

ผลของตัวกลางที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน
โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวโค้ง



นายไพสิฐ กาญจนสุนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยุโทรคมนาคม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECT OF MEDIA ON PHOSPHORUS REMOVAL FROM DOMESTIC
WASTEWATER USING VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND



Mr. Paisit Kanjanasuntorn

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500416

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของค้ำกลางที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดย
บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง

โดย

นายไพสิฐ กาญจนสุนทร

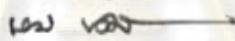
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



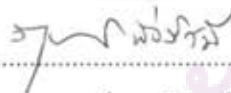
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบุตย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์)



กรรมการและเลขานุการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

ศูนย์วิทยุวิทยุวิทยุ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพสิฐ กาญจนสุนทร: ผลของตัวกลางที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง (THE EFFECT OF MEDIA ON PHOSPHORUS REMOVAL FROM DOMESTIC WASTEWATER USING VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND) อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร.อรัญ ขวาลภาฤทธิ์, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของตัวกลางที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง ตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ 4 ชนิดได้แก่ หินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อก และเปลือกหอย การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ระยะที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวกลาง 4 ชนิด และพิจารณาคัดเลือกตัวกลางที่ดีที่สุดมาทดลองต่อในระยะที่ 2 เพื่อศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งทั้ง 2 ระยะจะใช้พืชคือต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอไซด์ระหว่าง 185.2-192.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนโตรเจนระหว่าง 46.6-51.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสฟอรัสระหว่าง 7.6-8.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้แบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ บึงน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกทางชีวศาสตร์ที่ 5 เซนติเมตรต่อวัน อย่างไม่ต่อเนื่อง (เดิม 2 ชั่วโมง หยุค 2 ชั่วโมง) จากการทดลองในระยะที่ 1 พบว่าระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง เปลือกหอย และหินเกล็ด ตามลำดับ จึงทำการคัดเลือกอิฐบล็อกและอิฐแดงไปทำการทดลองต่อในการทดลองระยะที่ 2 ซึ่งหลังจาก 2 เดือน ผลการทดลองในระยะที่ 2 พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 93 ส่วนระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 90 ในการศึกษา กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ถูกกำจัดโดยกลไกการดูดซับโดยอิฐบล็อกเท่ากับ 4,812 มิลลิกรัม การนำไปใช้โดยต้นก้ามกุ้งเท่ากับ 29 มิลลิกรัม การย่อยสลายและการดูดซึมโดยจุลินทรีย์เท่ากับ 245 มิลลิกรัม และจากปัจจัยอื่นๆเท่ากับ 375 มิลลิกรัม รวมทั้งสิ้นฟอสฟอรัสถูกกำจัดภายในระบบมีค่าเท่ากับ 5,461 มิลลิกรัม และปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 395 มิลลิกรัม กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ถูกกำจัดโดยกลไกการดูดซับโดยอิฐแดงเท่ากับ 4,575 มิลลิกรัม การนำไปใช้โดยต้นก้ามกุ้งเท่ากับ 154 มิลลิกรัม การย่อยสลายและการดูดซึมโดยจุลินทรีย์เท่ากับ 431 มิลลิกรัม และจากปัจจัยอื่นๆเท่ากับ 96 มิลลิกรัม รวมทั้งสิ้นฟอสฟอรัสถูกกำจัดภายในระบบมีค่าเท่ากับ 5,256 มิลลิกรัม และปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 600 มิลลิกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4870606721: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND / PHOSPHORUS REMOVAL
/ ADSORPTION / DOMESTIC WASTEWATER

PAISIT KANJANASUNTORN: THE EFFECT OF MEDIA ON PHOSPHORUS
REMOVAL FROM DOMESTIC WASTEWATER USING VERTICAL FLOW
CONSTRUCTED WETLAND. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. ORATHAI
CHAVALAPARIT, Ph.D. 150 pp.

This study quantify the effect of different filter media on phosphorus removal from domestic wastewater using vertical flow constructed wetland. Thus, a marble-filled wetland, a red brick-filled wetland, a shell-filled wetland and a block-filled wetland were operated over two phases. The first experiment was also ascertained the phosphorus removal efficiency of the 4 materials. Then, two materials were selected to use for the performance of the second experiment. Both of the experiments were planted with *Heliconia psittacorum cv 'Lady Di'* and operated identically with synthetic wastewater, containing COD 185.2-192.2 mg/l, TKN 46.6-51.5 mg/l and TP 7.6-8.2 mg/l at a hydraulic loading rate of 5 cm/d, intermittently. In the first experiment results, the block-filled wetland was showed the best phosphorus removal efficiency. In the second experiment, the block-filled wetland was showed the best phosphorus removal efficiency rate at 93.09 % compared to the brick-filled wetland at 89.53 % after 2 months. In a block-filled wetland, the phosphorus removal mechanism was as follows: influent phosphorus level was 5,856 mg, phosphorus adsorption by block was 4,812 mg, plant uptake 29 mg, adsorb by microorganism 245 mg and other were 375 mg. Total phosphorus removal was 5,461 mg and effluent phosphorus remaining was 395 mg. In the red brick-filled wetland, phosphorus removal mechanism was as follows: influent phosphorus was 5,856 mg, phosphorus adsorption by red brick was 4,575 mg, plant uptake 154 mg, adsorb by microorganism 431 mg and other were 96 mg. Total phosphorus removal was 5,256 mg and effluent phosphorus remaining was 600 mg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Engineering

