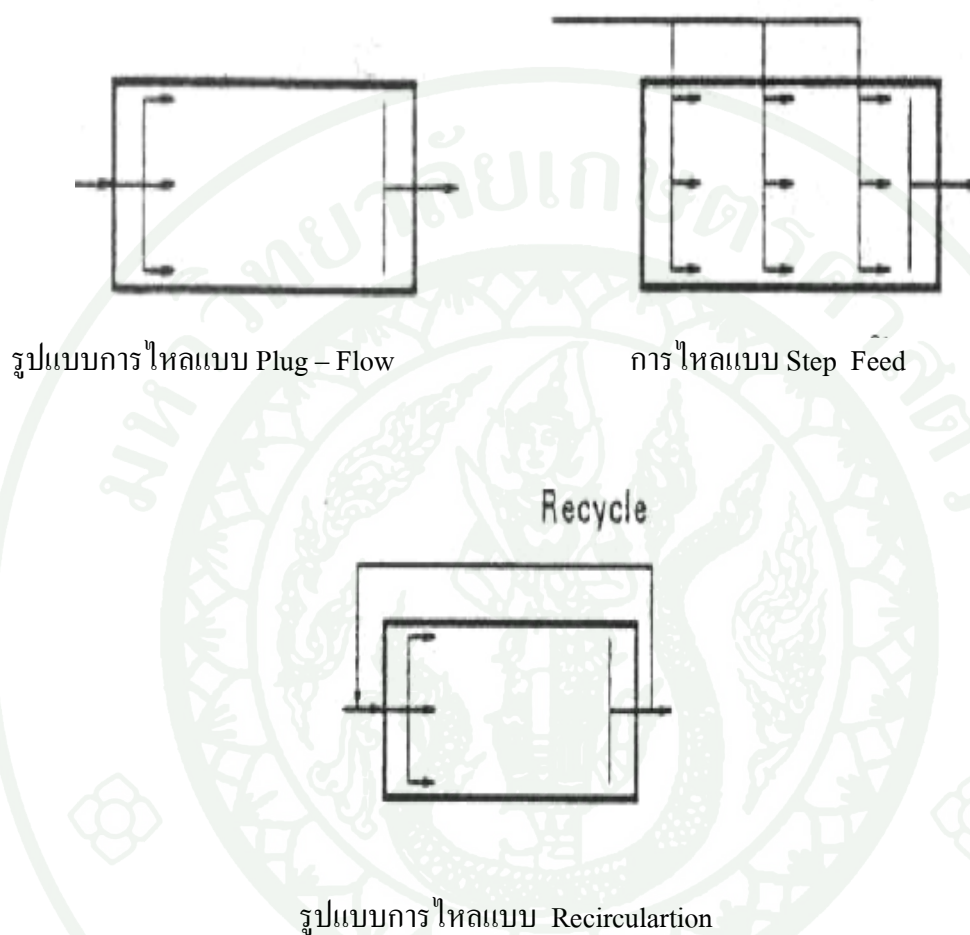
รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีหลายรูปแบบสามารถการออกแบบ โดยแต่ละรูปแบบนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ว่าควรออกแบบให้มีลักษณะอย่างไรจากภาพที่ 8 แสดงรูปแบบการไหลของน้ำในระบบรูปแบบต่างๆ โดยรูปแบบการไหลแบ่งออกเป็นดังนี้

2.4.1 รูปแบบการไหลแบบ Plug – Flow เป็นรูปแบบการไหลที่ปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านพื้นที่ตลอดความยาว ในปัจจุบัน การไหลแบบ Plug – Flow นี้นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ข้อดีของการไหลแบบ Plug – Flow นี้คือการลงทุนต่ำเนื่องจากว่าใช้ท่อในระบบน้อย และนอกจากนี้ยังใช้พลังงานต่ำและต้องการการดูแลน้อย แต่ในการไหลแบบ Plug – Flow นี้ข้อจำกัดก็มีในเรื่องที่ว่าไม่เหมาะกับระบบที่มีสารอินทรีย์สูงและระบบที่มีความยาวต่อความกว้างมาก ($L:W > 10:1$)

2.4.2 รูปแบบการไหลแบบ Step Feed เป็นรูปแบบการไหลที่มีการเติม น้ำเสียเข้าสู่ระบบเป็นช่วงๆ ระบบนี้จะกำจัดของแข็งได้ดีมากและนอกจากนี้ยังในส่วนพื้นที่ทำอย่างยังสามารถกำจัดในโตรเจนได้อีกด้วย ระบบ Step Feed นี้การลงทุนก่อสร้างจะค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องวางระบบท่อเพื่อให้ น้ำเสียกระจาย ท่อบ่อและผลของการกระจายน้ำเสียเข้าบ่ออย่างทั่วถึงนี้ทำให้ประสิทธิภาพจะดีกว่าแบบแรก

2.4.3 รูปแบบการไหลแบบ Recirculation รูปแบบการไหลแบบ Recirculation นี้กำลังเป็นที่ได้รับความนิยมและมีแนวโน้ม ที่จะลงทุนก่อสร้างมากขึ้น ระบบนี้จะหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดและจะออกจากระบบเข้ามาผสมใหม่ ข้อดีของการหมุนเวียนน้ำเข้ามาใหม่นี้จะช่วยลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์และของแข็งที่เข้ามาในระบบนอกจากนี้รูปแบบการไหลแบบ

Recirculation นี้จะช่วยลดกลิ่นและช่วยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย และเพิ่มระยะเวลาเก็บให้มากขึ้นเพื่อให้เกิดกระบวนการ Nitrification และช่วยกำจัดไนโตรเจนได้



ภาพที่ 8 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา: Ujang and Henze , 2006

3. กลไกและประสิทธิภาพการบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์

กลไกการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์นั้นจะมีทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ เกิดขึ้นในสภาพของดินและน้ำโดยทั้งสามกลไกนั้นจะทำงานสัมพันธ์กัน ซึ่งกลไกที่พบนั้นจะประกอบด้วย การตกตะกอน การกรอง การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การดูดซับ การ

สะสมในดินและการสะสมในพืช โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียนี้สามารถกำจัดหรือแยกสิ่งปนเปื้อนออกมาได้ระดับหนึ่ง โดยจากตารางที่ 3 แสดงกลไกที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบ บึงประดิษฐ์

ตารางที่ 3 กลไกในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์

องค์ประกอบในน้ำเสีย	กลไกการบำบัด
ของแข็งแขวนลอย	- การตกตะกอน - การกรอง
บีโอดี	- การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ - การตกตะกอน
ไนโตรเจน	- ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ - พืชนำไปใช้ - การระเหยของแอมโมเนีย
ฟอสฟอรัส	- การตกตะกอน - การกรอง
เชื้อโรค	- การตายตามธรรมชาติ - รังสี UV - โดยสารปฏิชีวนะจากการพืช

ที่มา: Brix (1997)

3.1 กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

กลไกที่สำคัญในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบบึงประดิษฐ์คือ การตกตะกอนและการกรอง (Sedimentation and Filtration) โดยการกำจัดของแข็งแขวนลอยนั้นเกิดขึ้นอย่างได้ผลในระบบบึงประดิษฐ์ที่แบบไหลตามผิวดิน (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดิน (SF) โดยของแข็งแขวนลอยที่เข้ามากับน้ำเสียนั้นจะเกิดการตกตะกอนใกล้กับบริเวณทางเข้า โดยเฉพาะในระยะ 2-3 เมตรแรก ระบบที่น้ำไหลผ่านชั้นของตัวกลางตะกอนที่เข้ามากับน้ำเสียนั้นมักจะไปอุดตันบริเวณชั้นบนของพื้นที่ ดังนั้นในการควบคุมการไหลของน้ำที่เข้ามาในระบบด้วยการติดตั้งท่อกระจายน้ำและควรควบคุมความเร็วในการไหลของจุดน้ำที่เข้ามาไม่ควรเกิน 0.3 เมตร/วินาที ซึ่งความเร็วระดับนี้จะช่วยไม่ให้เกิดภาวะ Anoxic Condition (ภาวะไร้อากาศ) ที่ต้นทางน้ำด้วย

3.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ (Organic Compounds)

กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบบึงประดิษฐ์ก็คือ การตกตะกอนและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของของแข็งจะตกตะกอน ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ ในระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลตามผิวดินนั้น (FWS) การกำจัดสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ จุลินทรีย์ต้องการแหล่งคาร์บอนและแร่ธาตุบางชนิดในการสร้างเซลล์ โดยจุลินทรีย์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับแหล่งคาร์บอน (แหล่งอาหาร) กลุ่ม Heterotrophic Bacteria เป็นกลุ่มที่ใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ ส่วนกลุ่ม Autotrophic Bacteria ใช้คาร์บอนจากสารประกอบอนินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบกลุ่มคาร์บอนเนตเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้ กลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS นอกจากอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบแล้ว แหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยากำจัดของเสียที่สำคัญ โดยแหล่งออกซิเจนนี้ ส่วนหนึ่งจะได้มาจากการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศมาสู่ผิวน้ำ และปริมาณออกซิเจนที่ถูกลำเลียงผ่านไปยังส่วนของรากพืช

3.3 กลไกการกำจัดไนโตรเจน

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีหลายกลไกด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ การนำไปใช้โดยพืช หรือเกิด

จากการระเหยของแอมโมเนีย แต่โดยส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนนั้นจะถูกกำจัดออกไปโดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ โดยในระบบบึงประดิษฐ์นั้นการกำจัดไนโตรเจนนั้นอยู่ในช่วง 25-85 เปอร์เซ็นต์ (U.S. EPA, 1998) และไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและสารแอมโมเนียไนโตรเจน โดยถ้าแหล่งน้ำมีไนโตรเจนมากๆแล้วจะก่อให้เกิดการเน่าเสียตามมา เนื่องจากว่าธาตุไนโตรเจนนี้เป็นธาตุที่ต้องการออกซิเจนมากจะทำให้เกิดการขาดออกซิเจนของแหล่งน้ำจึงทำให้เกิดปัญหาเน่าเหม็นของน้ำได้ โดยตรงชัย (2544) นั้นได้กล่าวเกี่ยวกับความต้องการออกซิเจนของไนโตรเจนว่า ถ้าระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปนั้นลดบีโอดีจาก 100 ไปเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามมาตรฐานจะลดความต้องการออกซิเจนในน้ำลงเพียง 80 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์และแอมโมเนีย หรือที่เรียกว่าทีเคเอ็น (TKN) ถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำในอัตรา 30 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรแล้วจะเกิดความต้องการออกซิเจนเพื่อมาออกซิไดส์ไนโตรเจนนี้เพื่อให้กลายเป็นไนเตรท (เรียกว่า nitrogenous oxygen demand หรือเอ็น โอดี, NOD หรือความต้องการออกซิเจนโดยไนโตรเจน) เท่ากับ $30 \times 4.75 = 137$ มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตรซึ่งมากกว่าความต้องการออกซิเจนจากสารอินทรีย์คาร์บอน (บีโอดี) เล็กน้อย

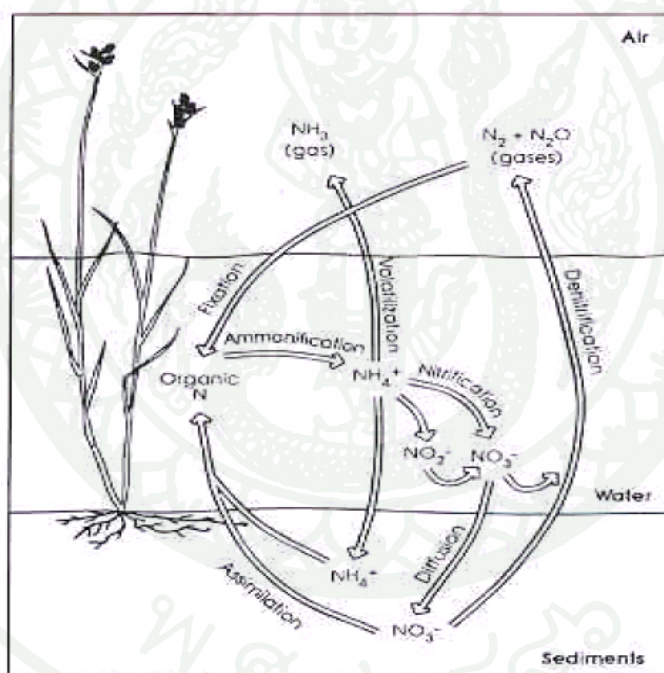
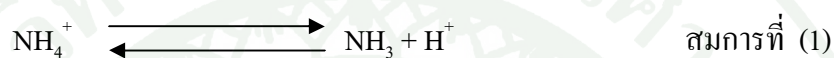
วงจรของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีความซับซ้อนและเกิดขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์นั้นอยู่ในรูปต่างดังนี้ (Kadlec, R.H and Knight, R.L., 1996 ; Metcalf and Eddy., 1991)

- 1) ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน คือ แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3) , ไนเตรท (NO_2^-) , ไนไตรท์ (NO_3^-)
- 2) ในรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน คือ กรดอะมิโน กรดยูริกและยูเรีย โปรตีน กรดนิวคลีอิก
- 3) ในรูปของก๊าซ คือ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO_2)

จากภาพที่ 9 จะแสดงวัฏจักรของไนโตรเจนที่เข้ามาในระบบบึงประดิษฐ์ซึ่งสารไนโตรเจนสามารถหมุนเวียนได้ด้วยกระบวนการเคมีและชีวเคมี อันได้แก่กระบวนการดังต่อไปนี้

กระบวนการ แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

คือกระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนไปอยู่ในรูปอนินทรีย์ มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ โดยแอมโมเนียขึ้นเกิดขึ้นได้จากการที่จุลินทรีย์หายใจและใช้พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเกิดแอมโมนิฟิเคชันในการสร้างเซลล์ใหม่ ส่วนการไฮโดรไลซ์ของยูเรียโดยเอนไซม์ก็ปล่อยแอมโมเนียม (NH_4^+) ออกมาได้เช่นกัน ดังสมการที่ (1) ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดแอมโมนิฟิเคชันคือ 40 – 60 องศาเซลเซียสและช่วงพีเอชที่เหมาะสม 6.5 -8.5

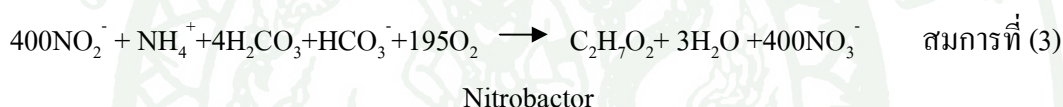
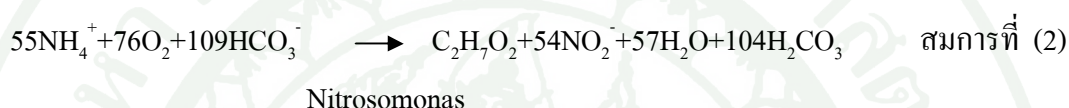


ภาพที่ 9 วัฏจักรของไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา: Kadlec and Knight (1996)

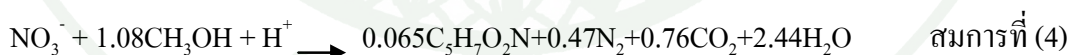
กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นกระบวนการเติมออกซิเจนในสารประกอบไนโตรเจนโดยมีจุลินทรีย์เข้ามาช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดไนเตรทขึ้น โดยจะมีไนโตรที่ป็นสารระหว่างการเกิดปฏิกิริยา อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันในดินของบึงประดิษฐ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของ NH_4^+ ที่มีอยู่ในบริเวณแอโรบิกนั้น โดยจะต้องมีปริมาณออกซิเจนอิสระมากเท่าไรก็จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ดีเท่านั้น และจะต้องมีสภาพพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.5 – 8.6 และจะเกิดกระบวนการได้ดีเมื่อมีปริมาณ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ มากและบีโอดีน้อย โดยจะเกิดเป็นขั้นตอนดังนี้



กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการนี้เกิดจากการกระทำของแบคทีเรียพวก facultative bacteria เป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่จะรีดิวซ์ NO_2^- และ NO_3^- ไปเป็น N_2 โดยจะต้องเกิดในสภาวะที่จำกัดออกซิเจน (Anoxic)



ในระบบบึงประดิษฐ์นั้นพบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเช่นกัน โดยออกซิเจนมีการลดลงจากผิวน้ำสู่ดินตะกอนก้นบึงทำให้เกิดทั้งสภาพแอโรบิกและแอนีอ็อกซิก ดังนั้นไนเตรทที่เกิดขึ้นในบึงประดิษฐ์จะถูกดูดซึมในชั้นดินที่ไม่มีออกซิเจน และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันต่อไป อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันในชั้นนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไนเตรทที่มีอยู่ แหล่งพลังงาน จุลินทรีย์ และ อุณหภูมิ

การดูดซึมโดยพืช

อัตราการดูดซับของพืชจะถูกกำหนดโดย อัตราการเจริญเติบโตของพืชและความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งพืชนั้นนำสารไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทมาใช้ ซึ่งไนเตรทจะเป็นอาหารของพืชจะอยู่ในชั้นที่เป็นรากพืช จากส่วนที่เป็นรากไนโตรเจนจะเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนที่เหนือดิน เช่น ลำต้น ใบ และดอก ก่อนที่ไนโตรเจนจะเคลื่อนที่ออกโดยกระบวนการทางธรรมชาติ

3.4 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัส

กระบวนการทางกายภาพที่สำคัญ 2 กระบวนการในการกำจัดฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์คือ กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคของฟอสฟอรัสและการดูดติดฟอสเฟตที่ละลายดินในระบบบึงประดิษฐ์จะสามารถดูดติดฟอสฟอรัสได้ แต่ความสามารถจะแตกต่างกันไป ปริมาณการสะสมอาจเกิดได้ไม่เท่ากัน วงจรของฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์ค่อนข้างซับซ้อนและมีฟอสฟอรัสหลายรูป การดูดซึมโดยพืชไม่ควรนำมาใช้วัดอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ เพราะฟอสฟอรัสที่สะสมในพืชจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำในกระบวนการย่อยสลาย การสะสมของฟอสฟอรัสระยะยาวเป็นผลมาจากการทับถมของซากรวมทั้งการทับถมของฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารประกอบที่ย่อยสลายยาก

3.5 กลไกการกำจัดโลหะ

กลไกในการกำจัดโลหะหนักในระบบบึงประดิษฐ์นั้นส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากการตกตะกอนและการดูดซับ การตกตะกอนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หากมีการปรับพีเอช (PH) จากสภาพกรดให้เข้าใกล้สภาพที่เป็นกลาง โดย (U.S. EPA, 1998) ได้รายงานถึงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของระบบบึงประดิษฐ์ที่เมือง Santee รัฐ California ว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก Cu, Zn, และ Cd ได้ 99, 97 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับที่ระยะเวลาการกักเก็บ 5.5 วัน แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนั้นยังขึ้นกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของดินที่เป็นชั้นกรองอีกด้วย

3.6 กลไกการกำจัดเชื้อโรค

เชื้อโรคที่พบในระบบบึงประดิษฐ์นั้นส่วนมากได้แก่ หนอนพยาธิ (parasites) แบคทีเรีย และไวรัส โดยเฉพาะกลไกการกำจัดเชื้อโรคที่เกิดจากพวกแบคทีเรียและไวรัสนี้เกิดโดยการกินกันเองระบบ ใน การตกตะกอน การดูดซับ และการตาย (die-off) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น แสงอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการเติบโตและแบ่งเซลล์ของเชื้อโรค

4. พืชในระบบประดิษฐ์

พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ นั้นจะต้องเป็นพืชที่มีความทนทานต่อสภาพน้ำเสีย จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมเพราะจะทำให้ได้ประสิทธิภาพดีตามที่ต้องการได้ เพราะพืชในประเทศไทยนั้นมีหลายชนิด การที่เราจะนำเทคโนโลยีไปใช้ที่ใดจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมด้วย