Field of Study Environmental Engineering

Academic Year 2007

Student's signature..... Paisit Kanjanasuntorn

Advisor's signature..... Orathai Chavalaparit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงของ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถชวลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้โอกาส ให้แนวทาง และให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่ได้ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ล้อม ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้และอบรมสั่งสอนแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณดร.พันธวิศ สัมพันธ์พานิช ที่ให้ความสนับสนุนในด้านการเรียน และให้ความช่วยเหลือทุกด้านตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณครูปองที่อนุเคราะห์เครื่องสูบน้ำ รวมไปถึงคำแนะนำต่างๆ แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์
ขอขอบคุณพี่พนมและพี่ๆที่ห้องธุรการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณน้องหญิง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านปฏิบัติการ คำแนะนำ และการให้กำลังใจต่อผู้ทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน ไอ และเดียร์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆน้องๆ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ร่วมเรียนและทำงานด้วยกันตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสนับสนุนและเป็นแรงผลักดันกำลังใจอย่างดียิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียชุมชน.....	4
2.2 บึงประดิษฐ์.....	21
2.3 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง.....	36
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	46
3.1 แผนการทดลอง.....	46
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	48
3.3 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์.....	52
3.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	53
3.5 การศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ.....	58
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
4.1 การดำเนินการทดลอง.....	60
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพ - เคมีของตัวกลาง.....	61
4.3 น้ำเสียสังเคราะห์.....	62

บทที่	หน้า
4.4	ระยะที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด อีฐแดง เปลือก หอย และอิฐบล็อก.....64
4.5	ระยะที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกและอิฐแดง.....74
4.6	การศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก.....85
4.7	การศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง.....91
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....99
5.1	สรุปผลการทดลอง.....99
5.2	ข้อเสนอแนะ.....100
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก.....	106
ภาคผนวก ข.....	123
ภาคผนวก ค.....	126
ภาคผนวก ง.....	137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	150



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน.....	4
2.2 ลักษณะน้ำเสียชุมชน.....	5
2.3 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย.....	6
2.4 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร.....	6
2.5 ลักษณะน้ำเสียบางประเภทในประเทศไทย.....	7
2.6 ค่าฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำต่าง ๆ ในประเทศไทย.....	8
2.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ระบายออกมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในปี พ.ศ.2536.....	9
2.8 มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำปิดของประเทศญี่ปุ่น.....	12
2.9 มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	13
2.10 คุณสมบัติของพืช ใสล่พื้นน้ำชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย.....	26
2.11 หน้าที่ของพืช ใสล่พื้นน้ำในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประดิษฐ์.....	28
2.12 ความเข้มข้นและอัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้โดยทั่วไปในพืช ใสล่พื้นน้ำ.....	29
2.13 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	33
2.14 ค่าเสนอแนะในการออกแบบความลึกสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	34
2.15 ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	35
3.1 แสดงตัวแปรและความถี่ในการวิเคราะห์น้ำที่ออกจากระบบ.....	57
3.2 แสดงวิธีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	57
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางทั้ง 4 ชนิด.....	62
4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในระยะที่ 1.....	63
4.3 การลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในระยะที่ 2.....	63
4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด.....	72
4.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล๊อคและอิฐแดง.....	83
4.6 ผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับของอิฐบล๊อค.....	86
4.7 ผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับของอิฐแดง.....	94
ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของระบบในระยะที่ 1.....	107
ก.2 แสดงค่าพีเอชของระบบในระยะที่ 1.....	108
ก.3 แสดงค่าโออาร์พี (mV) ของระบบในระยะที่ 1.....	109
ก.4 แสดงค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	110
ก.5 แสดงค่าซีโอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	111

ตารางที่	หน้า
ก.6 แสดงค่าบีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	112
ก.7 แสดงค่าทีเคเอ็น (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	112
ก.8 แสดงค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	113
ก.9 แสดงค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1.....	114
ก.10 แสดงค่าอุณหภูมิจึง (องศาเซลเซียส) ของระบบในระยะที่ 2.....	115
ก.11 แสดงค่าพีเอชของระบบในระยะที่ 2.....	116
ก.12 แสดงค่าไออาร์ที (mV) ของระบบในระยะที่ 2.....	117
ก.13 แสดงค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	118
ก.14 แสดงค่าซีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	119
ก.15 แสดงค่าบีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	120
ก.16 แสดงค่าทีเคเอ็น (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	120
ก.17 แสดงค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	121
ก.18 แสดงค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2.....	122
ค.1 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของหินเกล็ด.....	129
ค.2 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของอิฐแดง.....	131
ค.3 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของเปลือกหอย.....	133
ค.4 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของเศษอิฐบล็อก.....	135
ง. 1 ผลการทดลองการทำ Tracer ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง.....	139
ง. 2 ผลการทดลองการทำ Tracer ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก.....	144