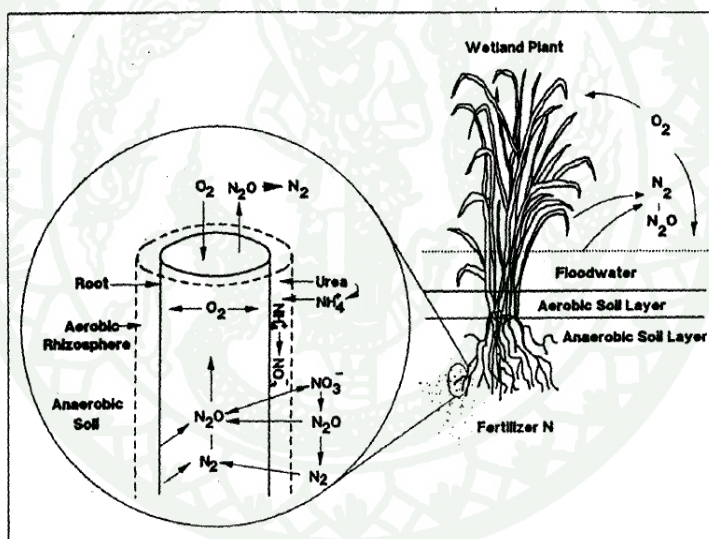
โดย พัฒน์ (2536) นั้นได้ให้ข้อพิจารณาในการเลือกพืชที่จะนำมาใช้ในระบบเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำนั้นมีเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- 1) อดทนต่อสารมลพิษในน้ำเสียได้ดี
- 2) ปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศและดินได้ดี (เป็นพันธุ์พื้นเมือง)
- 3) ผลิตมวลชีวะได้มาก
- 4) ง่ายต่อการจัดการ โดยนำออกจากระบบบ้างเพื่อไม่ให้พืชอยู่หนาแน่นเกินไป
- 5) มีความสามารถในการดูดซึมและสะสมสารต่างๆได้
- 6) มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงและเจริญเติบโตได้ดีตลอดทั้งปี

โดยพืชในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่นั้นนิยมปลูก ธูปฤาษี กก แผล่ พุทธรักษา ซึ่ง สุชาดาและคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นในการคัดเลือกชนิดของพืช 15 ชนิด เพื่อบำบัดน้ำเสียนั้นพบว่า พืชที่มีศักยภาพดีที่สุดในการใช้เป็นพืชบำบัดน้ำเสียนั้นได้แก่ แผล่ศรีลังกา กกกลม ธูปฤาษี และกกสามเหลี่ยม การปลูกพืชนอกจากเพื่อผลในการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังสามารถเลือก

พันธุ์พืชที่เมื่อปลูกแล้วสามารถปลูกเพื่อสร้างความสวยงามและสร้างรายได้ด้วย เช่น พุทธรักษา ธรรมรักษา บัว และเตยหอม เป็นต้น

หน้าที่ที่สำคัญอีกอย่างของพืชในบึงประดิษฐ์นี้ก็คือทำหน้าที่ถ่ายเทออกซิเจนโดยผ่านทางราก โดยรากของพืชนั้นจะเจริญเติบโตในดินที่ระดับน้ำตั้งแต่ 50 – 150 เซนติเมตร ออกซิเจนนั้นจะถูกถ่ายเทจากบรรยากาศเข้าสู่พืชโดยทางใบและทางลำต้นแล้วผ่านลงไปยังราก โดยการแพร่ (diffusion) และการพัดพาของอากาศ (convective) ซึ่งออกซิเจนส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาทางรากสู่บริเวณรอบๆลำต้นได้ดิน ทำให้บริเวณนั้นเกิดสภาพมีออกซิเจน จึงช่วยให้การย่อยการย่อยสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียที่ใช้อากาศได้ดีขึ้น ภาพที่ 10 แสดงถึงการส่งผ่านออกซิเจนของพืชมายังบริเวณราก ส่วนตารางที่ 4 นั้น เป็นข้อมูลของปริมาณออกซิเจนที่ส่งผ่านมายังรากพืชแต่ละชนิด



ภาพที่ 10 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา: (กรมควบคุมมลพิษ , ม.ป.ป.)

ตารางที่ 4 ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายมายังรากพืช

ชนิดของพืช	ความยาวราก ,ม	ปริมาณออกซิเจนในราก , กรัม/ม ³ /วัน
กก	0.76	7.5
อ้อ	0.60	8.0
ชูปฤาญี	0.30	7.0

ที่มา: U.S.EPA (1993a) อ้างถึงโดย โสมนัส (2545)

ซึ่งหน้าที่ของพืชต่างๆไปในระบบบึงประดิษฐ์สามารถสรุปได้ดังนี้

พืชจะช่วยลดและกระจายความเร็วของกระแส น้ำ โดยความหนาแน่นของพืชจะช่วยทำให้น้ำไหลช้าลงและเกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการกักเก็บของน้ำช่วยให้เกิดการสัมผัสของน้ำเสียและพืชได้มากขึ้น

เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโต ลำต้นและใบของพืชที่เจริญในน้ำจะเป็นพื้นที่ให้เกิดแผ่นฟิล์มชีวภาพจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ เนื้อเยื่อของพืชจะมีสาหร่ายที่สังเคราะห์แสงได้เกาะอยู่หนาแน่น รวมทั้งจุลินทรีย์และ โปรโตซัว เช่นเดียวกับรากและลำต้นใต้ดิน นอกจากนี้ยังมีใบโอฟิล์มที่เกาะกับซากพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในระบบบึงประดิษฐ์ เช่นเดียวกัน (สุวศา, 2544)

หน้าที่ในการใช้สารอาหารของพืชนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยพืชในระยะที่เจริญเติบโตเต็มที่ที่มีการสะสมธาตุไนโตรเจนมากกว่าต้นอ่อนถึง 2 เท่า คือเมื่อธาตุไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ จะมีกระบวนการสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสียคือ การนำไปใช้ในการเติบโตและการสะสมในพืช ส่วนธาตุฟอสฟอรัสนั้นพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโตเช่นกันแต่ในปริมาณที่น้อยน้อยมากและในทางกลับกันกับไนโตรเจนพืชที่เจริญเติบโตเต็มที่นั้นจะมีการสะสมฟอสฟอรัสต่ำกว่าในต้นอ่อน ดังตารางที่ 5 แสดงความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช

ตารางที่ 5 แสดงความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช

พืช	อัตราการนำไปใช้ (กก./ตร.ม./ปี)		ส่วนประกอบในเนื้อเยื่อ (กรัม/กก.)		อัตราการเติบโต (ตัน/ตร.ม./ปี)
	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: Ujang and Henze ,(2006)

5. เกณฑ์ในการออกแบบ

พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการออกแบบเบื้องต้นสำหรับระบบบึงประดิษฐ์มีดังนี้ Hydraulic retention time, Basin depth, Basin geometry (width and length) , BOD5 loading rate. And Hydraulic – loading rate ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ที่ใช้โดยทั่วไปของระบบบึงประดิษฐ์มีเกณฑ์กำหนดดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 เกณฑ์การออกแบบสำหรับระบบบึงประดิษฐ์

รายการที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	ประเภทของระบบบึงประดิษฐ์	
		FWS	SFS
ระยะเวลาเก็บกัก	d	4 – 15	4 – 15
ระดับน้ำ	m	0.1 – 0.6	0.3 – 0.8
อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์	kg/(ha d)	< 68	< 68
อัตราการชะลยศาสตร์	m ³ /(m ² d)	0.014 – 0.047	0.014 – 0.047
พื้นที่ผิวจำเพาะ	ha/(10 ³ m ³ d)	2.14 – 7.16	2.14 – 7.16

ที่มา: Metcalf and eddy (1991)

ตารางที่ 7 ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์

รายการที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	FWS	SFS
อัตราการสารอินทรีย์	Kg BOD / (ha d)	< 112	< 150 (โดยทั่วไป <80)
อัตราการชะลยศาสตร์	cm / d	1.2 – 4.7*	< 5*
		1.9 – 9.4 **	< 20**
ระยะเวลาเก็บกัก	d	5 – 15	< 5
อัตราส่วนความยาว: ความกว้าง	-	> 10: 1	3:1 (ใช้น้อยกว่า 1:1 ได้)
ความหนาของตัวกลาง	cm	20-30	60-80
ความลาดชัน	%	0.5	1
ความพรุนของตัวกลาง	-	-	0.3 – 0.45
ความหนาของวัสดุกันซึม	mm	-	0.5 – 1.0

ที่มา: Reed et al. (1998); Watson and Hobson (1989); Cooper *et al.* (1996)

หมายเหตุ : * ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สอง

** ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สาม

ตารางที่ 8 ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลที่ควรทราบ	รายละเอียด
1.ชนิดของชั้นดิน	ควรเป็นดินประเภทที่ให้น้ำไหลผ่านซึมลงดินได้ช้า
2.เทคนิคการกระจายน้ำเสีย	ใช้หัวกระจายน้ำเสียหรือท่อเจาะรูด้านข้างเพื่อกระจายน้ำเสีย
3.ภาระปริมาณน้ำเข้า	5 - 18 m ³ /yr
4.ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	20 – 66 m ² / (m ³ d)
5.ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ต้องการปลูกพืชบนพื้นที่ลาดเอียง
6.ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ควรมีระบบตกตะกอนขั้นต้นก่อนปล่อยลงบนพื้นที่และอาจเติมอากาศเล็กน้อยลงไปในน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าบึงประดิษฐ์ แต่ไม่ควรมีสาหร่ายเข้าระบบบึง
7.ความลาดของพื้นที่บำบัด	น้อยกว่าร้อยละ 5
8.การเก็บเกี่ยวพืชน้ำ	ไม่จำเป็นต้องทำ
9.การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย	จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ C/N ว่ามีเพียงพอหรือไม่ โดยทั่วไปควรมีมากกว่า 2 ต่อ 1 จึงสามารถกำจัดสารไนโตรเจนได้
10.ค่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าระบบ	เมื่อเป็นพืชที่จุ่มในน้ำจะมีประมาณ 5 – 45 g O ₂ /(m ² d)
11.ระบบป้องกันน้ำท่วม	ควรมีระบบป้องกันน้ำท่วมสำหรับบึงประดิษฐ์

ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2539)

7.1 การออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

พิจารณาระบบชลศาสตร์จากกฎของดาร์ซี (Darcy ' s Law) สำหรับการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง ซึ่งถือว่าในทางทฤษฎีอัตราการไหลในระบบคงที่ สมมติว่ามีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีการรั่วซึม แสดงดังสมการที่ 5 (U.S. EPA, 1993)

$$Q = K_s AS$$

สมการที่ (5)

เมื่อ Q = อัตราการไหลต่อเวลา, m^3 / d
 K_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ของพื้นที่หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, $m^3 / (m^2 d)$
 A = พื้นที่หน้าตัดรวมที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, m^2
 S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำต่อหนึ่งหน่วยความยาว (dh / dL), m/m
 h = ระดับน้ำ (m)
 L = ความยาว (m)

ถ้า Q ในสมการที่ (5) พิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย อัตราการไหลในระบบคำนวณได้จาก $[(Q_{in} + Q_{out})/2]$ หน่วย m^3 / d (U.S.EPA, 1993)

7.1.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด จากสมการที่ (5) ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่สภาวะอิมมูน่าได้จากสมการที่ (6) ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$A_c = \frac{Q}{K_s} \quad \text{สมการที่ (6)}$$

เมื่อ A_c = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ, m^2
 K_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ของพื้นที่หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, $m^3 / (m^2 d)$ ดูจากตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของลักษณะตัวกลางต่างๆ ในบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน

ชนิดตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์ (mm)	ความพรุน $\alpha, (\%)$	สภาพนำทางชลศาสตร์ $K_s (m^3 / m^2 d)$	K_{20}
ทรายละเอียดปานกลาง	1	0.42	420.6	1.84
ทรายหยาบ	2	0.39	480.1	1.35
กรวดหยาบ	8	0.35	500	0.86

ที่มา: Metcalf and Eddy (1991)

7.1.2 การคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกัก HRT จากสมการ First – order Plug Flow ในการกำจัดบีโอดีของระบบแบบน้ำไหลได้ผิวดินสามารถใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกัก ดังสมการที่ (7) (Metcalf and Eddy (1991)

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t') \quad \text{สมการที่ (7)}$$

โดยที่ C_e = ปริมาณ BOD₅ ในน้ำออกจากระบบ , mg / L
 C_o = ปริมาณ BOD₅ ในน้ำเข้าระบบ , mg / L
 K_T = อัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมินั้น ๆ , d⁻¹
 t' = ระยะเวลาเก็บกักน้ำขณะที่อยู่ในช่องว่างของตัวกลางตามทฤษฎี, d

$$\text{เมื่อ } K_T = K_{20}(\theta)^{(T-20)} \quad \text{สมการที่ (8)}$$

K_{20} = อัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ 20⁰ C , d⁻¹
 T = อุณหภูมิของน้ำในระบบ ,⁰ C

ผลจากสมการที่ (7) นี้ไม่สามารถใช้ออกแบบระบบที่ต้องการบำบัด BOD₅ สุดต่ำให้มีค่าน้อยกว่า 5 mg / L ได้ ส่วนในตารางที่ 10 ได้แนะนำอัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิ 20⁰ C จากตารางที่ 7) สำหรับระบบที่มีค่าอัตราการระสาดอินทรีย์ประมาณ 110 kg/ha d ดังนี้ (U.S.EPA , 1993)

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบอัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ 20 °C ในสมการ First – order สำหรับระบบการบำบัดแบบต่างๆ

ชนิดของระบบบำบัด	$K_{20}(d^{-1})$
ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน	1.104
ระบบบ่อบำบัดแบบกึ่งเติมอากาศ	0.117
ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน	0.501

ที่มา: U.S.EPA (1993)

จากสมการที่ 7)

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

สมการที่ (9)

เมื่อ t' = ระยะเวลาเก็บกักน้ำขณะที่อยู่ในช่องว่างของตัวกลางตามทฤษฎี, d

L = ความยาวของบ่อ, m

W = ความกว้างของบ่อ, m

α = ความพรุน, %

d = ความลึกของบ่อ, m

ส่วนระยะเวลาเก็บกักที่เกิดขึ้นจริงเป็นไปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$t = \frac{L}{KsS}$$

สมการที่ (10)

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้ฝายนํ้าดินในการควบคุมการไหลให้ส่วนก้นบ่อมีความลาดของบ่อประมาณร้อยละ 1 เพื่อให้ น้ำ ไหลลงโดยไม่มีการขังเกิดขึ้น ส่วนก้นบ่อบริเวณปลายท้ายน้ำของบ่อจะมีที่รับน้ำออกจากระบบบึงประดิษฐ์ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการถูกรบกวนของตัวกลางและชั้นของรากพืช และเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการบำบัด ค่าความเร็วของการไหลของน้ำที่ผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 m/d (Reed *et al.*, 1988)

7.1.3 การออกแบบความลึกของบ่อ ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินความลึกของบ่อถูกควบคุมโดยชนิดของพืชที่ใช้ในระบบเพื่อให้สอดคล้องกันระหว่างความสูงของน้ำกับปริมาณออกซิเจนที่รากพืชใช้ในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าที่แนะนำในการออกแบบความลึกของบ่อสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน

ชนิดของพืช	ความลึกของบ่อ , cm
กกสามเหลี่ยม	76
อ้อ	60
ธูปฤาษี	30

ที่มา: Reed *et al.* (1988)

7.1.4 การออกแบบขนาดของบ่อ เมื่อรู้ข้อมูลหน้าตัดของบ่อ (A_c) และความลึกของบ่อจากการคำนวณข้างต้นแล้ว สามารถคำนวณความกว้างของบ่อจากสมการที่ 11 ได้ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$W = \frac{A_c}{D} \quad \text{สมการที่ (11)}$$

เมื่อคำนวณความกว้างของบ่อแล้วนำค่าความลึกของบ่อ (d) และความกว้างของบ่อ (W) ไปคำนวณหาค่าความยาวของบ่อ (L) จากสมการที่ 9 ก็จะได้ขนาด กว้าง ยาว สูง ของบ่อ

5. ข้อดีและข้อเสียของระบบบึงประดิษฐ์

5.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (SFS)

5.1.1 ข้อดี

- 1) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ค่าบำรุงรักษาระบบต่ำเช่นกัน ขณะที่น้ำทิ้งที่ออกมามีคุณภาพของน้ำทิ้งที่ดีเมื่อเทียบกับระบบอื่นที่ค่าใช้จ่ายสูงกว่า
- 2) การบำบัดขั้นที่ 2 ระบบจะทำงานได้ดีในทุกสภาพอากาศตลอดทั้งปี ยกเว้นสภาพอากาศที่หนาวระบบจะมีประสิทธิภาพลดลง
- 3) การบำบัดขั้นที่ 3 ระบบจะทำงานได้ดีในอากาศแบบร้อนชื้น และระบบบึงประดิษฐ์แบบ SFS นี้จะป้องกันความร้อนได้ดีกว่าระบบแบบไหลผิวดิน (FWS)
- 4) การบำบัดด้วยระบบแบบไหลใต้ผิวดินจะไม่เกิดตะกอนหลงเหลือในระบบ หลังจากผ่านการบำบัดด้วยระบบนี้
- 5) ระบบนี้ให้ผลการบำบัดโดยไม่มีปฏิกิริยาอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อวิธีการทดลอง
- 6) มีกลไกในการบำบัดและการทำงานที่ไม่สลับซับซ้อน จึงไม่จำเป็นต้องมีผู้ควบคุมที่ชำนาญมากก็ได้
- 7) ไม่มีปัญหาของแมลงและยุงที่เป็นพาหะ

5.1.2 ข้อเสีย

- 1) ใช้พื้นที่มากเพื่อให้กลไกการบำบัดเกิดขึ้นได้ดี
- 2) ในสภาพอากาศที่หนาวอัตราการกำจัด สารอินทรีย์ แอมโมเนีย และไนเตรท จะลดลง
- 3) ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ตัวกลางเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างของระบบสูงขึ้นกว่าแบบน้ำไหลผิวดิน
- 4) ปฏิกิริยาในระบบเป็นแบบต่อเนื่อง การกำจัดสารอินทรีย์ หรือไนโตรเจนเกิดขึ้นได้ดี แต่ ฟอสฟอรัสหรือโลหะหนักการกำจัดออกจากระบบอาจจะต้องใช้เวลา

5.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลผิวดิน (FWS)

5.2.1 ข้อดี

- 1) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ต้นทุนและการบำรุงรักษาน้อยกว่าระบบบำบัดวิธีอื่น
- 2) การบำบัดขั้นที่ 2 ระบบจะทำงานได้ดีในทุกสภาพอากาศแต่ในสภาพอากาศเย็น ประสิทธิภาพการทำงานจะลดลง ส่วนการบำบัดขั้นที่ 3 หรือการบำบัดขั้นสูง ระบบจะทำงานได้ดีในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น
- 3) เป็นการเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้มากขึ้น เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ได้
- 4) ระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS เป็นระบบที่ไม่เหลือของแข็งและกากตะกอนทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการกำจัดกากตะกอน
- 5) เป็นระบบที่การทำงานไม่ยุ่งยากซับซ้อน ไม่ต้องอาศัยผู้ควบคุมที่มีความรู้ความชำนาญมากในการดูแลระบบ

5.2.2 ข้อเสีย

- 1) ใช้พื้นที่มากเพื่อให้กลไกการบำบัดเกิดขึ้นได้ดี โดยเฉพาะการจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส
- 2) ในสภาพอากาศที่หนาวอัตราการกำจัด สารอินทรีย์ แอมโมเนีย และไนเตรท จะลดลง ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจะต้องเพิ่มระยะเวลาให้นานขึ้น
- 3) ปฏิกริยาในระบบเป็นแบบต่อเนื่อง การกำจัดสารอินทรีย์ หรือไนโตรเจนเกิดขึ้นได้ดี แต่ ฟอสฟอรัสหรือโลหะหนักการกำจัดออกจากระบบอาจจะต้องใช้เวลานาน
- 4) ปัญหาของแมลงและยุงที่จะเป็นพาหะทำให้เกิดโรคติดต่อได้
- 5) ปริมาณน้ำที่ขังในระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผิวดินจะเกิดปฏิกริยา Anoxic เป็นพื้นฐานในระบบนี้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการเกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชันของแอมโมเนีย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การศึกษาทดลองครั้งนี้ได้ทำการสร้างบ่อจำลองการทดลอง Pilot – scale Study ของระบบ บึงประดิษฐ์ 2 ชนิดไหลต่อเนื่องกันคือ แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (HSF) และแบบน้ำไหล ผิวดิน (FWS) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากหอพักนิสิตหญิงและ หอพักบุคลากร โดยใช้พืชสองชนิดทำงานร่วมกันคือ กกลังกา สำหรับบ่อแบบน้ำไหลใต้ผิวดินและ บัวหลวงสำหรับบ่อแบบน้ำไหลผิวดิน โดยระบบบ่อการทดลองจะประกอบด้วย บ่อทดลองหลักและ บ่อควบคุมการทดลอง (ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช) เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน รวมชุดการทดลอง ทั้งหมดเป็น 3 ชุดการทดลอง โดยบ่อทดลองหลักและบ่อควบคุมการทดลองนั้นจะแตกต่างกันใน ด้านความยาว แต่สิ่งที่ควบคุมให้เท่ากันคือระยะเวลาเก็บ (detention time) ที่ 3 วัน โดยที่บ่อ ทดลองหลักนั้นจะมีอัตราการทางชลศาสตร์ที่ 0.36 cm/d และ 0.18 cm/d สำหรับบ่อควบคุม