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมน้ำ.....	10
2.2 วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสแบบต่าง ๆ.....	14
2.3 กลไกการเกิด Luxury phosphorus uptake.....	18
2.4 กระบวนการโฟรีดอกซ์ (ใช้กำจัดฟอสฟอรัสที่สายหลัก).....	19
2.5 กระบวนการฟอสทริป TM I (ใช้กำจัดฟอสฟอรัสที่สายรอง).....	20
2.6 เอสบีอาร์เพื่อกำจัดฟอสฟอรัส.....	20
2.7 แผนภาพการไหลของระบบโอวาสะ TM	21
2.8 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน.....	23
2.9 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลในแนวนอน.....	24
2.10 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวคิ่ง.....	24
2.11 พีชไหลพื้นน้ำ.....	27
2.12 ส่วนประกอบหลักของพีชที่ไหลพื้นน้ำ.....	27
2.13 การกระจายของตระกูลอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่สำคัญในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C.....	38
3.1 แผนผังของการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์.....	47
3.2 แสดงขนาดของถังที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวคิ่ง.....	49
3.3 แสดงระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวคิ่ง.....	50
3.4 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.5 การหาอัตราส่วนช่องว่าง โดยการแทนที่ของน้ำ.....	54
3.6 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำ.....	56
4.1 อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	64
4.2 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	65
4.3 โออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	66
4.4 ของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	67
4.5 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	68
4.6 บีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	69
4.7 ทีเคเอ็นของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	70
4.8 ฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	71
4.9 ฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ.....	71
4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางทั้ง 4 ชนิด.....	73
4.11 อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม...74	

รูปที่	หน้า
4.12 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	75
4.13 โออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม....	76
4.14 ของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	77
4.15 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	79
4.16 บีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	79
4.17 ทีเคเอ็นของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม....	80
4.18 ฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	81
4.19 ฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	82
4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด อีฐแดง และชุดควบคุม.....	84
4.21 ความสามารถในการละลายของโลหะฟอสเฟต.....	88
4.22 ความสูงเฉลี่ยของดินก้ามกุ้ง.....	89
4.23 น้ำหนักของดินก้ามกุ้ง.....	90
4.24 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด.....	93
4.25 กราฟร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสในบึงจัดต่างๆของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบด.....	93
4.26 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐแดง.....	98
4.27 กราฟร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสในบึงจัดต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐแดง.....	98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบัน การนำระบบจัดการน้ำเสียชุมชนที่ยึดหลักการบำบัดโดยธรรมชาติ เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาน้ำเสียในชุกวิฤตพิลังงาน โลก ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งได้มีการใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนอย่างแพร่หลายในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีและต้นทุนต่ำ ความต้องการพลังงานต่ำ (Korkusuz และคณะ, 2005)

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ มีความเข้มข้นประมาณ 6-10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Eutrophication ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้สาหร่าย (Algae) เจริญเติบโตเพิ่มขึ้นในแหล่งน้ำ (Zouboulis และ Prochaska, 2006) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบทางชีวภาพโดยทั่วไปค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเหตุผลด้านเครื่องจักรกล การเงิน และความจำกัดด้านบุคลากร ทางเลือกวิธีการบำบัดอื่นๆ จึงควรนำมาประยุกต์ใช้เพื่อรับมือกับปัญหานี้ (Tsagarakis และคณะ, 2003) ระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปจะมีการบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) และขั้นที่สอง (Secondary treatment) แต่ในอนาคตอันใกล้อาจต้องเพิ่มระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) เพื่อลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสของน้ำออกให้มีค่าไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Brooks และคณะ, 2000)

การศึกษาที่ผ่านมา ได้รายงานถึงศักยภาพการใช้บึงประดิษฐ์ในการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสีย การกำจัดฟอสฟอรัสโดยบึงประดิษฐ์อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้สารอาหาร โดยพืชกระบวนการทางชีวภาพ การดูดซับโดยตัวกลางและการตกตะกอน จากกลไกเหล่านี้ตัวกลางอาจเป็นปัจจัยที่มีบทบาทมากที่สุดและเป็นปัจจัยที่ง่ายต่อการควบคุมมากที่สุด ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความสำคัญที่จะเลือกตัวกลางที่สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้มากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลาง (Zouboulis และ Prochaska, 2006)

ตัวกลางที่ใช้ในบึงประดิษฐ์ ได้ถูกใช้เพื่อปรับปรุงกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการตกตะกอนและการดูดซับ นอกจากกรวดและทรายแล้ว ยังประกอบด้วย หินปูน หินเชล กากแรวอลลาสโตไนท์ กรวดที่มีเหล็กอยู่มาก ซีโอไลท์ แคลไซต์ และวัสดุอื่นๆ ที่ประดิษฐ์ขึ้น ผิวตัวกลางเหล่านี้จะประกอบไปด้วยออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียม ซึ่งช่วยในการตกตะกอน

ของแคลเซียมฟอสเฟต (Zhu และคณะ, 1997) นอกจากนี้แร่เหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียมแล้ว ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสยังถูกควบคุมโดยค่าพีเอชของตัวกลาง และพื้นที่ผิวในการดูดซับ (Zouboulis และ Prochaska, 2006) พื้นที่ผิวมาก วัสดุจะมีลักษณะละเอียด สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (และกำจัด) แต่ก็อาจนำไปสู่การอุดตันได้

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางเป็นหินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อกและเปลือกหอย รวมไปถึงการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง ซึ่งตัวกลางที่ใช้เป็นวัสดุเศษเหลือใช้จากการก่อสร้างและเศษเปลือกหอย พืชที่ใช้คือต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di')

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่มีการใช้ตัวกลางแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่หินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อก และเปลือกหอย
2. ศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ ผิวดินในแนวตั้ง โดยศึกษาผลของการใช้ตัวกลางกรองที่แตกต่างกัน มีขอบเขตของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ทำการวิจัยโดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้น พืชที่ใช้ในการทดลองคือต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ ซึ่งมีค่าซีไอดี 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนโตรเจน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสฟอรัส 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

ธาตุองค์ประกอบ (The Elemental Compositions), การกระจายขนาด (Particle Size Distribution), อัตราส่วนช่องว่าง (Void Space), พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) และพีเอช (pH)

3. ป้อนน้ำเสียดังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate: HLR) ที่ 10 เซนติเมตรต่อวัน อย่างไม่ต่อเนื่อง (เต็ม 2 ชั่วโมง หยุด 2 ชั่วโมง)

4. ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช โออาร์ที ปริมาณของแข็งแขวนลอย ซีไอดี บีไอดี ทีเคเอ็น ฟอสเฟตฟอสฟอรัส และฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง และเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน

2. การนำวัสดุเศษเหลือใช้จากการก่อสร้าง และเศษเปลือกหอยกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยนำมาใช้เป็นตัวกลางกรองในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของหินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อก และเปลือกหอย ซึ่ง มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส

4. ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดและความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่มีการใช้ตัวกลางเป็นหินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อก และเปลือกหอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater)

น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหาร และชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงถึงอัตราการเกิดน้ำเสียในภาคต่างๆ ของประเทศไทย

ตารางที่ 2.1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน-วัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160-214	165-242	170-288	176-342	183-406	189-482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200-253	216-263	239-277	264-291	291-306	318-322
ใต้	171	195	204	226	249	275

ที่มา : อนุพันธ์ และคณะ (2545)

2.1.1 ลักษณะน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบต่างๆ แสดงตามตารางที่ 2.2 ส่วนตารางที่ 2.3-2.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะน้ำเสียต่าง ๆ ของชุมชนหลายประเภทในประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
1.ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล.	390	720	1230
ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	มก./ล.	270	500	860
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	มก./ล.	120	210	400
2.ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มล./ล	5	10	20
3.ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand;BOD)	มก./ล.	110	190	350
4.ค่าซีโอดี (chemical Oxygen Demand;COD)	มก./ล.	250	430	800
5.ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	มก./ล.	20	40	70
อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	มก./ล.	8	15	25
แอมโมเนีย (Free ammonia)	มก./ล.	12	25	45
ไนไตรท์ (Nitrites)	มก./ล.	0	0	0
ไนเตรท (Nitrate)	มก./ล.	0	0	0
6.ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	มก./ล.	4	7	12
สารอินทรีย์ (Organic)	มก./ล.	1	2	4
สารอนินทรีย์ (Inorganic)	มก./ล.	3	5	8
7. คลอไรด์ (Chloride) ⁽¹⁾	มก./ล.	30	50	90
8.ซัลเฟต (Sulfate) ⁽¹⁾	มก./ล.	20	30	50
9.สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO ₃)	มก./ล.	50	100	200
10.ไขมัน (Grease)	มก./ล.	50	90	100
11.Total Coliform Bacteria	MPN/100ml	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ¹⁰

หมายเหตุ: (1) เป็นค่าที่เพิ่มจากค่าที่ตรวจพบในน้ำใช้ปกติ

ที่มา : Tchobanoglous และคณะ (2004)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ชุมชน	บีโอดี	ซีโอดี	เอสเอส	ทีเคเอ็น	ฟอสฟอรัส
อาคารชุดพักอาศัย					
- น้ำส้วม	110	220	-	40.8	1.3
- น้ำเสียอื่น	151	285	-	21	2.1
โรงแรมชั้นหนึ่ง	190	311	84	23	1.8
หอพัก					
- น้ำส้วม	123	1,290	666	32.9	6.8
- น้ำเสีย	75	135	29	19.2	3.9
โรงพยาบาล	170	282	69	27.6	2.9
ภัตตาคาร	919	1,785	401	55.1	3.2
ตลาด	1,123	2,242	551	53.9	4.0
ศูนย์การค้า	81	224	61	66.8	10.1

ที่มา : ธงชัย (2545)

ตารางที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียจากบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร

หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ชุมชน	บีโอดี	ซีโอดี	เอสเอส	ทีเคเอ็น	ฟอสฟอรัส
ส้วม	695	1,350	480	295	24
อาบ	170	285	57	13.5	3.3
ซักล้าง	92	250	51	12	17.2
ครัว					
- มีตะแกรง	500	925	200	18	12.7
- ไม่มีตะแกรง	1,600	2,550	1,080	100	87.2