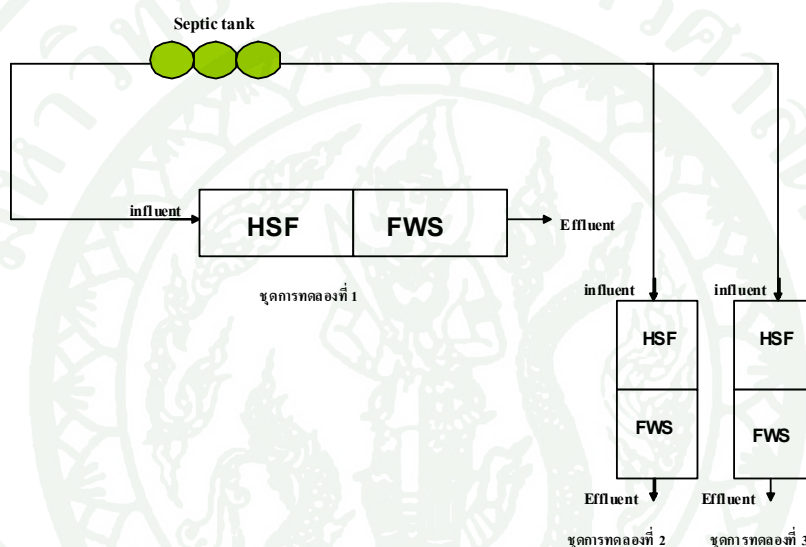
1. น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

ตารางที่ 12 ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	หน่วย	ช่วงค่า	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
PH	-	6.45 – 7.08	0.17
COD	mg/L	133 -298	42.35
BOD	mg/L	48-120	18.76
NH ₃ -N	mg/L	8.75-75.88	16.03
NO ₃ -N	mg/L	0.029-1.089	0.25
TKN	mg/L	25.2-55.6	11.42
P	mg/L	0.767-2.284	0.46
TSS	mg/L	24-288	69.66

2. แบบจำลอง

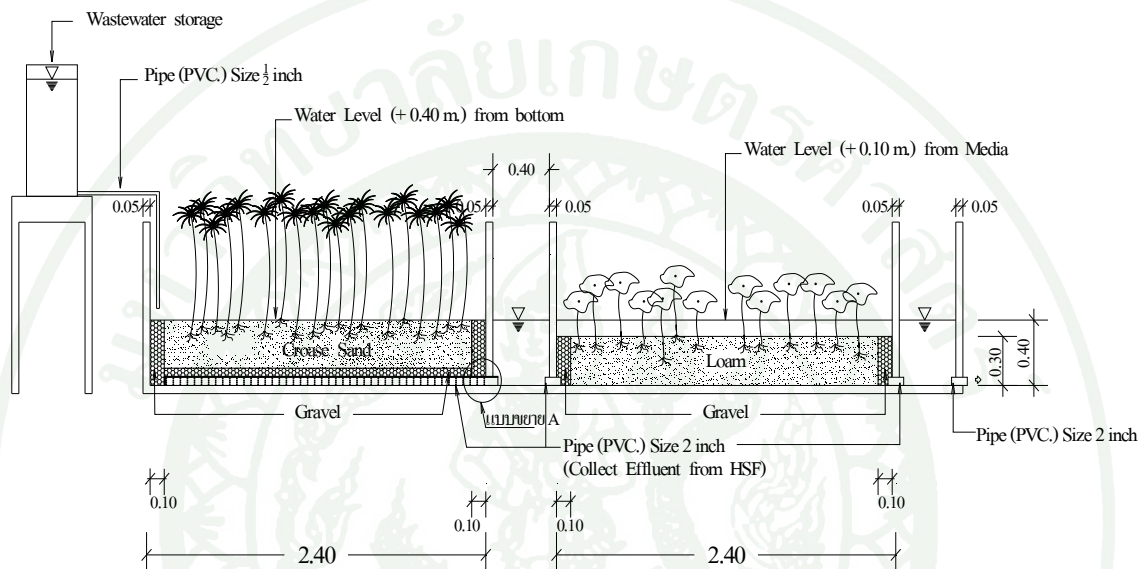
แบบจำลองที่ใช้เป็นระบบบึงประดิษฐ์จำนวน 6 บ่อ แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง โดยแต่ละชุดการทดลองนั้นประกอบด้วย บ่อไฮโดรฟิวดิน (HSF unit) และบ่อไฮโดรฟิวดิน (FWS unit) ไหลต่อเนื่องกัน โดยให้ชุดการทดลองที่ 1 เป็นบ่อทดลองหลัก ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นบ่อควบคุมการทดลอง (ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช) ดังแสดงในภาพที่ 11



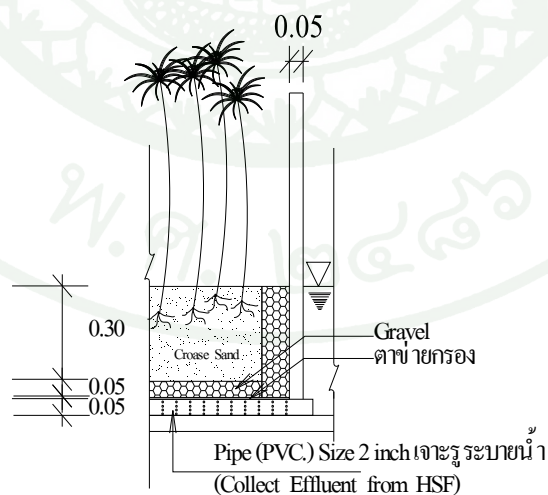
ภาพที่ 11 แผนผังระบบบ่อทดลอง

ลักษณะของบ่อทดลองเป็นบ่อคอนกรีตทั้งหมด สำหรับชุดการทดลองที่ 1 บ่อทดลองหลัก นั้นมีขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 2.4 เมตร และสูง 1 เมตร โดยบ่อที่เป็นระบบ HSF นั้นชั้นของตัวกลางมีความลึก 0.40 เมตร และมีระดับน้ำ 0.40 เมตร จากระดับก้นบ่อ ส่วนบ่อที่เป็นระบบ FWS นั้นมีความลึกของชั้นตัวกลาง 0.30 เมตร และมีความลึกของระดับน้ำ 0.10 เมตร จากผิวบนของตัวกลาง ตัวกลางที่อยู่ในบ่อของระบบ HSF นั้น ใช้ทรายหยาบเป็นชั้นของตัวกลางการใส่ทรายเข้าไปในระบบประโยชน์เพื่อการกรองและเพื่อการปลูกพืช ทรายที่ใส่นั้นไม่ต้องทำการบดอัดหรือกระทุ้งแน่นแต่อย่างใด แหล่งทรายนั้น จากร้านวัสดุก่อสร้าง อ. เมือง จ. สกลนคร ที่ก้นบ่อใช้กรวดที่มีขนาดคละ 10 –20 มิลลิเมตร และ 20-40 มิลลิเมตร รองที่ก้นบ่อเพื่อเป็นการป้องกันชั้นของทรายไหลเข้าไปอุดตันในท่อ ตัวกลางที่อยู่ในบ่อของระบบ FWS นั้นใช้ดินร่วน จากหนองหาร

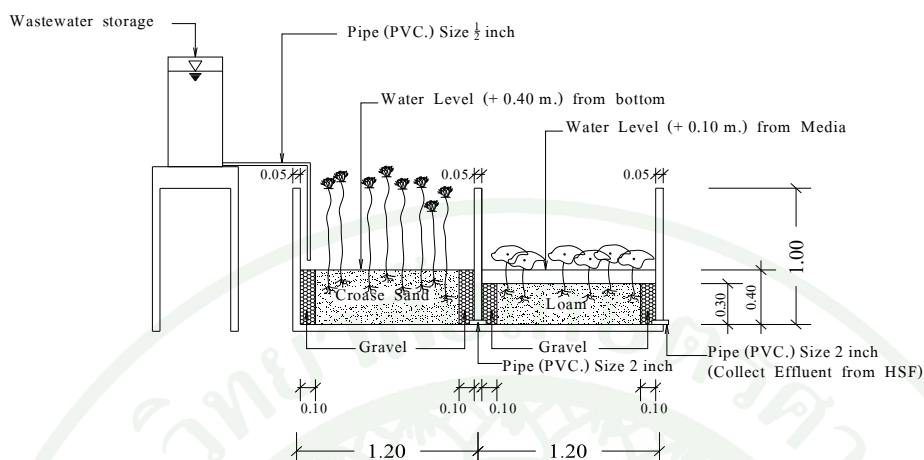
จังหวัดสกลนคร ซึ่งเป็นดินที่อยู่ในท้องถิ่นและเหมาะแก่การเจริญเติบโตของบัว บริเวณปากทางเข้า-ออกของระบบจะใส่กรวดขนาด 30 – 60 มิลลิเมตรเข้าไปเพื่อทำการกระจายแรงของน้ำ และรวมน้ำเวลาน้ำออกจากระบบด้วย ภาพที่ 12 , 14 และ 15 แสดงภาพด้านข้างของทั้ง 3 ชุดการทดลอง



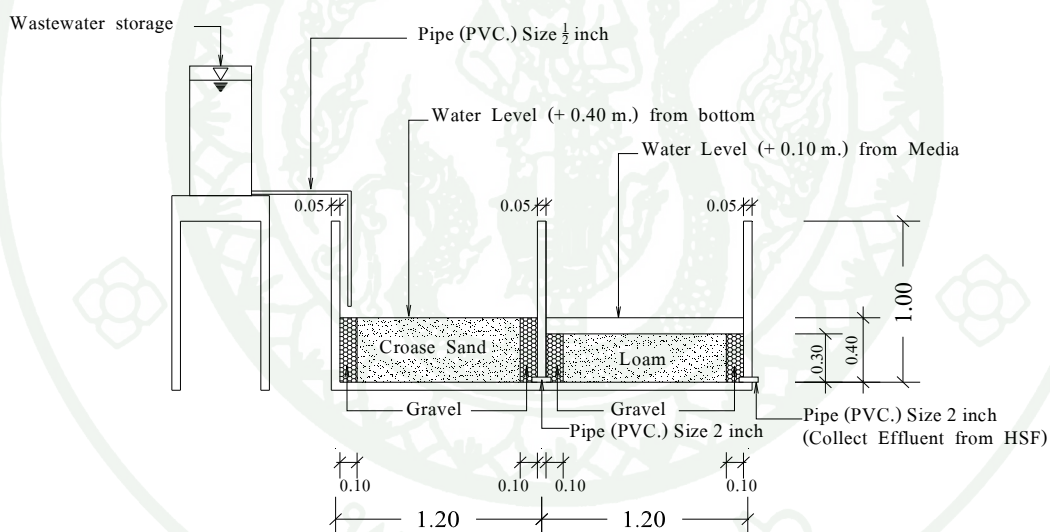
ภาพที่ 12 แสดงภาพด้านข้างของบ่อดูดหลัก (ชุดการทดลองที่1)



ภาพที่ 13 แสดงภาพชั้นดินของบ่อดูดหลัก (ชุดการทดลองที่1)



ภาพที่ 14 แสดงภาพด้านข้างของบ่อควบคุมทดลองปลูกพืช (ชุดการทดลองที่ 2)



ภาพที่ 15 แสดงภาพด้านข้างของบ่อควบคุมทดลองไม่ปลูกพืช (ชุดการทดลองที่ 3)

3.ระบบท่อ

ท่อน้ำเข้าของระบบ HSF นั้นเป็นท่อพีวีซี (PVC) ขนาด ½ นิ้ว เจาะรูขนาด 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรูเจาะ 5 เซนติเมตร ความยาวท่อน้ำเข้ามีขนาดตามความกว้างของบ่อโดยวางพาด

ตรงขอบบ่อทางเข้า ส่วนทางน้ำเข้าของระบบ FWS นั้นจะรับน้ำจากส่วนล่างที่ไหลออกจากบ่อ HSF ในส่วนนี้จะใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว

ท่อรับน้ำของระบบ HSF นั้น ในส่วนของก้นบ่อ จะใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว เจาะรูขนาด 0.5 เซนติเมตร โดยท่อรับน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นก้างปลา วางที่ก้นบ่อรวบรวมน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวกลาง ก่อนจะส่งออกไปที่ปลายบ่อเพื่อเข้าสู่ระบบ FWS ต่อไป ที่ปลายท่อน้ำออกของระบบ FWS นั้น ใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว รับน้ำออกจากบ่อ โดยที่ท่อน้ำออกจะทำการติดตั้งวาล์วเอาไว้ด้วย

ระบบท่อของบ่อควบคุมการทดลองจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับบ่อทดลองหลัก จะต่างกันที่ตรงท่อรวบรวมน้ำนั้นจะไม่มีเนื่องจากว่าขนาดของบ่อที่สั้นกว่าระบบบ่อทดลองหลักครึ่งหนึ่ง ระยะทางน้ำจะไหลไปยังทางออกนั้นจะสั้นกว่า จึงไม่ทำการติดตั้งท่อรวบรวมน้ำเสีย โดยลักษณะของระบบท่อทั้งหมดแสดงไว้ดังภาพที่ 16



(ก)



(ข)

ภาพที่ 16 ลักษณะโครงข่ายท่อด้านล่างของระบบบ่อ HSF (ก) และ ลักษณะท่อน้ำเข้า (ข)

4.ระบบจ่ายน้ำ

น้ำเสียจะถูกดูดขึ้นมาจากถังพักน้ำเสียของหอพักเข้าสู่ถังเก็บน้ำเสียของระบบ โดยมีการจ่ายน้ำไปยังบ่อทดลองต่างๆ โดยแบ่งเป็น บ่อทดลองหลัก 400 ลิตร บ่อควบคุมการทดลอง 200 ลิตร ทั้งนี้ทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ การสูบน้ำเสียจากถังพักมายังถังเก็บน้ำเสียของระบบนั้นจะทำการควบคุมโดยใช้สวิชต์กลอยควบคุมการ เปิด-ปิด เพื่อรักษาระดับน้ำในถังให้คงที่ น้ำที่ปล่อยจากถังเก็บน้ำเสียนั้นจะถูกปล่อยให้ไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) ภาพที่ 17 แสดงลักษณะถังเก็บน้ำของระบบทั้งหมด



ภาพที่ 17 ระบบจ่ายน้ำและถังเก็บน้ำ

5. พืชที่นำมาทดลอง

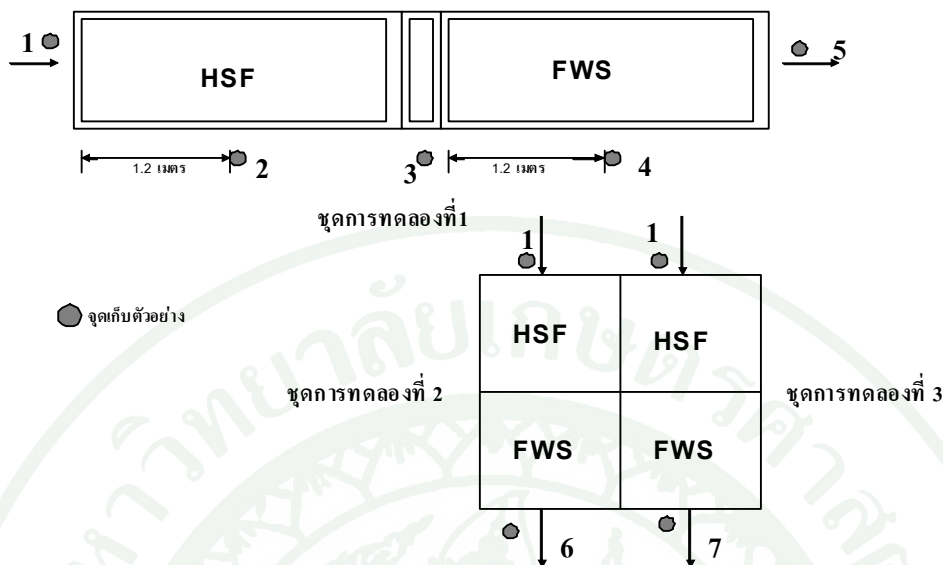
พืชที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ กกลังกาและบัวหลวง โดยพืชแต่ละชนิดนั้นจะคัดเลือกต้นที่มีอายุใกล้เคียงกันมาทำการทดลอง โดยความหนาแน่นของพืชเริ่มต้น 15 ต้น/ตารางเมตร (จิตติมา, 2004) โดยกกลังกานั้นจะใช้เหง้าที่เพิ่งแตกหน่อใหม่มาทำการตัดใบทิ้งเพื่อลดการคายน้ำของพืช ส่วนบัวหลวงนั้นจะคัดเลือกต้นอ่อนที่แตกยอดใหม่ โดยพืชทั้งสองชนิดนี้จะนำลงปลูกในบ่อทดลองเลย แต่ในระยะแรกจะทำการให้น้ำประปาเข้าในระบบก่อนแล้วจากนั้นจะค่อยๆปรับความเข้มข้นจนพืชเริ่มตั้งตัวได้จึงเดินระบบเพื่อทำการทดลอง จากภาพที่ 18 แสดงลักษณะต้นอ่อนของบัวหลวงและกกลังกา



ภาพที่ 18 ต้นอ่อนบัวหลวงและกกลังกา

6. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำ

ใช้ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่างน้ำตามจุดต่างๆครั้งละประมาณ 1500 มิลลิลิตร โดยการเก็บจะใช้สายยางดูดเก็บจากบ่อ รายละเอียดของจุดเก็บตัวอย่าง ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 รายละเอียดตำแหน่งและจุดเก็บตัวอย่างน้ำของระบบ

วิธีการ

1. การทดลองนี้ทำการก่อสร้างบ่อทดลองขนาด กว้าง 1.20 เมตร ยาว 2.4 เมตร และมีความสูง 1.0 เมตร ขนาดสองบ่อต่อกัน โดยบ่อแรกเป็นระบบแบบไหลใต้ผิวดิน (HSF) และบ่อที่สองเป็นระบบไหลตามผิวดิน (FWS) แต่ละบ่อนั้นจะมีช่องทางออกของน้ำขนาด 1.20×0.40 เมตร โดยบ่อทดลองนี้ก่อสร้างด้วยอิฐบล็อก ด้านในฉาบด้วยปูนขัดมันเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยทั้งสองบ่อนี้ใช้ผนังทางด้านกว้างร่วมกัน 1 ด้าน โดยชั้นกรองของระบบไหลใต้ผิวดินนั้นใช้ทรายหยาบเป็นตัวกลาง ความหนาของชั้นกรอง 0.40 เมตร ทางน้ำเข้า – ออกนั้นใช้กรวดเป็นตัวกลางในการกระจายน้ำเสียเข้าและรับน้ำเสียออก โดยกรวดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ส่วนบ่อที่เป็นระบบแบบไหลผิวดินนั้นจะใช้ดินร่วนเป็นชั้นของตัวกลาง โดยมีความหนา 0.30 เมตร ส่วนบ่อควบคุมการทดลองมี 4 บ่อ ขนาด $1.20 \times 1.20 \times 1.0$ เมตร แบ่งเป็นระบบไหลใต้ผิวดิน 2 บ่อและระบบไหลผิวดิน 2 บ่อ ตัวกลางนั้นใช้ชนิดเดียวกันกับระบบบ่อทดลองหลัก