ที่มา : ธงชัย (2545)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะน้ำเสียบางประเภทในประเทศไทย

หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ชุมชน	บีโอดี	ซีโอดี	เอสเอส	ทีเคเอ็น	ฟอสฟอรัส
โรงพยาบาล					
- เฉลี่ยจากทั่วประเทศ	116	237	-	42.2	9.2
- ความน่าจะเป็นร้อยละ50	92	200	-	40.0	-
ชุมชนห้วยขวาง					
- เฉลี่ย	117	513	82.5	26.0	-
- ความน่าจะเป็นร้อยละ50	80	330	-	20.0	-
โรงแรมในภูเก็ต	138	277	46.8	25.3	3.1
บ้านเรือเดี่ยวในภูเก็ต					
- น้ำส้วม	1,000	2,688	1,720	400	23.0
- น้ำเสียอื่น	121	297	59	31.0	9.0

ที่มา : ธงชัย (2545)

2.1.2 ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนมีความเข้มข้นประมาณ 6-10 มิลลิกรัมต่อลิตร สารประกอบของฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียอยู่ในรูปต่างๆกันของฟอสเฟต ได้แก่ ออร์โทฟอสเฟต และโพลีฟอสเฟต รวมกันประมาณ 70-90% ที่เหลือจะเป็นอินทรีย์ฟอสเฟต โดยฟอสเฟตเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ หรือในรูปของซากสิ่งมีชีวิตที่ไม่ละลายน้ำ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเกิดจากการสลายตัวของโปรตีนและขับฟอสเฟตออกมากับปัสสาวะ

สารซักฟอกก็เป็นแหล่งกำเนิดของฟอสเฟตในน้ำ โดยพบว่าในสารซักฟอกมีฟอสฟอรัสประกอบอยู่ประมาณ 12-13% หรือโพลีฟอสเฟตมากกว่า 50% การใช้สารซักฟอกในปัจจุบันมีปริมาณสูงมาก

ประเทศไทยใช้สารประกอบฟอสเฟตหลัก ๆ ในกิจกรรมสองแหล่งใหญ่ ๆ คือ ปุ๋ยและอุตสาหกรรม (สำหรับผลิตอาหารสัตว์ สารซักฟอก อาหารสำเร็จรูป เครื่องดื่ม และอาหารทะเล

เรียงปริมาณจากมากไปหาน้อยตามลำดับ โดยนำฟอสฟอรัสเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด 35,000 ตันในปี พ.ศ.2535) ฟอสฟอรัสเมื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย อาจถูกพืชใช้ไปไม่หมด และจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำในหน้าฝน สำหรับส่วนที่ถูกพืชใช้ไปก็จะไปสะสมอยู่ในดิน ใบ ดอก ผล ซึ่งเป็นอาหารของสัตว์และคน และจะถูกปล่อยระบายออกมาพร้อมกับการถ่ายมูล ซึ่งจะกลับลงสู่แหล่งน้ำได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำต่างๆของประเทศไทย ส่วนตารางที่ 2.7 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่ระบายจากแหล่งกำเนิดต่างๆของประเทศไทย โดยพบว่าแหล่งกำเนิดฟอสฟอรัสที่สำคัญคือการเกษตรกรรม (ร้อยละ 65.6) ส่วนฟอสฟอรัสที่ปล่อยจากน้ำเสียชุมชนเป็นเพียงร้อยละ 14.7 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ระบายลงน้ำทั้งหมดทั่วประเทศ ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสจากผงซักฟอกคิดเป็นสัดส่วนเพียงร้อยละ 24-26 ของฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้ปุ๋ยบ้านเรายังอยู่ในอัตราต่ำ

ตารางที่ 2.6 ค่าฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำต่าง ๆ ในประเทศไทย

	หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร
แม่น้ำเจ้าพระยา (อุษายาถึงปากแม่น้ำ)	0.02
แหล่งน้ำจืดกลางชุมชน เช่น บึงแก่นนคร และบึงทุ่งสร้าง (ขอนแก่น)	0.1-0.5
ลำตะคอง (นครราชสีมา)	
คูคลองในกรุงเทพมหานคร	5.9-36.2
แม่น้ำบางปะกง, แม่งลอง, ท่าจีน	0.01-0.39
ทะเลสาบสงขลา	0.014-0.086
ท่าเรือน้ำลึกแหลมฉบัง	0.01-0.015
อ่างเก็บน้ำขนาดเล็กในขอนแก่นและมหาสารคาม	1.63 ในหน้าแล้ง
	0.27 ในหน้าฝน

ที่มา : ธงชัย (2545)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ระบายออกมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในปี พ.ศ.2536

แหล่งกำเนิด	ปริมาณฟอสฟอรัส (กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อปี)	ร้อยละ	หมายเหตุ
1. น้ำเสียชุมชน			
- กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล	5,320	-	- น้ำเสียในกรุงเทพมหานครมี ฟอสฟอรัสมากกว่าในเขตอื่น ๆ
- ทั่วประเทศ	31,226	14.7	- สัดส่วนฟอสฟอรัสที่มาจากสาร ซักฟอกเท่ากับร้อยละ24-26 นอกจากนั้นมาจากการประกอบ อาหารและส้วม
2. ปศุสัตว์	33,116	15.6	
3. อุตสาหกรรม	8,500	4.0	- หักฟอสฟอรัสส่วนที่นำไปใช้ใน อุตสาหกรรมอาหาร, สารซัก ฟอกและอาหารสัตว์ออกแล้ว
4. เกษตรกรรม	138,966	65.6	- จากตัวเลขนำเข้าปุ๋ย (2533)
รวม	211,808*	100	

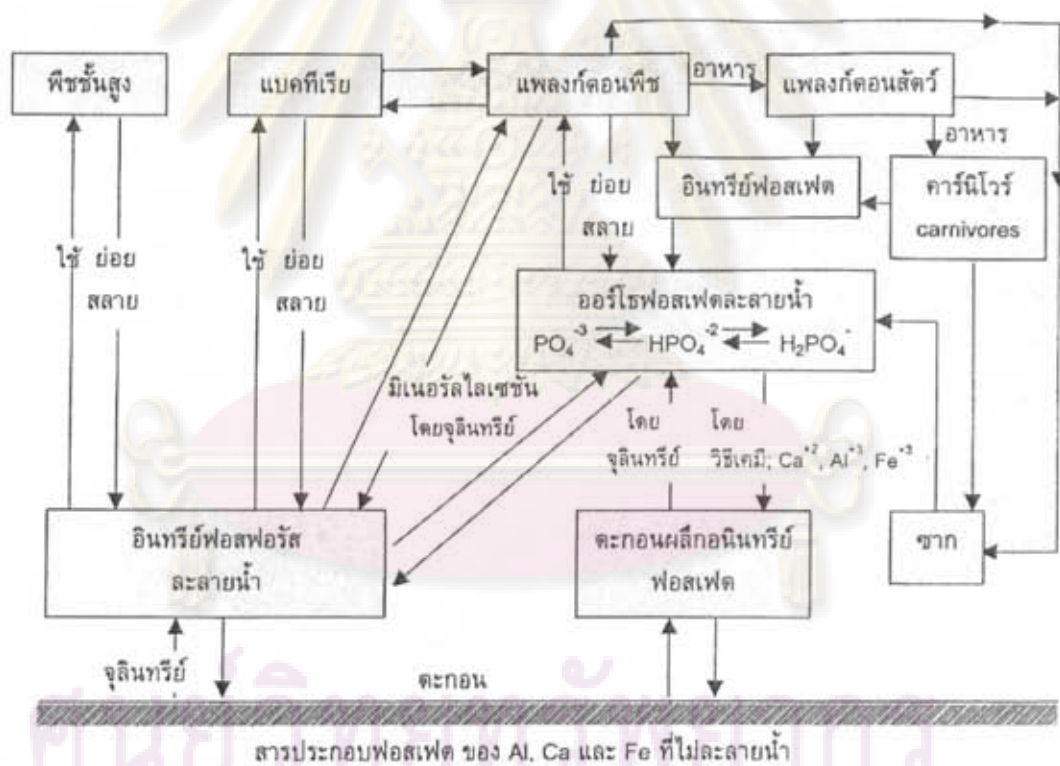
หมายเหตุ : ไม่รวมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ที่มา : ธงชัย (2545)

2.1.3 วัฏจักรของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นอีกธาตุหนึ่งสำหรับกรคนิวคลีอิกและเอเอ็มเบรอนของเซลล์รวมทั้งเอทีพีในเซลล์ ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกอย่างด้วยเช่นกัน ดูรูปที่ 2.1 ฟอสฟอรัสนี้ก็เหมือนกับคาร์บอนและไนโตรเจนที่จะแปรกลับไปมาระหว่างรูปอินทรีย์และรูปอนินทรีย์แต่จะไม่เหมือนกับไนโตรเจนที่ฟอสฟอรัสจะอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่สถานะวาเลนซ์ +5 เท่านั้น ทั้งนี้ อนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ คือเป็นเกลือของอะลูมินัม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก เช่นในรูปของ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ [Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] วิเวียนไนต์ [vivianite, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$] หรือวาริสไซต์