2. การเตรียมบ่อทำการทดลองและพื้นที่ทำการทดลองให้เหมาะสม โดยชุดการทดลองที่ 1 นั้น เป็นระบบไหลใต้ผิวดินจะทำการปลูกกกและบัวหลวง ส่วนชุดการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นบ่อควบคุม (Control Pond) ปลูกพืช และไม่ปลูกพืช ตามลำดับ

3. การเติมน้ำเสียลงในบ่อทดลองนั้น ในส่วนของการทดลองช่วงแรกจะมีการเติมน้ำเสียเข้าบ่อตลอดเวลาซึ่งจะควบคุมอัตราการไหลลงสู่บ่อทดลองแต่ละบ่อประมาณ 0.4 ลูกบาศก์เมตร/วัน (400 ลิตร/วัน) ส่วนในช่วงที่ 2 หลังจากเก็บตัวอย่างและทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะ steady state แล้ว จะทำการดูแลแนวโน้มของระบบโดยทำการเพิ่มอัตราการไหล เป็น 800 ลิตร/วัน 1200 ลิตร/วัน และ 1600 ลิตร/วัน ตามลำดับ ซึ่งจะทำการทดลองต่อจากการเดินระบบปกติ โดยไม่มีการเปลี่ยนชั้นของตัวกลางและพืช

4. เก็บตัวอย่างน้ำหลังจากปล่อยน้ำเสียลงไปแล้ว 2 วัน ความถี่ในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์นั้นทุก 7 วัน เป็นระยะเวลา 17 สัปดาห์ รวมเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 17 ครั้ง (การเดินระบบปกติ) ส่วนการทดลองช่วง 2 การเก็บตัวอย่างจะเก็บเพื่อเป็นการดูแลแนวโน้มระยะเวลาการเก็บจะไม่เท่าการเดินระบบปกติที่ 400 ลิตร/วัน

5. การเตรียมพืชที่ใช้ในการทดลอง โดยจะคัดเลือกพืชที่มีอายุใกล้เคียงกันมาทำการทดลอง

6. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพื่อนำมาเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อไป

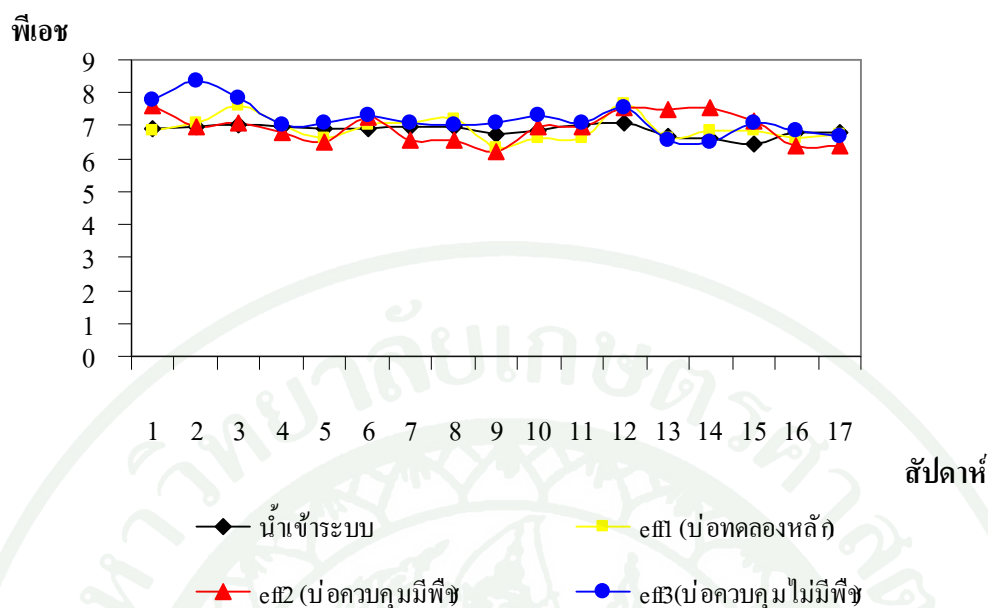
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. คุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์

การศึกษาทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (HSF) ร่วมกับระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผิวดิน (FWS) ต่อเนื่องกัน กำหนดรูปแบบการไหลให้เป็นแบบ Plug flow โดยพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดในระบบเป็น กก ลำงาและบัวหลวง การศึกษาครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง โดย ชุดการทดลองที่ 1 นั้น กำหนดให้เป็นบ่อทดลองหลัก ส่วนชุดการทดลองที่ 2 และ 3 นั้นกำหนดให้เป็นบ่อควบคุม การทดลองซึ่งในการทดลองช่วงแรก ทำการเก็บตัวอย่างและทดสอบระบบเป็นระยะเวลา 17 สัปดาห์ (ตั้งแต่ 20 เมษายน ถึง 10 สิงหาคม 2552) โดยจะทำการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ ระบบในอัตรา 400 ลิตรต่อวันคิดเป็น Hydraulic Loading rate (HLR) เป็น $0.347 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$ (สำหรับชุดการทดลองที่ 1) และ 200 ลิตรต่อวันคิดเป็น Hydraulic Loading rate (HLR) เป็น $0.174 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$ (สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3) โดยทั้งหมดนี้มีระยะเวลาการกักเก็บที่เท่ากันคือ 3 วัน ส่วนช่วงที่ 2 ของการทดลองทำการเพิ่มอัตราการไหลให้แก่ชุดการทดลองที่ 1 อย่างเดียวเพื่อดูแนวโน้มของระบบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นและระยะเวลาการกักเก็บที่สั้นลง ระบบยังสามารถทำงานได้หรือไม่ ซึ่งผลการทดลองในการวิเคราะห์พารามิเตอร์มีรายละเอียดดังนี้

1. พีเอช (pH)

พีเอชเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญมากของน้ำ ที่สามารถวัดได้ง่ายและมีบทบาทสำคัญไม่มากนักน้อยต่อกระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางด้านน้ำดีและน้ำเสีย ในทางปฏิบัติถือว่าพีเอชของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 14-0 น้ำที่เป็นกลางถือว่าพีเอชเท่ากับ 7 น้ำที่เป็นกรดและด่างถือว่าพีเอชน้อยกว่าหรือมากกว่า 7 ตามลำดับ น้ำธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ใกล้เคียงกับ 7 แต่น้ำใต้ดินอาจมีพีเอชเป็นกรด เช่นต่ำกว่า 6 เป็นต้น



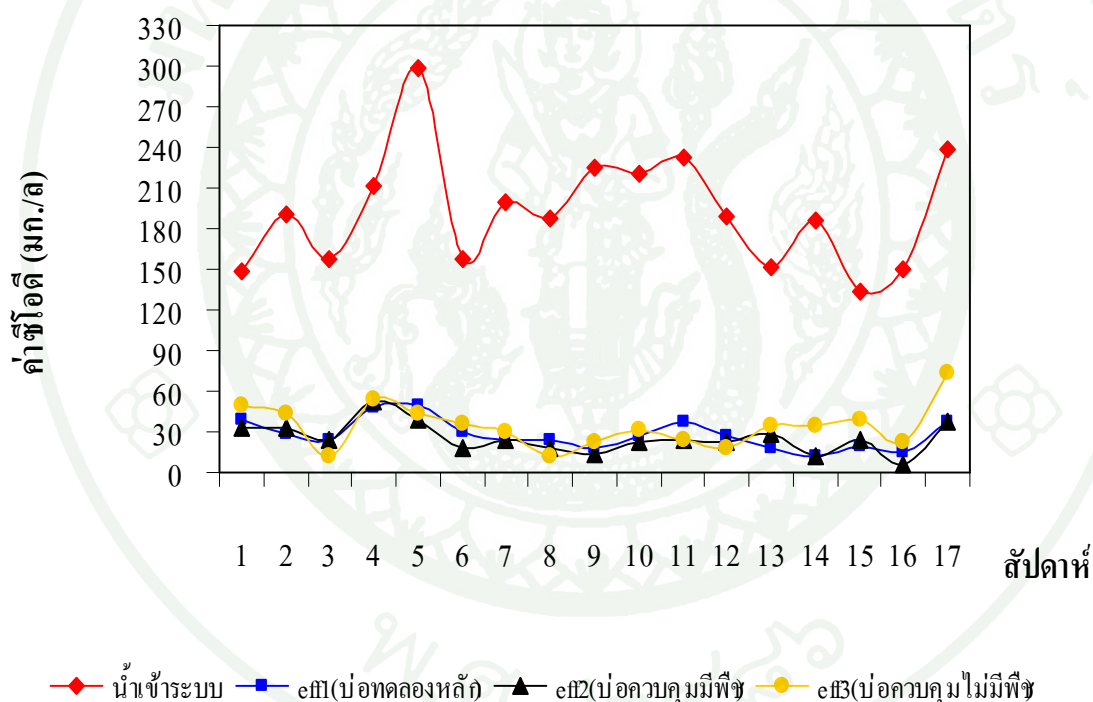
ภาพที่ 20 ค่าพีเอชของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

จากภาพที่ 20 น้ำเสียที่สูบเข้าสู่ระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.86 ± 0.17 ส่วนน้ำทิ้งที่ออกจากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 นั้น มีค่าพีเอชเฉลี่ย 6.91 ± 0.35 , 6.94 ± 0.45 และ 7.19 ± 0.48 ตามลำดับ โดยค่าพีเอชในแต่ละบ่อนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และบ่อที่ 3 มีค่าพีเอชมากที่สุด จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าน้ำเสียที่จุดทางออกของทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าพีเอชสูงกว่าน้ำเข้าระบบในบางเวลา ซึ่งน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือไม่มีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไป พืชสามารถเติบโตได้ และน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อทั้ง 3 นั้น ก็อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนที่ พีเอช อยู่ในช่วง 5-9 (กรมควบคุมมลพิษ)

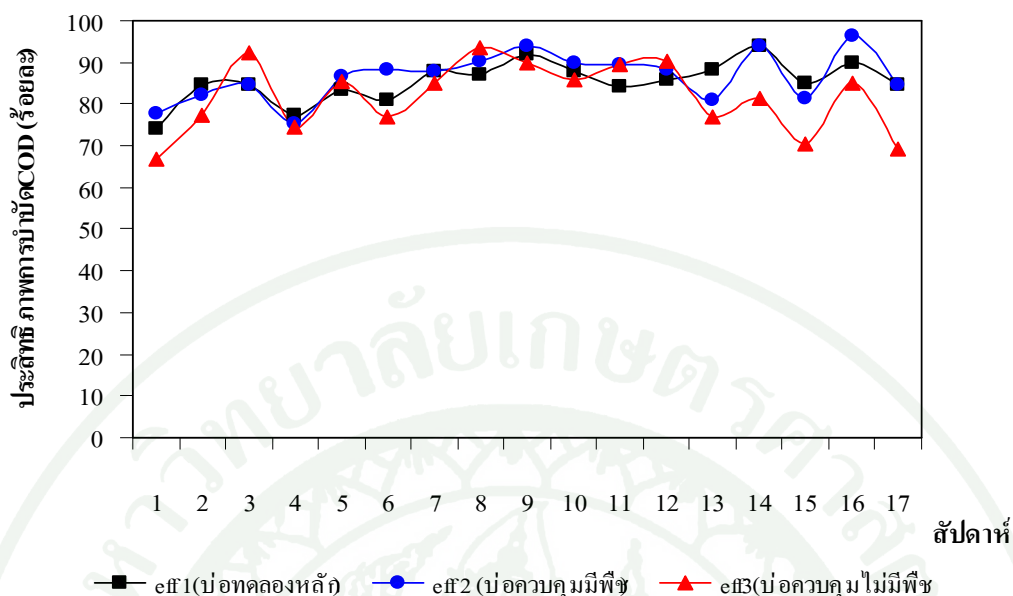
2. ซีโอดี

ค่า ซีโอดี ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 197.71 ± 42.35 มก./ล. ส่วนค่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบของชุดการทดลอง 1, 2 และ 3 นั้นมีค่า 28.11 ± 10.96 มก./ล. 25.51 ± 11.25 มก./ล. และ 34.30 ± 15.84 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าบ่อทดลองที่มีการปลูกพืช (ชุดการทดลองที่ 1 และ 2) จะมีค่าซีโอดี ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าต่างจาก บ่อควบคุม (บ่อที่ 3 ไม่มีพืช) เล็กน้อย โดยทั้ง 3 นั้นคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมเป็นเฉลี่ยร้อยละ 85.42, 86.26 และ 83.72 ตามลำดับ

จากกราฟที่ 21 แสดงปริมาณซีโอดี และภาพที่ 22 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด กราฟจะมีลักษณะแปรปรวนในช่วงเริ่มต้น พอเริ่มเข้าสู่เดือนที่ 2 และ 3 นั้นค่าจะเริ่มคงที่ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ออกซิเจนของพืชในระบบ นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังสามารถลดลงได้โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บนบ่อหรือตามลำต้นและรากพืชด้วย (Guntenspergen et al,1989; Ready and D'Angelo,1970) ดังนั้นพืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จึงมีความสำคัญมากในการลดหรือกำจัดสารอินทรีย์ออกจากรากน้ำเสีย จากกราฟประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในช่วงเดือนที่ 3 นั้นจะมีการขึ้นลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ต้องมีการตัดและนำพืชออกจากระบบเป็นบางส่วนเพื่อลดความหนาแน่นของพืชที่มีมากเกินไปและนำไปใช้ประโยชน์



ภาพที่ 21 ค่าซีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

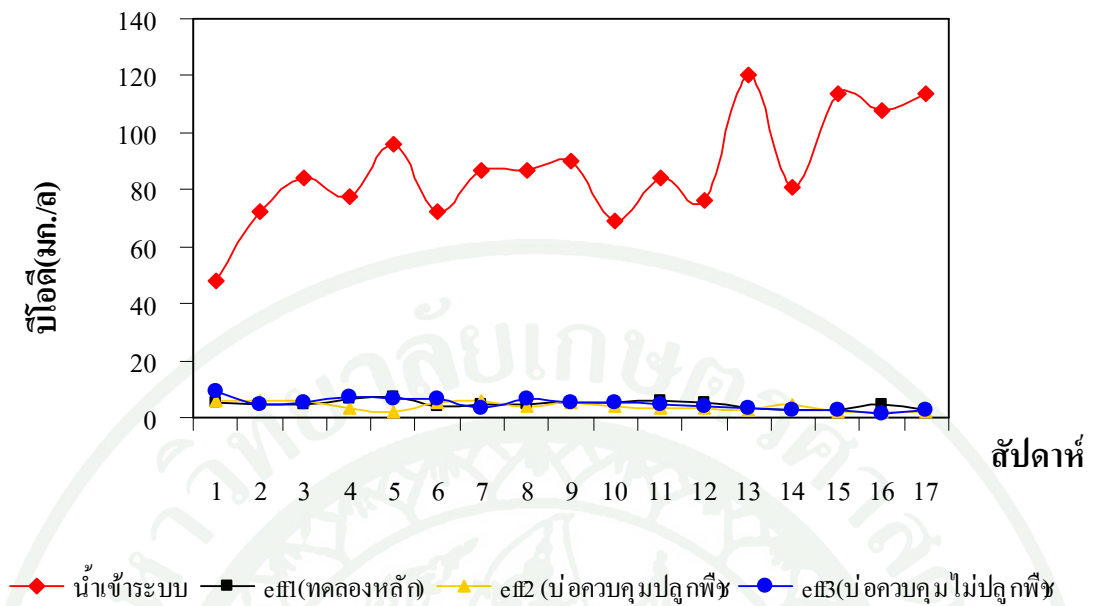


ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

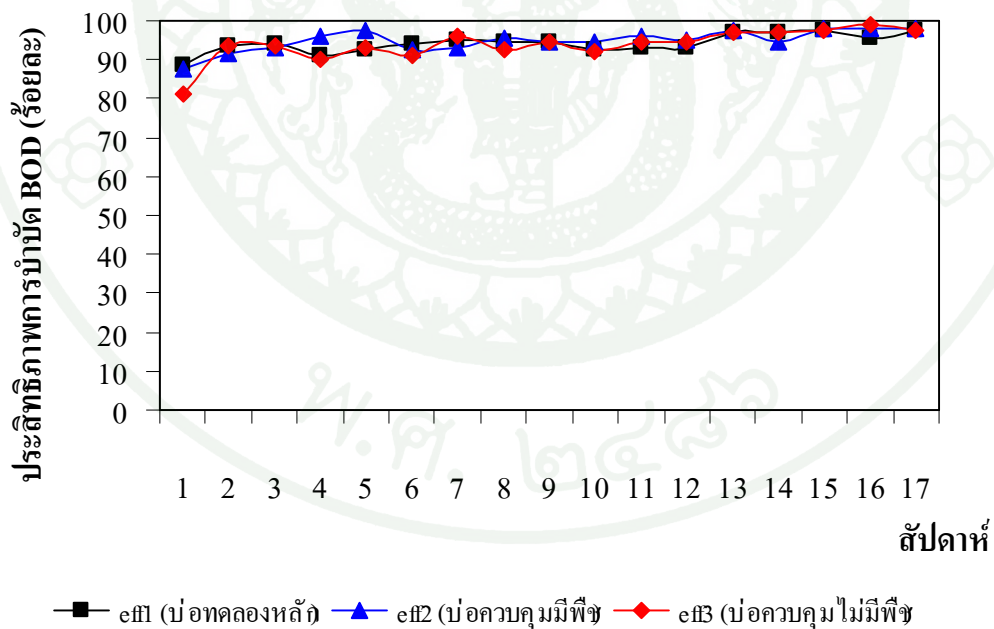
2. บีโอดี

ค่า BOD ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.03 ± 18.76 มก./ล. ส่วนค่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบของบ่อกดลองหลักนั้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.65 ± 1.32 มก./ล บ่อกวควบคุม (มีพืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 ± 1.48 มก/ล และบ่อกวควบคุม (ไม่ปลูกพืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 ± 2.04 มก./ล. จะเห็นได้ทั้ง 3 บ่อนั้นค่าปริมาณ BOD ที่ออกจากระบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากกราฟที่ 23 ปริมาณค่า BOD ตลอดการทดลองของบ่อด่างๆจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ความแปรปรวนของเส้นกราฟน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดค่า BOD ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากว่าสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบค่อนข้างที่ค่าจะน้อย สารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบนี้จะมีทั้งส่วนที่เป็นตะกอนและสารละลาย ในส่วนที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนและถูกกรองโดยชั้นของตัวกลาง ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบทั้งในส่วนที่ใช้และไม่ใช่ออกซิเจน น้ำเสียที่เข้ามาสู่ระบบนั้นมีปริมาณของสารอินทรีย์น้อยจึงทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้เกือบหมด

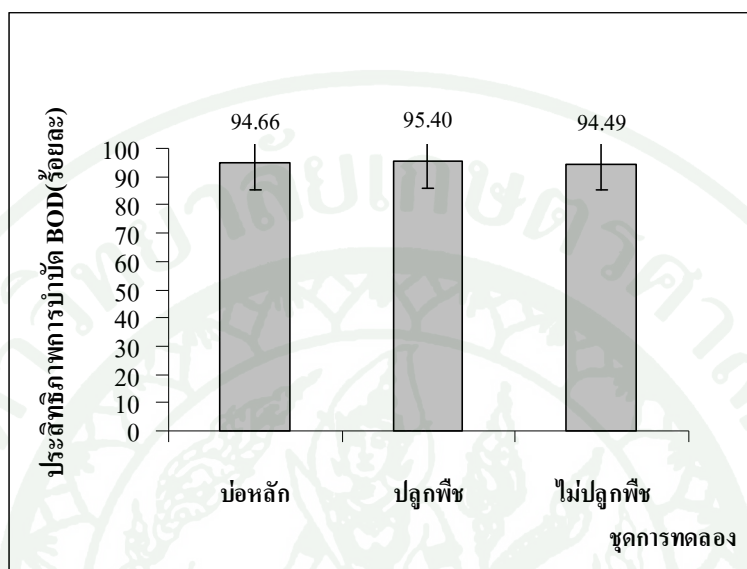


ภาพที่ 23 ค่าบีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

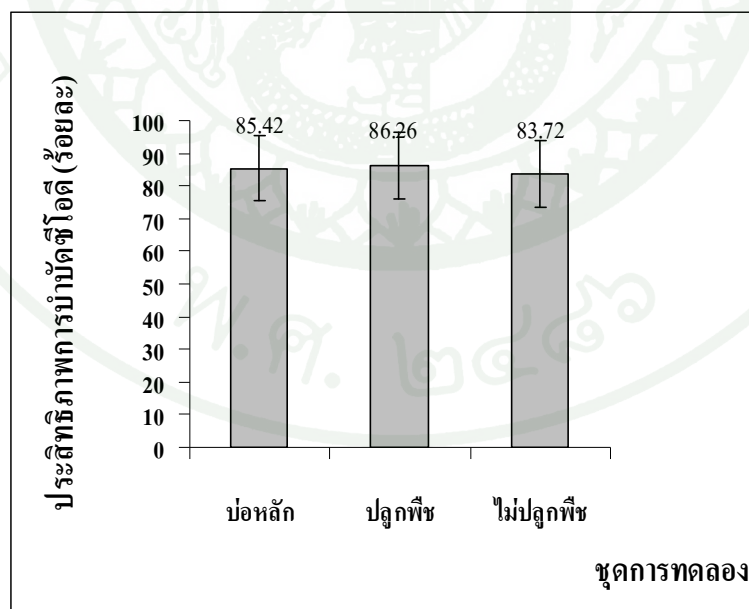


ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

แผนภูมิแสดงค่าการประสิทธิผลการบำบัดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีโดยเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลอง
เปรียบเทียบกัน ดังภาพที่ 25 และ 26