(Variscite, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยอัตราการละลายหรือไม่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ แต่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถแปลงรูปอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำเป็นออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่จุลินทรีย์อีกกลุ่ม เช่น แบคทีเรีย (เช่น *B. Subtilis*, *Arthrobacter*) แอกทิโนมัยซีตัส (เช่น *Streptomyces*) และฟังไจ (เช่น *Aspergillus*, *Penicillium*) จะสามารถเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตให้เป็นออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้เช่นกัน ซึ่งฟอสเฟตในรูปละลายน้ำนี้จะถูกแพลงก์ตอนทั้งพืชและสัตว์นำไปใช้เป็นธาตุอาหารต่อไป ส่วนจุลินทรีย์อีกกลุ่มสามารถแปลงรูปฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำที่สะสมตัวอยู่ที่ก้นน้ำ ให้กลายเป็นอินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายน้ำซึ่งพืชชั้นสูงจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ขึ้นได้ ทั้งนี้แบคทีเรียและฟังไจถือว่าเป็นสิ่งมีชีวิตหลักที่แปลงรูปฟอสเฟตให้อยู่ในรูปซึ่งพืชและจุลินทรีย์กลุ่มอื่น ๆ สามารถออกมาจากสารประกอบฟอสเฟต แล้วนำอินทรีย์ฟอสเฟตที่ได้นี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.1 วัฏจักรฟอสเฟตในสิ่งแวดล้อมน้ำ (ธงชัย, 2545)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในน้ำแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือชนิดละลายน้ำและชนิดที่อยู่ในรูปของแข็งหรือแขวนลอย และสามารถแบ่งออกได้สามแบบตามลักษณะของโครงสร้างของโมเลกุล คือ ออร์โธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟต โดยปกติแล้วออร์โธและโพลีฟอสเฟตจะละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ ส่วนอินทรีย์ฟอสเฟตนั้นจะละลายหรือแขวนลอยก็ได้ ทั้งนี้เพราะอินทรีย์ฟอสเฟตนั้นจะพบได้ในเซลล์รูปแบบต่าง ๆ เช่น ในเซลล์จุลินทรีย์ ในพืชผัก ในมูลสัตว์ ฯลฯ การหาฟอสฟอรัสละลายหรือค่าเอสพี (Soluble P, SP) มักทำโดยการกรองตัวอย่างน้ำผ่านกระดาษกรองเมมเบรนละเอียดขนาดรู 0.45 ไมครอน ทั้งนี้อาจกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C มาก่อน เพื่อให้ไม่อุดตันที่กระดาษกรอง 0.45 ไมครอนและการกรองทำงานได้ง่ายขึ้น ส่วนการหาฟอสฟอรัสในรูปของแข็งก็ทำได้โดยหาฟอสฟอรัสทั้งหมดหรือทีพี (TP) โดยไม่ต้องกรองตัวอย่างน้ำ และนำค่าทั้งสองมาลบออกจากกัน

2.1.5 ยูโทรฟิเคชัน

หากมีธาตุอาหารไนโตรเจนและ/หรือฟอสฟอรัสมากเกินไปในแหล่งน้ำเปิด เช่น อ่างเก็บน้ำหรือทะเลสาบ หรือหนองบึงที่มีเวลากักน้ำมากกว่า 20 วัน ก็จะทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันขึ้นได้ ทำให้น้ำประปามีกลิ่นคาวของสาหร่าย หรือปลาตายในช่วงกลางคืน (ที่ไม่มีการสังเคราะห์แสงและค่าดีออกซิเจนถึงศูนย์) ค่าวิกฤต (Critical Value) ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเท่ากับ 0.05-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.007-0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ หากเกินค่านี้แล้วก็จะสามารถเกิดปรากฏการณ์ "น้ำขึ้นลงสีแดง" หรือ red tide อันเป็นรูปแบบหนึ่งของยูโทรฟิเคชันได้ ทั้งนี้ถ้าทะเลสาบตื้น ซึ่งวัดได้ด้วยอัตราส่วน V:A ของทะเลสาบ (เมื่อ V = ปริมาตรของน้ำ และ A = พื้นผิวน้ำ) ตื้นน้อยกว่า 5 เมตร แล้ว โอกาสเกิดเป็นทะเลสาบยูโทรฟิเคด (Eutrophicated lake) ก็เป็นไปได้มาก ตารางที่ 2.8 แสดงค่ามาตรฐานของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเปิดของประเทศญี่ปุ่น จะเห็นได้ว่ามาตรฐานของสองธาตุนี้นี้มีค่าต่ำมาก จึงไม่ควรปล่อยธาตุอาหารสองชนิดนี้ลงแหล่งน้ำเปิด และเป็นอีกเหตุผลหนึ่งว่าการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียนี้มีความจำเป็นและสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันมากเพียงใด (ธงชัย, 2545)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำปิดของประเทศญี่ปุ่น

หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ชั้น	ประโยชน์การใช้น้ำ	ไนโตรเจน ทั้งหมด	ฟอสฟอรัส ทั้งหมด
ทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำ			
I	อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติและการใช้งานในระดับ II-V	0.1	0.005
II	ระบบผลิตน้ำประปาชั้น 1 2 และ 3 (ยกเว้นชนิดพิเศษ) การประมง ชั้น 1 ออบ และการใช้งานในระดับ III-V	0.2	0.01
III	ระบบผลิตน้ำประปาชั้น 3 (ชนิดพิเศษ) และการใช้งานในระดับ IV-V	0.4	0.03
IV	การประมง ชั้น 2 และการใช้งานในระดับ V	0.6	0.05
V	การประมง ชั้น 3 อุตสาหกรรม การเกษตร และอนุรักษ์ สิ่งแวดล้อม	1	0.1
ชายฝั่งทะเล			
I	อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติและการใช้งานในระดับ II-V	0.2	0.02
II	การประมงชั้น 1 การออบ และการใช้งานในระดับ III-IV (ยกเว้น การประมงชั้น 2 และ 3)	0.3	0.03
III	การประมงชั้น 2 และการใช้งานในระดับ IV (ยกเว้นการประมง ชั้น 3)	0.6	0.05
IV	การประมงชั้น 3 อุตสาหกรรม และการอนุรักษ์แหล่งอาศัยทาง ธรรมชาติสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำทะเล	1	0.09