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ



ภาพที่ 26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ

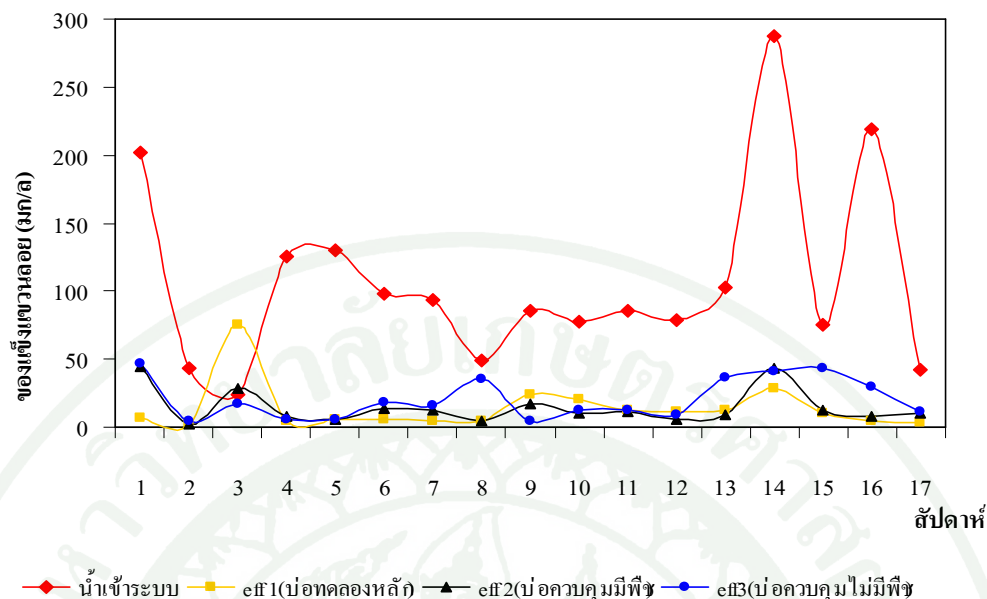
จากแผนภูมิที่ 25 และ 26 แสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองที่ 1 , 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดปิโอดีเฉลี่ยร้อยละ 94.66 , 95.40 และ 94.49 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 ชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกันมาก แทบจะไม่แตกต่างกันเลย ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ทั้ง 3 ชุดการทดลองนั้นระบบทำงานได้ดี สารอินทรีย์ในระบบนั้นจะถูกกำจัดโดยการกรอง และการตกตะกอนภายในชั้นของทรายหรือตัวกลางและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในส่วนที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน ในระบบบึงประดิษฐ์นั้นออกซิเจนในชั้นดินส่วนใหญ่้นั้นมาจากการที่พืชส่งผ่านมายังระบบราก ทำให้บริเวณนั้นมีออกซิเจนเพียงพอต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงนี้แสดงให้เห็นว่าระบบมีออกซิเจนอย่างเพียงพอต่อการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยทั้งนี้การลดลงของปิโอดีในระบบนั้นจะเกิดขึ้น โดยการใช้ของพืชน้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Cooper *et.al* ,1996)

การลดลงของซีโอดีในระบบคล้ายกับการลดลงของปิโอดี เมื่อมีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบรากพืชและชั้นดินจะทำการกรองสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่เอาไว้เป็นอันดับแรก ก่อนจะย่อยสลายต่อไปโดยการใช้ในกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อน้ำผ่านเข้ามายังระบบ HSF จะเกิดการกรองสารอินทรีย์โดยรากของต้นกกลังกาและชั้นของทราย ก่อนจะไหลไปยังระบบ FWS ผ่านลำต้นและรากของบัวหลวงเกิดออกซิเจนในระบบอย่างเพียงพอ ประสิทธิภาพในการลดลงของซีโอดีนั้น คิดเป็นร้อยละ 85.42, 86.26 และ 83.72 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่ชุดการทดลองที่ 2 (บ่อควบคุมที่ปลูกพืช) ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

4. ของแข็งแขวนลอย

TSS ที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 107.12 ± 69.66 มก./ล ส่วน TSS ที่ออกจากบ่อทดลองหลักนั้นมีค่า 13.76 ± 17.52 มก./ล บ่อควบคุม (ปลูกพืช) มีค่าเท่ากับ 14.41 ± 12.35 มก./ล และบ่อควบคุม(ไม่มีพืช) มีค่าเท่ากับ 20.41 ± 14.78 มก./ล

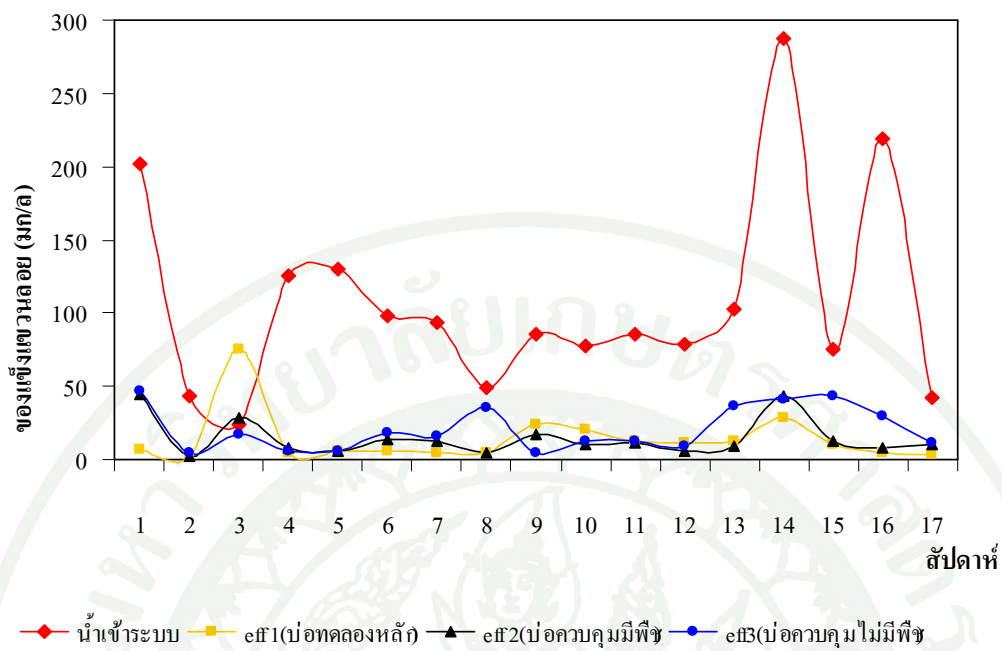
จากกราฟที่ 27 จะเห็นว่าค่า TSS จะมีความแปรปรวนเล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วงเดือนแรก และเดือนที่ 4 และประสิทธิภาพการกำจัดแสดงให้เห็นว่า บ่อทดลองหลักและบ่อควบคุม(ปลูกพืช) มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนบ่อควบคุม (ไม่มีพืช) ค่าประสิทธิภาพจะแตกต่างกันเล็กน้อย ในระบบบึงประดิษฐ์ทั้งแบบไหลได้ผิวดินและแบบไหลบนผิวดินนั้นกลไกที่กำจัดของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบคือ การตกตะกอนและการกรองผ่านชั้นดินหรือรากของพืช



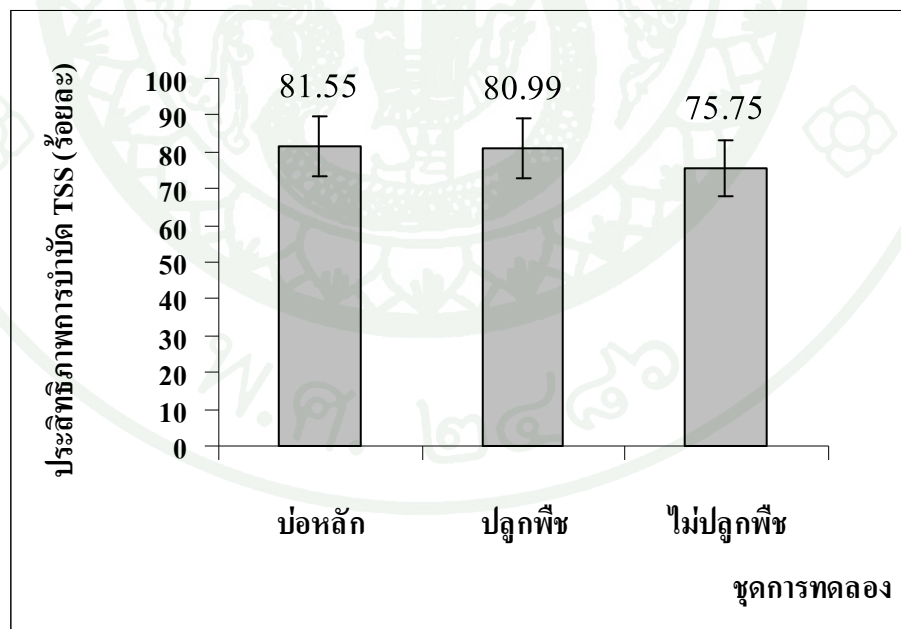
ภาพที่ 27 ค่า TSS ของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ตัวกลางที่นำมาใช้นี้ นอกจากจะช่วยกรองและตกตะกอนของแข็งแขวนลอยที่เข้ามาสู่ระบบแล้วยังช่วยลดความเร็วของกระแสที่เข้ามาในระบบไม่ให้พัดพาเอาของแข็งแขวนลอยออกไป แต่ในบางครั้งของแข็งแขวนลอยที่จมตัวไปแล้วในก้นบ่ออาจมีการลอยกลับมาแขวนลอยได้อีก อันเนื่องมาจากฝนที่ตกหนักหรือว่ากระแสลมแรง ดังนั้น บ่อควบคุม (ไม่ปลูกพืช) จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำกว่าทั้งสองบ่อที่มีการปลูกพืชเล็กน้อย เพราะนอกจากตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์จะช่วยลดของแข็งแขวนลอยแล้ว พืชที่ขึ้นในระบบก็จะช่วยทำให้เกิดการกรองและการตกตะกอนและการกรองได้ดีขึ้นด้วย (Crites, 1998)

กลไกที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของระบบบึงประดิษฐ์คือการตกตะกอนและการกรอง ถ้าหากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีช่วงเวลากักเก็บน้ำที่ยาวนาน (HRT) ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งได้ดี (ศุวสา, 2544) ค่าของแข็งแขวนลอยในระบบของทั้ง 3 ชุดการทดลองคิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 81.55, 80.99 และ 75.75 ตามลำดับ เปรียบเทียบดังภาพ 29 โดยชุดการทดลองที่ 1 (บ่อทดลองหลัก) และชุดการทดลองที่ 2 (บ่อควบคุมปลูกพืช) มีค่าใกล้เคียงกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 (บ่อควบคุมไม่ปลูกพืช) ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 นั้นนอกจากจะเกิดการกรองของแข็งแขวนลอยในชั้นดินแล้วนั้น ยังมีรากของพืชในระบบช่วยกรองอีกทางหนึ่ง

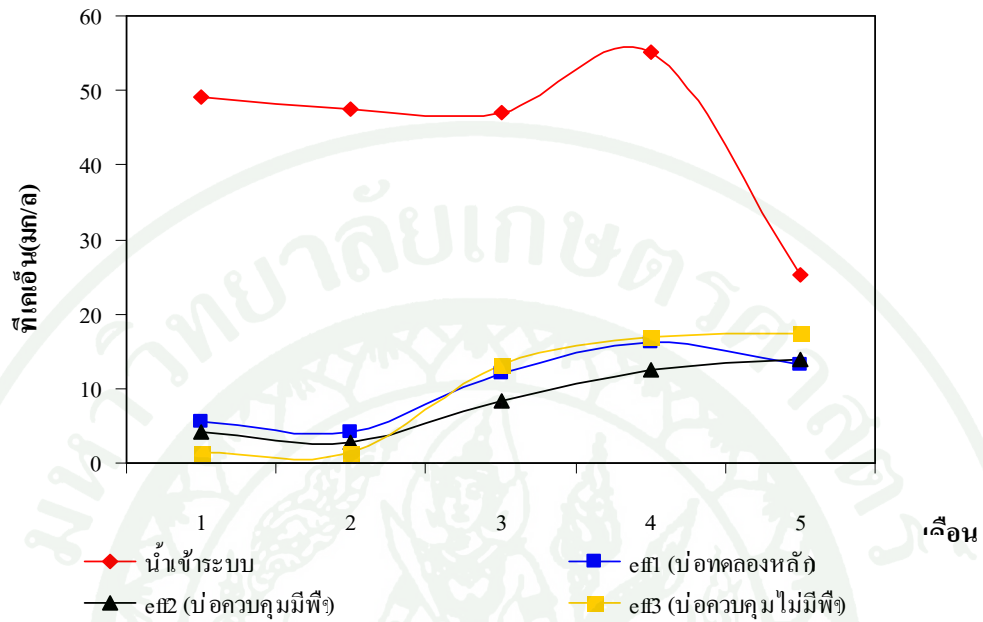


ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพการกำจัดTSSของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

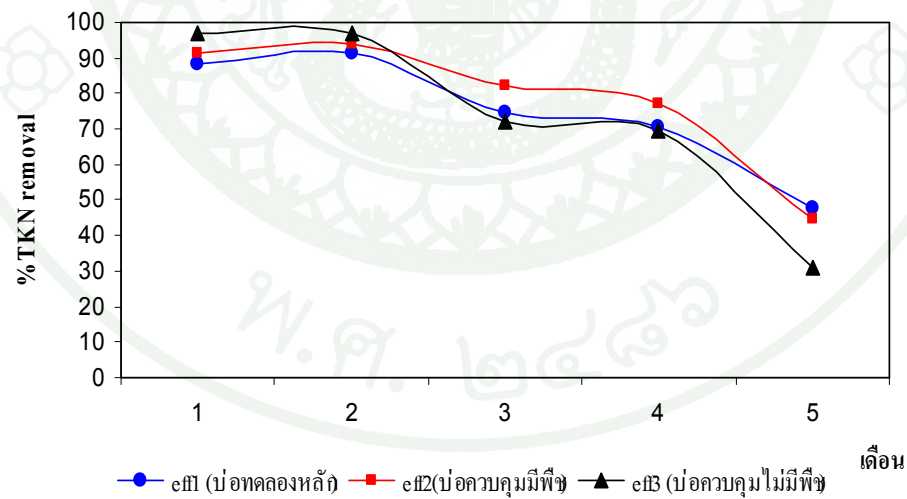


ภาพที่ 29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TSS เฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ

5. ที่เคเอ็น



ภาพที่ 30 ค่าTKNของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

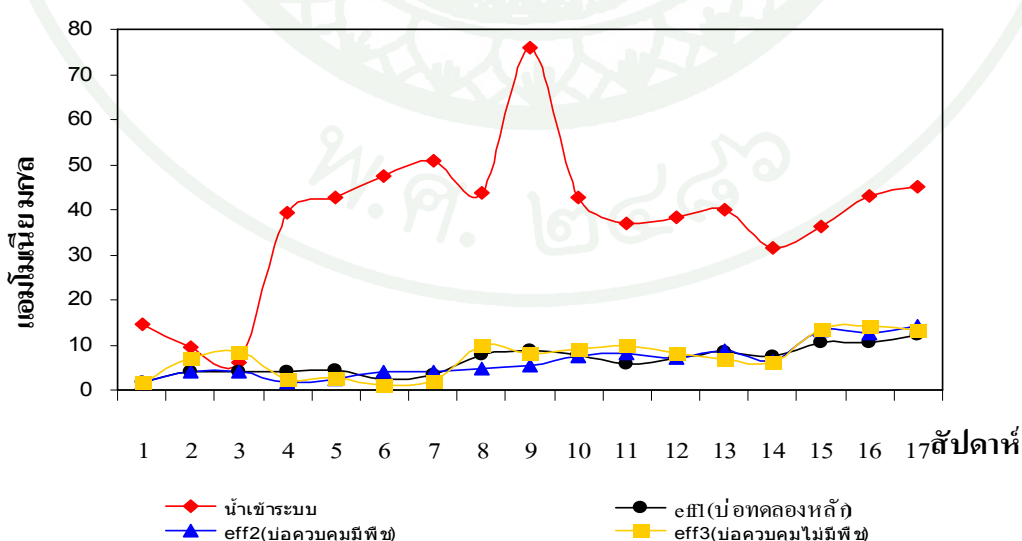


ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการกำจัดTKNของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

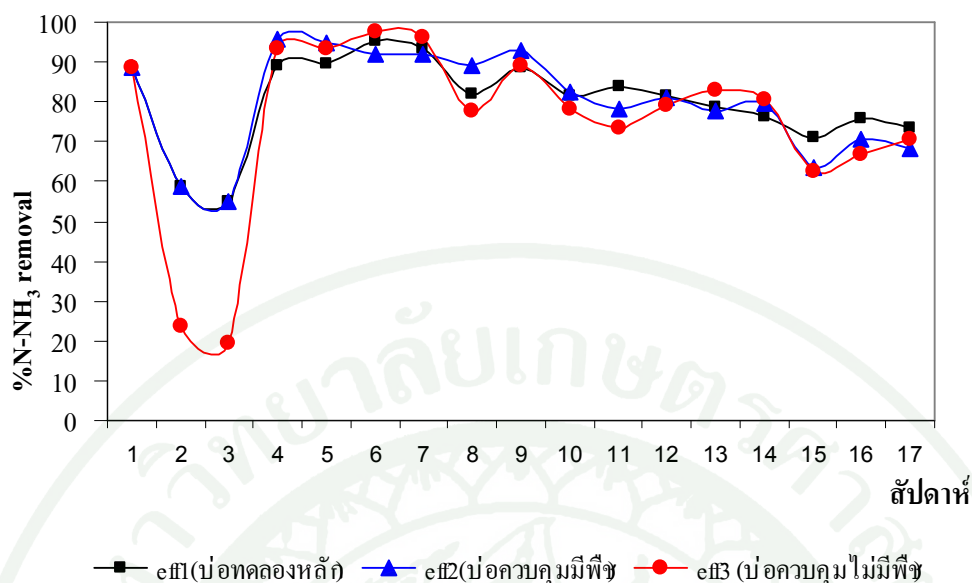
ที่เคเอ็นหรือค่าไนโตรเจนทั้งหมดก่อนเข้าสู่ระบบนั้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.79 ± 11.42 มก./ล. ค่าที่เคเอ็นของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบของบ่อดูดหลักมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.25 ± 5.14 มก./ล บ่อบวม (ปลูกพืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.40 ± 4.95 มก./ล และบ่อบวม (ไม่มีพืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.02 ± 8.04 มก./ล โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดค่าที่เคเอ็นโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 77.12 , 81.25 และ 77.62 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดค่าที่เคเอ็นของบ่อบวม (ปลูกพืช) มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในภาพ 30 และ 31

สำหรับค่าที่เคเอ็นจะทำการวิเคราะห์เดือนละ 1 ครั้งทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ จากกราฟจะเห็นว่าค่าที่เคเอ็นในช่วง 2 เดือนแรกค่อนข้างที่จะคงที่ทั้ง 3 บ่อ แต่พอเข้าสู่เดือนที่ 3 ค่าที่เคเอ็นในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น ในการทดลองการย่อยสลายค่าที่เคเอ็นนั้น กระทำภายใต้สภาวะ Aerobic (ใช้ออกซิเจน) หรือที่เรียกว่า Nitrification ในช่วงเข้าสู่เดือนที่ 3 นั้น อาจเกิดการอุดตันระบบท่อหรือชั้นของตัวกลาง จึงทำให้ในบางที่ระบบบึงประดิษฐ์จะมีน้ำขังอยู่ ทำให้เกิดการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินนี้จะทำให้เกิดกระบวนการ Nitrification ซึ่งต้องใช้ออกซิเจน เมื่อน้ำขังในระบบก็จะเกิดสะสมตัวของจุลินทรีย์เกิดการใช้ออกซิเจนมากขึ้น ออกซิเจนในระบบลดลง ทำให้การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น

6. แอมโมเนียไนโตรเจน



ภาพที่ 32 ค่า $N-NH_3$ ของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง



ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพการกำจัด N-NH₃ ของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

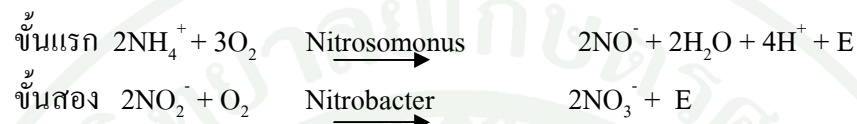
น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 37.88 ± 16.34 มก./ล ค่าแอมโมเนียของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบของบ่อทดลองหลักมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.47 ± 3.92 มก./ล บ่อควบคุม(ปลูกพืช)มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.46 ± 3.92 มก./ล และบ่อควบคุม (ไม่มีพืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.35 ± 4.23 มก./ล โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดค่าแอมโมเนียโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 84.18 , 84.20 และ 81.82 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดค่าแอมโมเนียของบ่อควบคุม(ปลูกพืช) มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 32 และ 33

7. ไนเตรทไนโตรเจน

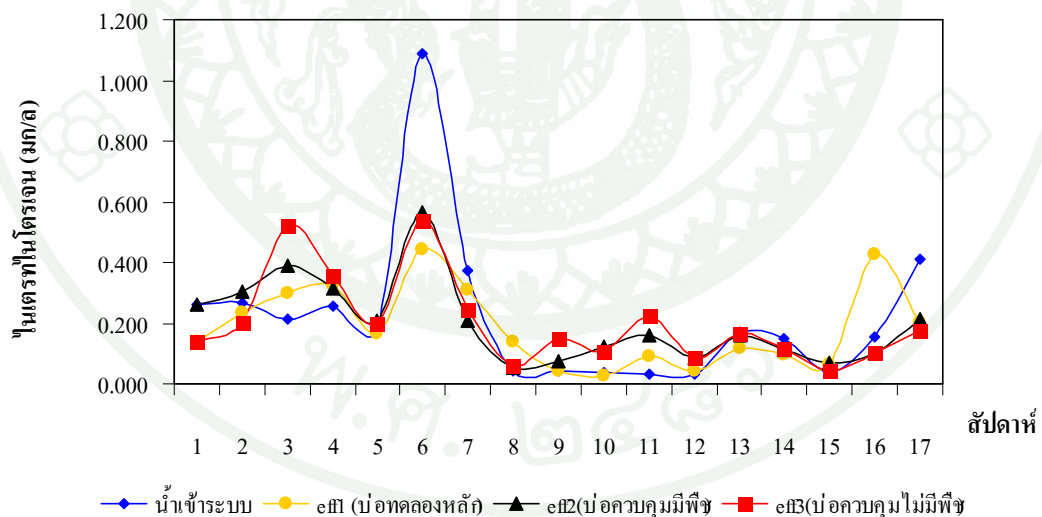
กราฟแสดงค่า Nitrate ของบ่อต่างๆตลอดการทดลองน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.220 ± 0.25 และน้ำทิ้งที่ออกจาบบ่อ 1,2,3 มีค่าไนเตรทไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ $0.186 \pm 0.13, 0.200 \pm 0.13, 0.202 \pm 0.15$ ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดค่าไนเตรทโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 15.97 , 9.24, และ 8.21 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดของบ่อทดลองมีค่าสูงที่สุด

จากภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรทนั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงเดือนที่ 1 และ 2 จะมีการแปรปรวนอย่างมาก แต่ช่วงเดือนที่ 3 และ 4 ค่าปริมาณไนเตรทจะค่อนข้างคงที่ ค่าไนเตรทไน

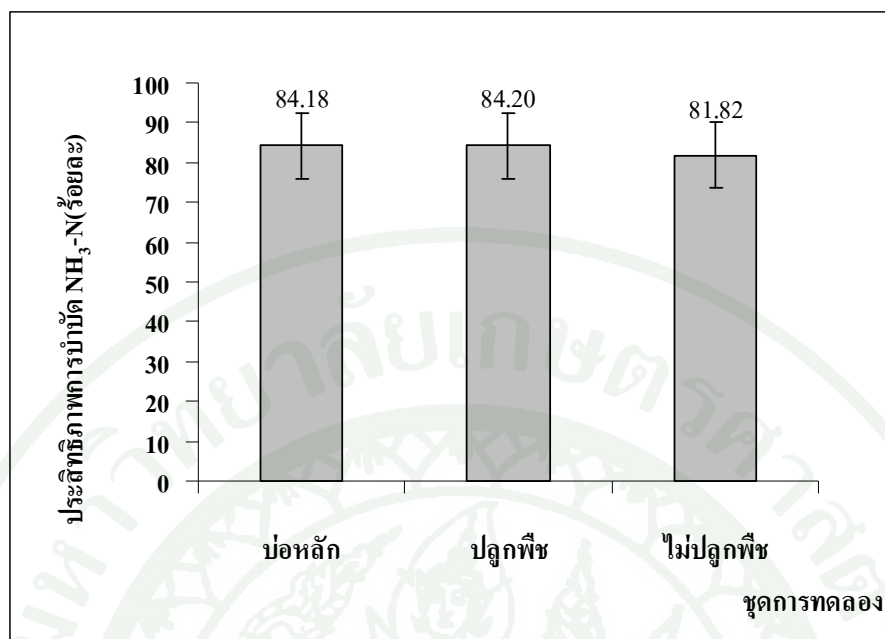
น้ำทิ้งที่ออกจากระบบโดยส่วนใหญ่ในเกือบทุกสัปดาห์จะมีค่ามากกว่าน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากว่าเป็นลักษณะสำคัญของกระบวนการ Nitrification ในชั้นดินที่มีน้ำเต็ม (Saturate) ผสมช่องว่างอากาศในดินชั้นบน (Top Soil) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง TKN ไปเป็นไนโตรเจนและไนเตรทตามลำดับ โดยจุลินทรีย์ ประเภท Autotrophic ในชั้นตัวกรอง โดยไนเตรทจะถูกพืชใช้อีกต่อหนึ่ง (เพ็ญชуда, 2546) จากสมการ



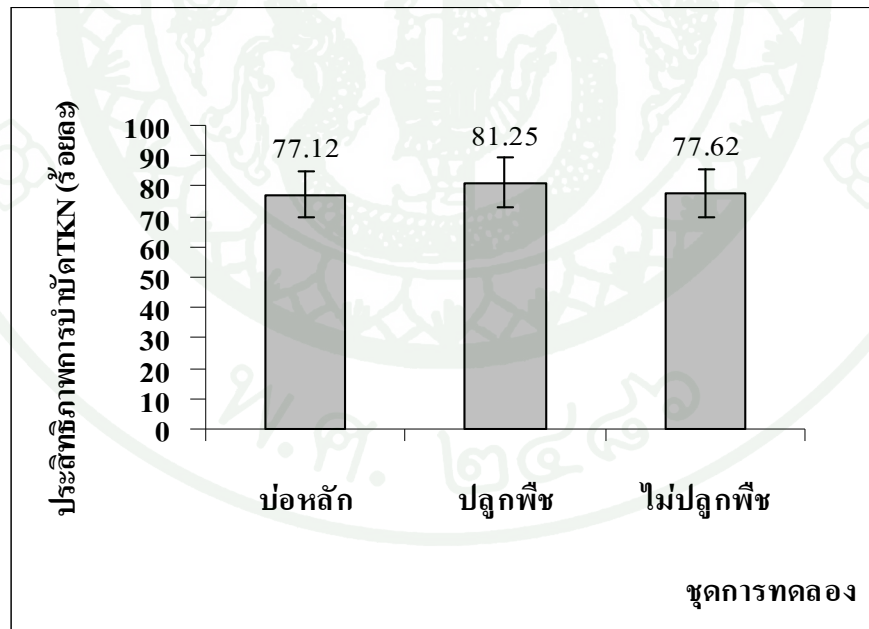
ซึ่งจากทั้ง 2 สมการนี้จะทำงานโดยจุลินทรีย์ 2 ชนิด คือ Nitrosomonas และ Nitrobacter ในบางสัปดาห์ค่าไนเตรทของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากปริมาณน้ำฝน แสงแดด เหล่านี้มีผลต่อการเกิดกระบวนการ Nitrification ทำให้ไนโตรเจน เปลี่ยนเป็นไนเตรท ไนโตรเจน ได้น้อยลง มีผลทำให้ทิ้งที่ออกจากระบบ มีค่าไนเตรทลดลง



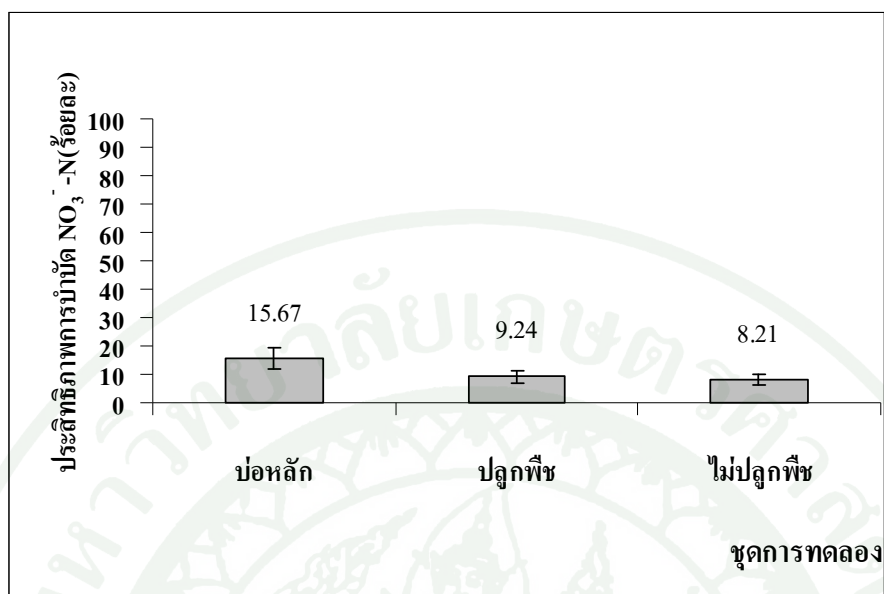
ภาพที่ 34 ค่า Nitrate ของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง



ภาพที่ 35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ



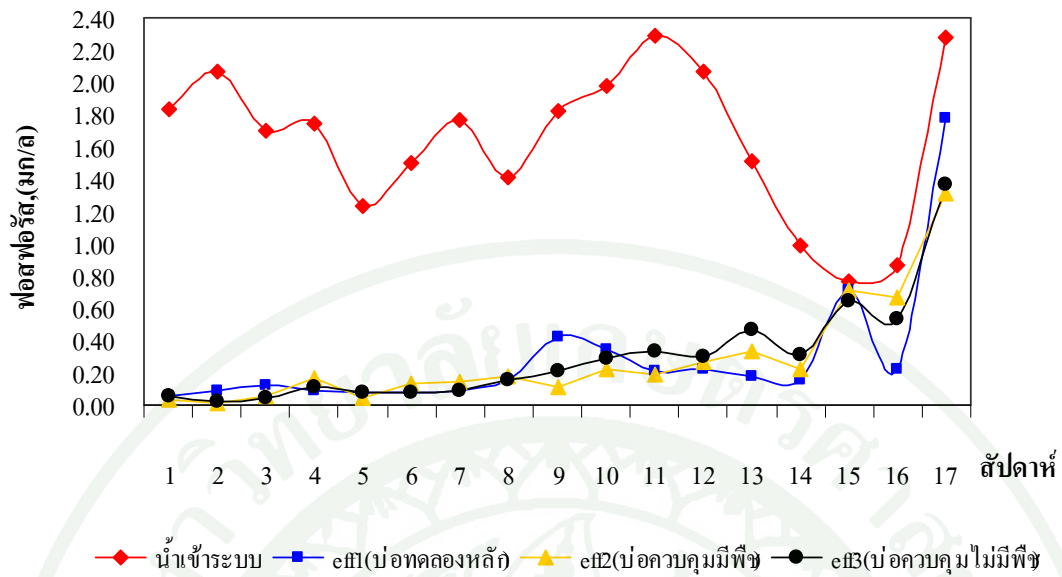
ภาพที่ 36 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ



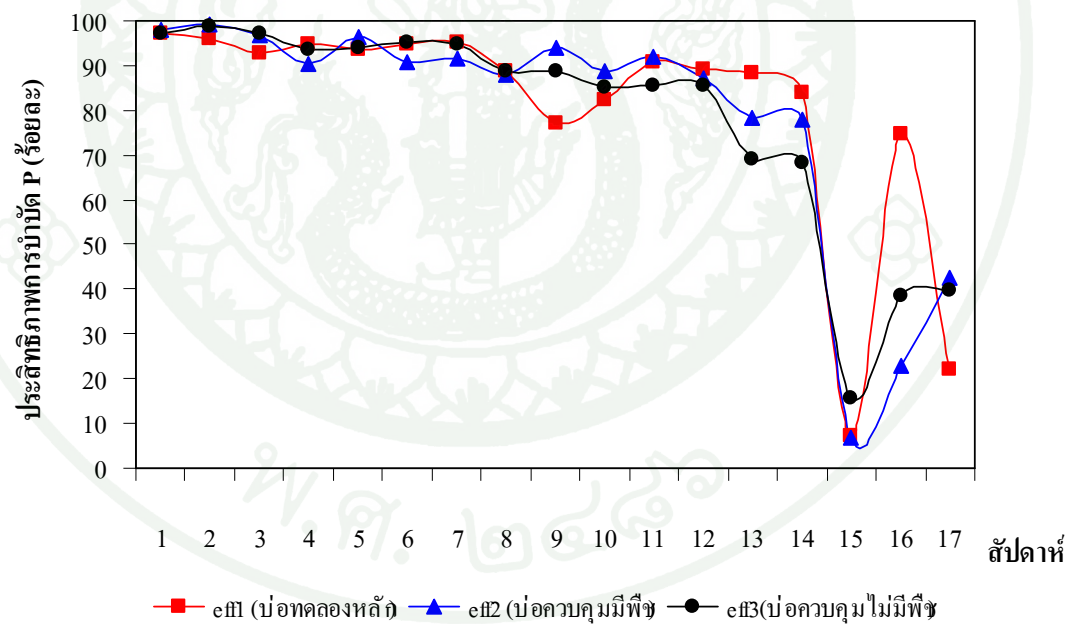
ภาพที่ 37 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ

8. ฟอสฟอรัส

ค่าฟอสฟอรัสของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.636 ± 0.464 มก./ล ส่วนค่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์บ่อทดลองหลักมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.294 ± 0.415 มก./ล บ่อควบคุม(ปลูkfืช) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.282 ± 0.330 มก./ล และบ่อควบคุม(ไม่มีพืช)มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.300 ± 0.331 มก./ล จะเห็นว่าบ่อทดลองหลักและบ่อควบคุม(ปลูkfืช) จะมีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ทั้ง 3 บ่อก็มีค่าไม่แตกต่างกัน คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ ร้อยละ 82.03 ,82.74 และ 81.68 ตามลำดับ



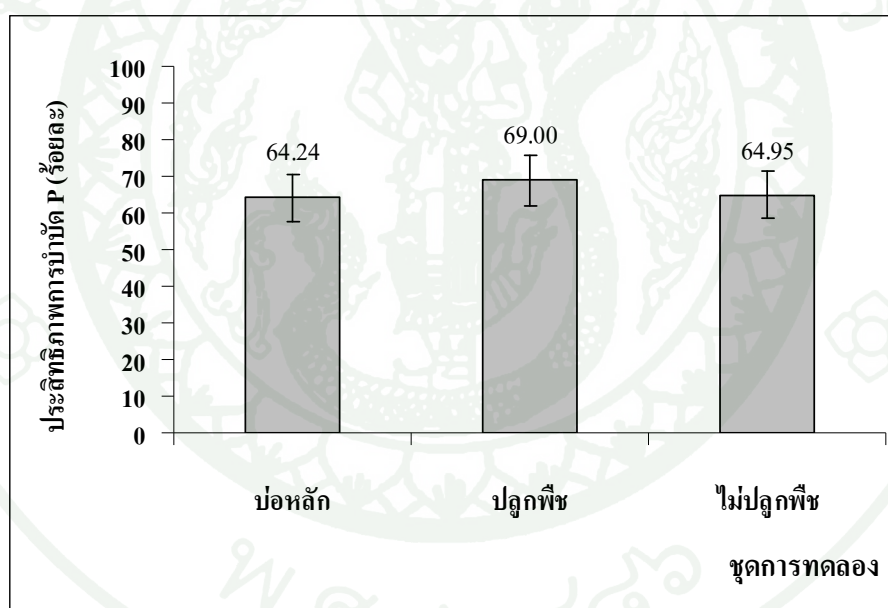
ภาพที่ 38 ค่าฟอสฟอรัสของน้ำเข้าและน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง



ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพการกำจัด P ของบ่อบึงประดิษฐ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

จากกราฟที่ 38 ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยในช่วงเดือนที่ 1 และ 2 ค่าจะค่อนข้างคงที่ เดือนที่ 3 และ 4 ค่าจะแปรปรวนและค่อยๆเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟปริมาณฟอสฟอรัส คือจะ

ค่อนข้างคงที่และจะลดลงทีละน้อย และลดลงมากในสัปดาห์ที่ 15 ก่อนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในสัปดาห์ถัดไป ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์นั้น อาศัยกลไกที่สำคัญคือ การดูดติดและการตกตะกอนบนตัวกลาง (ดินและกรวด) (Reddy and D'Agelo, 1997) ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบนั้นมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบมีค่ามากเกินไปเกินความต้องการของพืช พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้หมดจึงเกิดการสะสมและถูกชะล้างออกไปทำให้น้ำทิ้งมีค่าฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นด้วย ในส่วนของการศึกษานี้ไม่ได้ลงลึกถึงการไปใช้โดยพืช แต่อย่างไรก็ตามทางที่ดีที่สุดในการที่จะทำให้มั่นใจว่าการกำจัดฟอสฟอรัสจะให้ผลที่ต่อเนื่องในระยะยาวของระบบบึงประดิษฐ์นั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่นำมาใช้และสามารถทนกับสถานะน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ การเก็บเกี่ยวพืชอย่างสม่ำเสมอก็จะเป็นการช่วยกำจัดค่าฟอสฟอรัสที่มีมากเกินไปได้ในระบบ (S.R. Jing *et al*, 2001)



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ในบ่อต่างๆ

จากแผนภูมิที่ 40 คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ ร้อยละ 64.24, 69 และ 64.95 ตามลำดับ โดยบ่อควบคุม (มีพืช) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

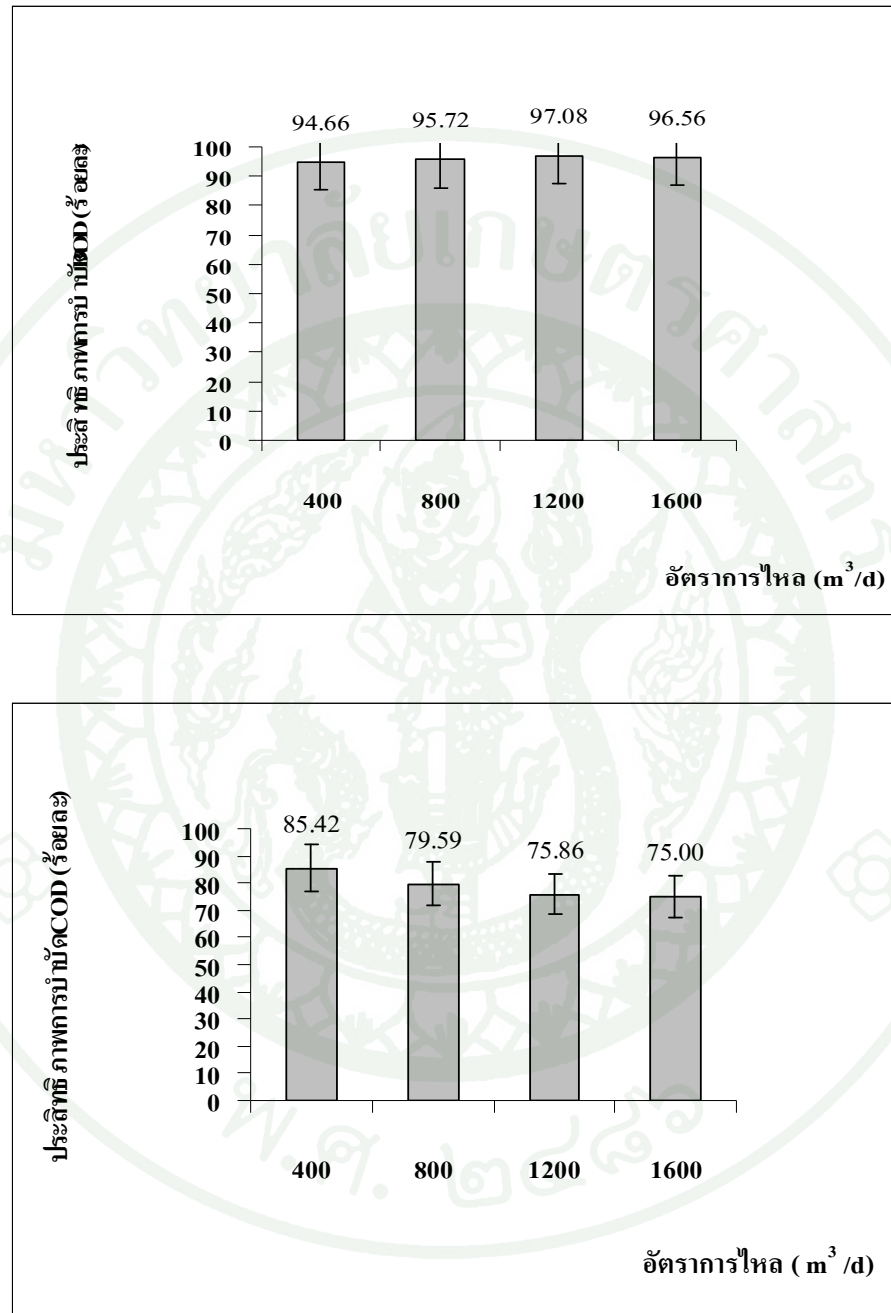
ตารางที่ 13 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์ในแต่ละชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	Influent (mg/l)	Effluent (mg/l)			ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด โดยรวมของระบบ		
		ชุดการ ทดลอง 1 (บ่อหลัก)	ชุดการ ทดลอง 2 (ปลูกพืช)	ชุดการ ทดลอง 3 (ไม่ปลูก พืช)	ชุดการ ทดลอง 1 (บ่อหลัก)	ชุดการ ทดลอง 2 (ปลูกพืช)	ชุดการ ทดลอง 3 (ไม่ปลูก พืช)
BOD ₅	87.03	4.65	4.00	4.79	94.66	95.40	94.49
COD	192.71	28.11	26.49	31.37	85.42	86.26	83.72
TKN	44.79	10.25	8.40	10.02	77.12	81.25	77.62
N-NH ₃	37.88	6.47	6.45	7.35	84.18	84.20	81.82
NO ₃ -N	0.220	0.186	0.200	0.202	15.67	9.24	8.21
TP	1.636	0.169	0.146	0.166	89.64	91.09	89.86
TSS	107.12	13.76	14.41	20.41	81.55	80.99	75.75

2. คุณภาพของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลให้แกระบบ

จากการเดินระบบที่อัตราการไหล 400 l/d คิดเป็น $HLR = 0.36 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$ $HRT = 3 \text{ d}$ ผลการทดลองและการวิเคราะห์เป็นไปตามหัวข้อด้านบน จากการทดลองขั้นต่อไปได้ทำการเพิ่มอัตราการไหลให้แกระบบบึงประดิษฐ์ โดยจะทำการเพิ่มอัตราการไหลในเฉพาะชุดการทดลองที่ 1 (บ่อทดลองหลัก) โดยทำการเพิ่มทีละ 400 l/d อัตราการไหลเริ่มต้น เป็น 800 l/d ,1200 l/d และ 1600 l/d เพื่อดูแนวโน้มของระบบว่า ถ้ามีภาระบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น ระบบยังรองรับได้หรือไม่ โดยการทดลองนี้ทำการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองที่อัตราการไหล 400 l/d โดยไม่ได้ทำการเปลี่ยนชุดของพืชและชั้นของตัวกลาง โดยผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

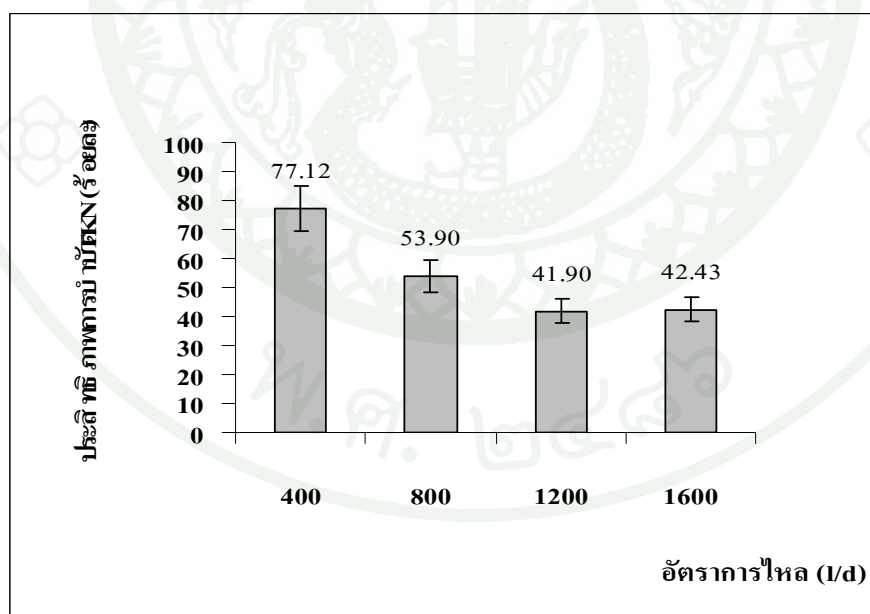
ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (BOD)



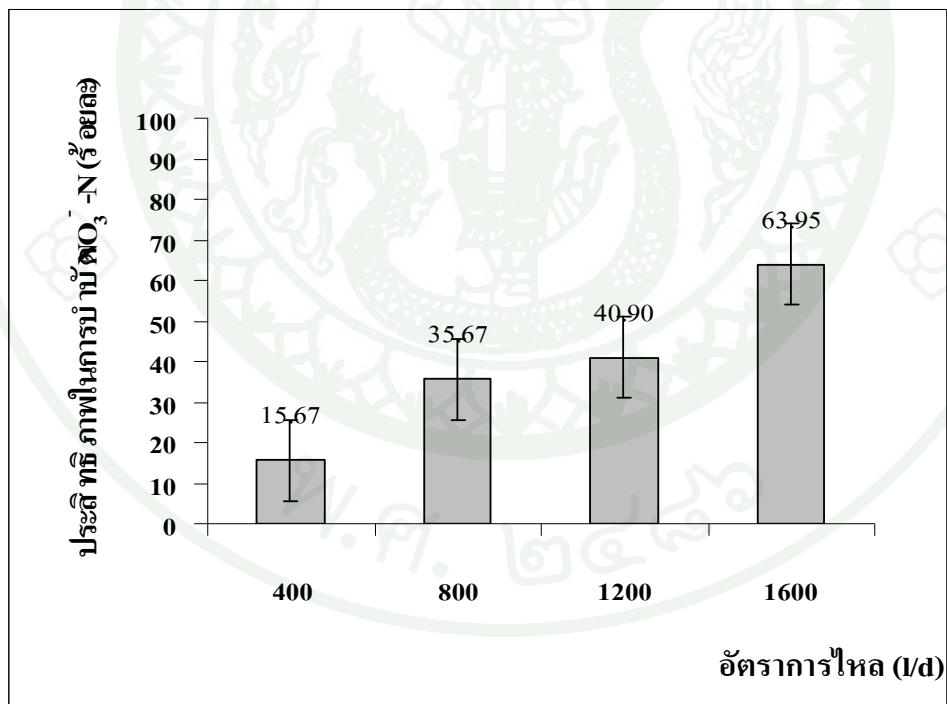
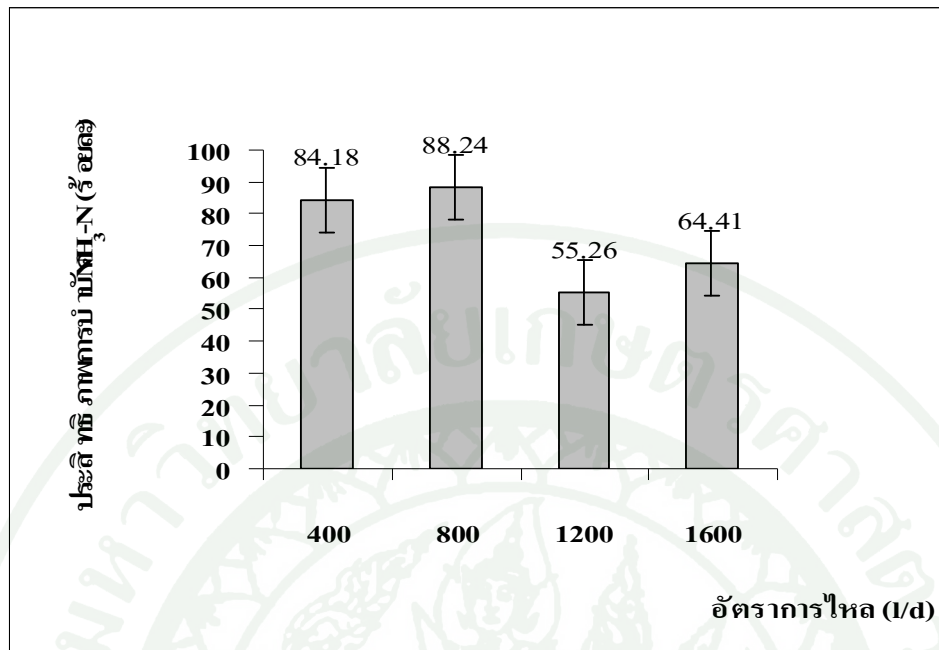
ภาพที่ 41 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบึงประดิษฐ์เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล

ผลของประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราการไหลให้แก่ระบบ จากกราฟที่ 40 จะพบว่า ระบบยังมีความสามารถในการลดค่า BOD ได้ดี ส่วนการบำบัด COD ประสิทธิภาพลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่น้ำตกเก็บที่สั้นลง สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของ COD ย่อยสลายไม่ทัน ดังนั้นถ้าต้องการจะบำบัดค่า COD ให้ได้ผลดีต้องเพิ่มระยะเวลาที่ตกเก็บให้นานขึ้น ส่งผลให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีค่า COD สูง ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง แต่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการลดสารอินทรีย์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ผ่านตามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จากกราฟระบบที่ทำการเพิ่มอัตราการไหลมีค่าไม่ต่างกันมากนัก จะเห็นว่า ระยะเวลาที่ตกเก็บที่สั้นลง การบรรทุกทางชลศาสตร์ที่มากขึ้น ไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบเท่าไร ผลของการลดลงของสารอินทรีย์และยังทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีแม้จะเพิ่มอัตราการไหล เนื่องมาจากว่าระบบทำการทดสอบที่ต่อเนื่องมาจากการทดลองที่การเดินระบบปกติ ชั้นของตัวกลาง รากของพืช ความหนาแน่นของพืช ล้วนมีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งสิ้น

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (TKN) , แอมโมเนียและไนเตรท



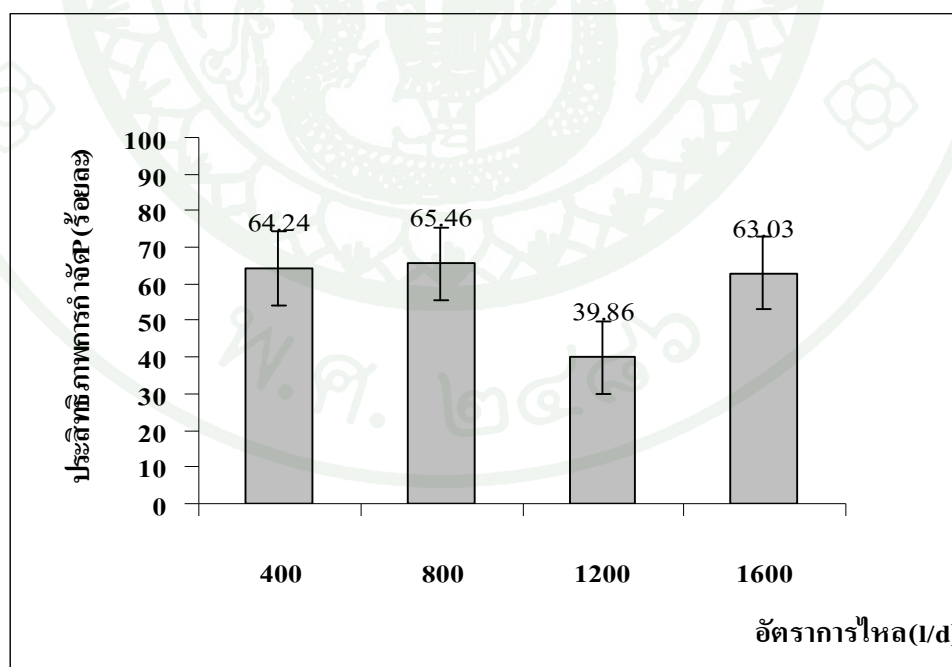
ภาพที่ 42 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล



ภาพที่ 42 (ต่อ)

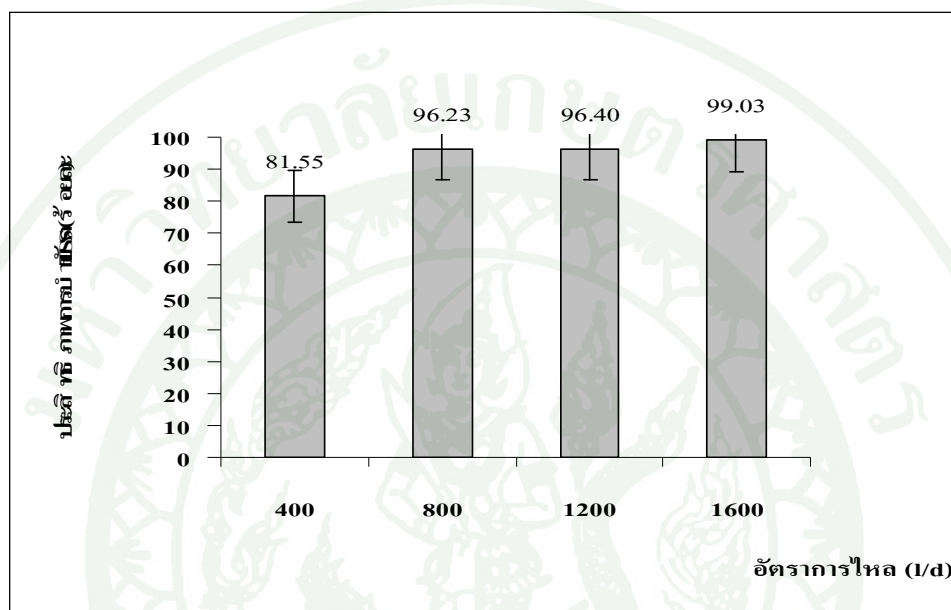
ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของระบบ ค่าที่เคเอ็นประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่ม ความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น และระยะเวลาที่สั้นลง ส่งผลให้ที่เคเอ็นถูกชะล้างออกจากระบบมากขึ้นไม่สามารถบำบัดได้ทัน

ส่วนค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหล 800 l/d ให้ผลสูงสุด อัตราการไหล 1200 l/d และ 1600 l/d ให้ประสิทธิภาพลดลง จากแผนภูมิที่ 41 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของระบบมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล ทั้งนี้เนื่องมาจากไนโตรเจนที่เข้ามาในระบบเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้น้อยเพราะสภาพภายในบ่อเกิดภาวะ Anaerobic ทำให้เกิดกระบวนการ Ammonification ที่เปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์ไนโตรเจนมาเป็นแอมโมเนียได้น้อยตาม ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของระบบจึงลดลง สำหรับไนเตรทเมื่อสารอินทรีย์ไนโตรเจนกลายเป็นแอมโมเนียได้น้อยลงแล้ว อัตราการไหลที่มากขึ้นและระยะเวลาที่สั้นลง ประกอบกับระบบเกิดภาวะ Anaerobic การเกิดกระบวนการ Nitrification น้อยมาก ส่งผลให้ไนเตรทที่ออกมาคือน้ำทิ้งจึงมีค่าน้อยตาม ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมจึงดีขึ้นตามระยะเวลาที่สั้นลงและอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล

ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล มีค่าใกล้เคียงกัน ใน อัตราการไหล 400 l/d ,800 l/d และ 1600 l/d ส่วนในอัตราการไหล 1200 l/d ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำสุด แสดงดังแผนภูมิที่ 43



ภาพที่ 44 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของระบบบึงประดิษฐ์เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบนั้นดีขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องมาจาก การอุดตันของชั้นตัวกลาง ความหนาแน่นของพืช ทำให้ของแข็งติดอยู่ที่ผิวบนของตัวกลางและถูกกรองโดยรากของพืชไว้ น้ำที่ออกจากระบบจึงมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยเมื่อเทียบกับในช่วงอัตราการไหลแรกๆ ที่ทำการทดลองที่ชั้นของตัวกลางและพืชยังไม่หนาแน่นเท่าที่ควร ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของน้ำต้องเพิ่มตาม อนุภาคย่อยจะหลุดออกมาตามกระแสที่เร็วขึ้นมากกว่าระบบที่ให้อัตราการไหลน้อยกว่า แต่อาจอธิบายได้ว่าถึงแม้ความเร็วจะเพิ่มขึ้นแต่แต่อนุภาคไหลออกมาไม่ทันน้ำที่ที่ออกจากระบบจึงมีความใสและตะกอนน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้น

จากการทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเพื่อดูแนวโน้มของระบบแล้ว พบว่าในอัตราการไหลที่มากขึ้นและระยะเวลาเก็บที่สั้นลงนี้ ในทุกๆค่าของการเก็บตัวอย่าง แนวโน้มของระบบยังคงรับได้ แต่ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลไปถึงระดับ 1200 l/d จะเกิดการขังของน้ำในระบบเนื่องจากการระบายน้ำที่ไม่ทัน โดยในบ่อทดลองที่ปลูกกกกล้านั้นน้ำขังประมาณ 20 cm ส่วนในบ่อที่ปลูกบัวหลวงมีระดับน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 32 cm ส่วนที่อัตราการไหล 1600 l/d เกิดการขังของน้ำในระบบที่บ่อกกกล้าน้ำ 25 cm และบ่อบัวหลวงเพิ่มขึ้นเป็น 40 cm ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินที่แน่นขึ้นส่งผลให้ชั้นตัวกลางอุดตัน

ตารางที่ 14 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์ในแต่ละอัตราการไหล

พารามิเตอร์	Effluent (mg/l)				ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด โดยรวมของระบบ			
	400 l/d	800 l/d	1200 l/d	1600 l/d	400 l/d	800 l/d	1200 l/d	1600 l/d
PH	6.91	5.91	5.84	5.98	-	-	-	-
BOD ₅	4.65	4.8	2.5	3.2	94.66	95.72	97.08	96.56
COD	28.11	14.60	17.36	9.92	85.42	79.59	75.86	75.00
TKN	10.25	7.98	9.8	4.62	77.12	53.90	41.90	42.43
N-NH ₃	6.47	3.08	4.76	2.94	84.18	88.24	55.26	64.41
NO ₃ -N	0.186	0.066	0.122	0.057	15.67	35.67	40.90	63.95
P	0.169	0.563	0.750	0.278	89.64	65.46	39.86	63.03
TSS	13.76	11	4	2	81.55	96.23	96.40	99.03

สรุป

จากการศึกษาทดลองการบำบัดน้ำเสียจากหอพักนิสิตหญิงและตึกบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัด สกลนคร ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ แบบ น้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน(HSF) ร่วมกับระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผิวดิน (FWS) ได้ข้อสรุป ดังนี้

1. ประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดสารอินทรีย์ ของทั้ง 3 ชุดการทดลองคิดเป็น บีโอดี ร้อยละ 94.66, 95.40 และ 94.49 ตามลำดับ ซีโอดี ร้อยละ 85.42, 86.26 และ 83.72 ตามลำดับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพของทั้ง 3 ใกล้เคียงกันมาก โดยบ่อควบคุมที่ทำการปลูกพืชมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด

2. เปรียบเทียบระหว่างความยาวของบ่อทดลองทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า ความยาวของบ่อไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากว่าค่าที่ออกจากระบบของทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้อาจจะมีผลของในด้านความสวยงาม เนื่องจากว่า ชุดการทดลองที่ 3 ที่ไม่ปลูกพืช จะดูสกปรกและเกิดคราบสีเขียวที่ผิวน้ำตัวกลาง

3. เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลให้แก่ชุดการทดลองที่ 1 เป็น 800 l/d, 1200 l/d และ 1600 l/d พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดยังดี อัตราการไหลที่มากขึ้นและระยะเวลาที่สั้นลงที่ไม่มีผลต่อคุณสมบัติของน้ำทิ้ง ที่อัตราการไหล 800 l/d น่าจะเหมาะสมที่สุดเพราะยังทำให้ระบบยังมีความเสถียรอยู่

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเป็นระบบธรรมชาติจึงมีปัญหาในเรื่องศัตรูพืช เช่น หนอน โดยเฉพาะในบัวหลวง ควรหาทางศึกษาและกำจัดออกไปเพราะ หนอน มีผลให้พืชในระบบไม่โตเต็มที่และตาย
2. ในการเพิ่มอัตราการไหลให้แกระบบ ควรเพิ่มระยะเวลาการเดินระบบที่นานขึ้น และเก็บตัวอย่างให้มากขึ้น เพื่อระยะเวลาของพืช การเก็บเกี่ยว การตายและการปลูกทดแทน
3. ควรมีการเปลี่ยนหรือทำการล้างชั้นของตัวกลางในระบบ เพื่อการระบายน้ำและไม่อุดตันของชั้นตัวกลาง
4. ชั้นของตัวกลางที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดินในแนวนอน (HSF) นั้น อาจนำดินที่หาได้ง่ายๆภายในวิทยาเขตสกลนครมาใช้ เช่น ดินลูกรัง เนื่องจากระบบ HSF นั้น ได้ทำการปลูกกกกลังกา และกกกลังกาที่เป็นพืชที่เกิดขึ้นได้ง่ายกับดินรูปแบบต่างๆ
5. ควรนำพีทมามาใช้ในการทำประโยชน์ โดยกกกลังกาสามารถใช้ประโยชน์ได้เมื่อความสูง 150 cm และบัวหลวงสามารถตัดดอกมาไหว้พระได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองประมงน้ำจืด กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2545. **Aquatic Plants in Thailand.**

แหล่งที่มา: [http:// www. ku.ac.th/Agrinfo/thaifish/aqplant/aqpindex.html](http://www.ku.ac.th/Agrinfo/thaifish/aqplant/aqpindex.html),

2 กันยายน 2551.

กิริติ ลิ่วจันทกุล.2543. **อุทกวิทยา**. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัย
รังสิต, กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2547. **วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่ม5**. พิมพ์ครั้งที่1. มหาวิทยาลัยรังสิต
, กรุงเทพฯ.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2537. **คู่มือการออกแบบระบบระบายน้ำเสียและน้ำฝน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. วิศวกรรม
สถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย,
กรุงเทพฯ.

พิชิต ศรีวัฒนพงศ์. 2527. นานิว, น. 58 – 60. ใน **เอกสารประกอบรายการวิทยุ รายการเพื่อชีวิต**
การเกษตร เล่มที่3. ตุลาคม 2526 - กันยายน 2527 ,ชัยนาท.

พัฒน์ จันทโรทัย. 2536. ข้อพิจารณาในการใช้พืชปรับปรุงคุณภาพน้ำ. **วารสารวิทยาศาสตร์**
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 11(3): 154-157.

ไพบูลย์ ประพตจิธรรม และ สิทธิชัย ตันชนะสถิตย์.2542. **การศึกษาส่วนผสมดินและการให้น้ำ**.
เอกสารการบรรยายหมายเลข 20, น. 1-15. ใน การประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีการ
กำจัดขยะแบบประหยัดและการบำบัดน้ำเสียด้วยพืช โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่ง
แวดล้อม แหลมผักเป็ดอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ณ ห้องสุพรรณอารีกุล อาคารสารนิ
เทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 25 – 28 สิงหาคม 2542. มหาวิทยาลัยเกษตร
ศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา. 2546. เอกสารคำสอนวิชา 210311 จุลชีพในน้ำและน้ำเสีย. ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตัณฑุเลศน์. 2545. คู่มือการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพฯ.

สายฝน เม้าทอง. 2548. เขื่อนเมืองพัทลุง ชมนาบัวแหล่งที่ใหญ่ที่สุดในภาคใต้ พร้อมวิธีการปลูกบัว
เพื่อการค้าแบบมืออาชีพ. เทคโนโลยีชาวบ้าน 18(373): น. 33- 34.

สิทธิชัย ตันชนะสฤณดี และ สมศักดิ์ เจริญวัย. 2542. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยพืชน้ำ
(แปลงขนาด 5x100 เมตร และ 5x25 เมตร). ธูปฤาษี. เอกสารการบรรยายหมายเลข 30, น.
1-9. ใน การประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีการกำจัดขยะแบบประหยัดและการบำบัดน้ำ
เสียด้วยพืช โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจาก
พระราชดำริ ณ ห้องสุธรรมอารีกุล อาคารสารนิเทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่
25 – 28 สิงหาคม 2542. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุมน มาสุชน, คุณหญิงสุชาดา ศรีเพ็ญ, จันทนา สุขปรีดี, สมบัติ ชินะวงศ์ และ สมศักดิ์ เจริญวัย.
2542. การศึกษาเบื้องต้นในการคัดเลือกชนิดพืชน้ำบำบัดน้ำเสีย. เอกสารการบรรยาย
หมายเลข 19, น. 1-5. ใน การประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีการกำจัดขยะแบบประหยัด
และการบำบัดน้ำเสียด้วยพืช โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอัน
เนื่องมาจากพระราชดำริ ณ ห้องสุธรรมอารีกุล อาคารสารนิเทศ 50 ปี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 25 – 28 สิงหาคม 2542. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

_____, _____, _____, _____ และ _____. 2542. การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนเทศบาลเมือง
เพชรบุรีในพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้กกกลมและธูปฤาษี. เอกสารการบรรยายหมายเลข 26,
น. 1-11. ใน การประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีการกำจัดขยะแบบประหยัดและการบำบัด
น้ำเสียด้วยพืช โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจาก
พระราชดำริ ณ ห้องสุธรรมอารีกุล อาคารสารนิเทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่
25 – 28 สิงหาคม 2542. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ษยานนท์ (นามแฝง). 2541. นวัตกรรมที่ยังไปได้ดี. **เมืองเกษตร** 11(122): น.22 – 28.

A.Ghermandi, D. Bixio and C. Thoeye. 2007. The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse. **Science of the Total Environment** 380: 247–258.

APHA, AWWA and WEF. 1992. **Standard methods of examination of water and wastewater.18th ed.** American Pubic Health Association. Washington, DC.

Sima C.H. Yusoffa M.K. Shutesb B, Hoc S.C and Mansord M. 2008. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. **Journal of Environmental Management** 88 : 307–317.

Crites and Tchobanoglous. 1998. **Small and Decentralized Wastewater Management Systems:** Mechanical Engineering Series. Mc Graw-Hill, New York.

Thullen J.S. Sartoris J.J. and Nelson S.M.. 2005. Managing vegetation in surface-flow wastewater-treatment wetlands for optimal treatment performance. **Ecological Engineering** 25 : 583–593.

Vymazal J. 2007. Removal of nutrients in various types of Constructed wetlands. **Science of the Total Environment** 380: 48-65.

Kadlec R.H. and R.L.1996 **Knight. Treatment Wetlands.** Lewis, New York.

Cameron K. Madramootoo C. Crolla A. and C. Kinsley C. 2003. Pollutant removal from municipal Sewage lagoon effluents with a free- surface wetland. **Water Research** 37 : 2803-2812.

Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering 3rd**: Treatment Disposal Reuse. Mc Graw-Hill, New York.

Metcalf and Eddy. 2003. **Wastewater Engineering 4th**: Treatment and Reuse. Mc Graw-Hill, New York.

Parmley, R. **Hydraulics Field manual**. 1992. McGraw – Hill. U.S.A.

Jadhav R.S. and Buchberger S.G..1995. Effects of vegetation o flow through free water surface Wetlands. **Ecological Engineering** 5: 481-496.

Jing S.R. and Lin Y.F.. 2004. Seasonal Effect on Ammonia nitrogen removal by Constructed Wetlands treating Polluted river water in Southern Taiwan. **Environmental Pollution** 127: 291 – 301.

_____, _____, Lee D.Y. and Wang T.W..2001. Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands. **Bioresource Technology** 76: 131-135.

Zaini Ujang and Mogens Henze. 2006. **Municipal Wastewater Management in Developing Countries Principle and Engineering**. Lighting Source, Denmark.





ตารางผนวกที่ ก1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามมาตรฐาน					หมายเหตุ
		ก	ข	ค	ง	จ	
ความเป็นกรดและด่าง (PH)	-	5-9	-	-	-	5-9	
บีโอดี (BOD)	mg/l	20	30	40	50	200	
สารแขวนลอย (Suspended Solids)	mg/l	30	40	50	50	60	
ซัลไฟด์ (Sulfide)	mg/l	1		3	4		
สารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids)	mg/l	500					
ตะกอนหนัก (Settleable Solids)	mg/l	0.6					
น้ำมันและไขมัน (Fat Oil and Grease)	mg/l	20				100	
ทีเคเอ็น (TKN)	mg/l	35	40				

ที่มา: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับทั่วไป เล่มที่ 122 ตอนที่ 125ง ลงวันที่ 29 ธันวาคม 2548

ตารางผนวกที่ ก2 ประเภทของอาคารเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสีย

ประเภทอาคาร	ขนาดของอาคารตามมาตรฐานกำหนดการระบายน้ำทิ้ง				
	ก	ข	ค	ง	จ
อาคารชุด ตาม กฎหมายว่าด้วย อาคารชุด	≥ 500 ห้อง	100-500 ห้อง	≤ 100 ห้อง	-	-
โรงแรม ตาม กฎหมายว่าด้วย โรงแรม	≥ 200 ห้อง	60-200 ห้อง	≤ 60 ห้อง	-	-
หอพัก ตาม กฎหมายว่าด้วย หอพัก	-	≥ 250 ห้อง	50-250 ห้อง	10 - <50	-
สถานบริการ	-	≥ 5000	-	-	-
ประเภทสถาน อาบน้ำ นวดหรือ อบตัว	-	-	-	-	-
โรงพยาบาลของ ทางราชการหรือ สถานพยาบาล	30 เตียง	10-30 เตียง	-	-	-
อาคารโรงเรียน เอกชน โรงเรียน ของทางราชการ	25000 m ²	5000-25000 m ²	-	-	-
อาคารที่ทำการของ ทางราชการ	55000 m ²	10000-55000 m ²	-	-	-
อาคารของ ศูนย์การค้าหรือ ห้างสรรพสินค้า	25000 m ²	5000-25000 m ²	-	-	-
ตลาด ตามกฎหมาย ว่าด้วยการ สาธารณสุข	2500 m ²	1500-2500 m ²	-	500 - < 1000 m ²	-
ภัตตาคารหรือ ร้านอาหาร	2500 m ²	500-2500 m ²	-	100 - < 250 m ²	<100 m ²



ตารางผนวกที่ ข1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่อัตราการไหล 400 ลิตรต่อวัน

PH

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	เฉลี่ย	SD
Inf.	6.91	6.94	7.02	6.97	6.93	6.93	6.95	6.96	6.75	6.87	7.05	7.08	6.70	6.61	6.45	6.79	6.78	6.86	0.17
Eff1	6.88	7.09	7.59	7.04	6.63	7.02	7.08	7.22	6.33	6.61	6.62	7.64	6.64	6.85	6.87	6.60	6.71	6.91	0.35
Eff2	7.59	6.98	7.06	6.78	6.53	7.26	6.56	6.55	6.23	6.94	6.96	7.52	7.50	7.53	7.15	6.37	6.40	6.94	0.45
Eff3	7.80	8.37	7.86	7.02	7.08	7.31	7.07	7.05	7.08	7.31	7.07	7.53	6.54	6.49	7.09	6.83	6.70	7.19	0.48

BOD

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	เฉลี่ย	SD
Inf.	48.00	72.00	84.00	77.25	96.00	72.00	87.00	86.70	90.00	69.00	84.00	76.50	120	81	114.0	108.0	114	87.03	18.76
Eff1	5.40	4.80	4.80	6.90	7.05	4.20	4.35	4.65	4.95	5.25	5.70	5.25	3.3	2.6	2.6	4.6	2.6	4.65	1.32
Eff2	6.00	6.00	5.80	3.20	2.30	5.18	6.15	4.05	5.10	3.75	3.30	3.60	2.8	4.5	2.1	2.1	2.1	4.00	1.48
Eff3	9.00	4.80	5.40	7.50	6.60	6.45	3.60	6.45	4.95	5.55	4.65	4.05	3.4	2.4	2.9	1.0	2.7	4.79	2.04

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

COD

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Inf.	149.04	190.51	157.46	211.20	298.24	157.46	199.85	187.74	224.40	219.91	233.17	188.50	150.8	185.6	133.3	149.8	239.2
Eff1	38.64	29.16	24.22	48.00	49.92	30.28	24.22	24.22	17.95	26.93	36.82	26.93	17.4	11.6	19.7	15.0	36.8
Eff2	33.12	33.70	24.22	51.84	39.68	18.17	24.22	18.17	13.46	22.44	24.54	22.44	29	11.6	24.7	5.6	36.8
Eff3	49.68	43.42	12.11	53.76	43.78	36.34	30.28	12.11	22.44	31.42	24.54	17.95	34.8	34.8	39.5	22.5	73.6

หมายเหตุ Inf เฉลี่ย เท่ากับ 192.71 SD 42.35
 Eff1 เฉลี่ย เท่ากับ 28.11 SD 10.96
 Eff2 เฉลี่ย เท่ากับ 25.51 SD 11.25
 Eff3 เฉลี่ย เท่ากับ 34.30 SD 15.84

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

TSS

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Inf.	202	43	24	126	130	98	94	49	85	78	86	79	103	288	75	219	42
Eff1	7	2	75	4	6	6	4	4	24	21	13	11	12	28	10	4	3
Eff2	44	2	28	8	6	14	12	5	17	10	11	6	9	43	12	8	10
Eff3	47	4	17	6	6	18	16	35	4	12	12	9	36	41	43	30	11

หมายเหตุ	Inf	เฉลี่ย เท่ากับ	107.12	SD	69.66
	Eff1	เฉลี่ย เท่ากับ	13.76	SD	17.57
	Eff2	เฉลี่ย เท่ากับ	14.41	SD	12.35
	Eff3	เฉลี่ย เท่ากับ	20.41	SD	14.87

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Phosphate

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	เฉลี่ย	SD
Inf.	1.830	2.072	1.697	1.746	1.228	1.497	1.768	1.407	1.821	1.981	2.284	2.067	1.507	0.994	0.767	0.865	2.272	1.636	0.464
Eff1	0.055	0.086	0.122	0.093	0.078	0.076	0.085	0.158	0.420	0.350	0.207	0.223	0.179	0.159	0.712	0.219	1.773	0.294	0.415
Eff2	0.038	0.016	0.052	0.167	0.046	0.136	0.149	0.172	0.109	0.222	0.187	0.269	0.328	0.219	0.714	0.668	1.309	0.282	0.330
Eff3	0.054	0.028	0.045	0.110	0.074	0.075	0.092	0.160	0.208	0.291	0.332	0.299	0.466	0.314	0.647	0.530	1.369	0.300	0.331

N-NH₃

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	เฉลี่ย	SD
Inf.	14.56	9.52	8.75	39.20	42.84	47.6	50.96	43.68	75.88	42.56	36.96	38.25	39.872	31.64	36.12	43.12	45.08	38.03	16.04
Eff1	1.68	3.92	3.92	4.2	4.48	2.24	3.36	7.84	8.68	7.84	5.88	7.06	8.512	7.56	10.36	10.36	12.04	6.47	3.05
Eff2	1.68	3.92	3.92	1.68	2.24	3.92	4.20	4.76	5.32	7.56	8.12	7.17	8.792	6.44	13.16	12.6	14.28	6.46	3.92
Eff3	1.68	7.28	7.06	2.52	2.8	1.12	1.96	9.80	8.12	9.24	9.8	8.01	6.832	6.16	13.608	14.392	13.16	7.27	4.22

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Nitrate

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	เฉลี่ย	SD
Inf.	0.261	0.264	0.216	0.256	0.177	1.089	0.372	0.043	0.043	0.037	0.029	0.029	0.172	0.150	0.040	0.155	0.411	0.220	0.25
Eff1	0.137	0.233	0.300	0.326	0.165	0.443	0.308	0.137	0.044	0.028	0.090	0.041	0.115	0.097	0.066	0.427	0.201	0.186	0.13
Eff2	0.263	0.306	0.388	0.313	0.207	0.563	0.208	0.052	0.074	0.120	0.158	0.084	0.158	0.114	0.069	0.104	0.215	0.200	0.13
Eff3	0.138	0.202	0.525	0.360	0.199	0.538	0.244	0.061	0.148	0.105	0.227	0.087	0.166	0.117	0.041	0.102	0.177	0.202	0.15

TKN (วิเคราะห์เดือนละ 1 ครั้ง)

week	1	2	3	4	5
Inf.	49	47.6	47	55.16	25.2
Eff1	5.6	4.2	12.04	16.24	13.16
Eff2	4.2	2.8	8.4	12.6	14
Eff3	1.4	1.4	13.16	16.8	17.36

ตารางผนวกที่ ข2 ความสูงของพืช

วัน/เดือน/ปี	บ่อหลัก		บ่อควบคุมการทดลอง	
	ต้นกก (ชม)	บัวหลวง(ชม)	ต้นกก (ชม)	บัวหลวง(ชม)
เริ่มปลูก	10	8	10	8
1	15	15	17	13
2	38	18	34	15
3	61	23	64	26
4	72	38	83	35
5	86	44	107	46
6	113	60	133	50
7	128	85	137	81
8	142	97	158	89
9	145	112	160	96
10	151	122	163	105
11	157	125	165	116
12	165	130	168	119
13	167	132	170	120
14	171	139	174	123
15	176	143	175	127
16	183	146	177	129
17	189	153	180	130
ผลต่างความสูง (ชม./ต้น)	179	145	170	120
อัตราการใช้ เจริญเติบโต	0.06	0.06	0.058	0.083

หมายเหตุ: จำนวนดอกบัวทั้งหมดของบ่อทดลองหลัก (ชุดการทดลองที่ 1) นับตั้งแต่วันที่ออกดอก
จนสิ้นสุดการทดลอง จำนวนทั้งสิ้น 95 ดอก และบ่อควบคุมปลูกพืช
(ชุดการทดลองที่ 2) ทั้งสิ้น 40 ดอก



ภาพผนวกที่ ข1 กกลังกา(บ่อดูดองหลัก)HSF unit



ภาพผนวกที่ ข2 บัวหลวง (บ่อทดลองหลัก) FWS unit

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวลลิตี ทับทิมทอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 กันยายน 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดสกลนคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(โยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-