หมายเหตุ : 1. เป็นมาตรฐานสำหรับค่าเฉลี่ยทั้งปี

2. ใช้กับทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำหรือทะเล ที่อาจมีปัญหสาหร่ายไฟโตแพลงก์ตอน

3. มาตรฐานไนโตรเจนใช้กับทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำที่มีไนโตรเจนเป็นธาตุจำกัด

สำหรับการเติบโตของไฟโตแพลงก์ตอน

4. มาตรฐานฟอสฟอรัสบังคับใช้กับแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร

ที่มา : ธงชัย (2545)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.6 มาตรฐานน้ำทิ้ง

การที่จะกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่จะระบายออกจากระบบบำบัดน้ำเสียไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะขึ้นอยู่กับสภาพท้องถิ่นแต่ละแห่งอย่างมาก เช่น ระดับของการนำน้ำในแหล่งน้ำไปใช้ เวลาที่กักน้ำของแหล่งน้ำเปิด ความเร็วของกระแสน้ำในลำน้ำ ปริมาณธาตุอาหารจากแหล่งไร่จุดอื่นๆ การเกษตรกรรมในท้องที่ ขนาดหรือพื้นที่ของกลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำท่า หรือน้ำในลำน้ำที่จะมาเจือจางธาตุอาหารจนไม่เกิดปัญหา ฯลฯ ในสหรัฐอเมริกา คานาดา และออสเตรเลีย มีมาตรฐานที่แตกต่างกันไปในแต่ละรัฐและแต่ละกลุ่มน้ำ และในบางกรณียังแปรผันตามฤดูกาลอีกด้วย อย่างไรก็ตามสิ่งที่แน่ชัดก็คือประเทศต่างๆ ทั่วโลกจะให้ความสนใจกับปัญหาจากธาตุอาหารเหล่านี้ และจะออกกฎหมายหรือมาตรฐานที่เข้มงวดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ตารางที่ 2.9 เป็นตัวอย่างของมาตรฐานธาตุอาหาร ในน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนบางชุมชน

ตารางที่ 2.9 มาตรฐาน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไนโตรเจนทั้งหมด	ฟอสฟอรัสทั้งหมด	หมายเหตุ
5	1	น้ำเสียชุมชน, ออสเตรเลีย
15	4.5	ค่าสูงสุด, น้ำเสียชุมชน ,ออสเตรเลีย
3	1	รัฐฟลอริดา
6	2	บริติช โคลัมเบีย, คานาดา
5	1	หน้าหนาว, อาร์เคนซอสส์
5	0.05	ค่าที่ต้องการได้, น้ำชลประทานใช้ระยะยาว (100 ปี)
15	-	ค่าที่ยอมรับได้, น้ำชลประทานใช้ระยะสั้น (20 ปี)
20	1.0	ค่าสูงสุด, เริ่มบังคับใช้กับโรงบำบัดใหม่ เมื่อ 1 เมษายน 2542 กับโรงบำบัดเก่าเมื่อ 1 ตุลาคม 2542
120	16	น้ำเสียสำนักงานหรือโรงงานที่ปล่อยน้ำเสียเกิน 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนปล่อยลงสู่ท่อเทศบาลกรุงโตเกียว
8	1	ในสหรัฐอเมริกา มาตรฐานแปรผันไปตามท้องถิ่น, ความสามารถรองรับของแหล่งน้ำและการเมือง ค่า 8 และ1 นี้ถือว่าเข้มงวดน้อยที่สุด
10	1	ข้อเสนอแนะขั้นต่ำ (อะลูมิเนียม) ของกลุ่มสหภาพยุโรป เมื่อทิ้งลงแหล่งน้ำที่มีความอ่อนไหวต่อปัญหายูโทรฟิเคชัน

ที่มา : ธงชัย (2545)

2.1.7 การกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียสามารถทำได้ด้วยสองมาตรการใหญ่ๆ คือโดยวิธีเชิงชีวภาพและเคมี รวมทั้งอาจมีการผสมสองมาตรการเข้าไว้ด้วยกันในลักษณะพันทาง (Hybrid) ด้วย แต่มีแนวโน้มอย่างมากว่าระบบชีวภาพกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นตามลำดับ เพราะเหตุผล 3 ประการ ได้แก่ 1) ปริมาณสลัดจ์จากระบบฯ กำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีน้อยกว่า 2) ค่าใช้จ่ายของสลัดจ์ชีวภาพมีมากกว่าเพราะมีสัดส่วนของฟอสฟอรัสในสลัดจ์มาก และ 3) น้ำเสียเองเป็นวัตถุดิบในการกำจัดฟอสเฟตทางชีวภาพได้ สรุปกระบวนการต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแสดงในรูปที่ 2.2



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 2.2 วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสแบบต่างๆ
ที่มา : ธงชัย (2545)

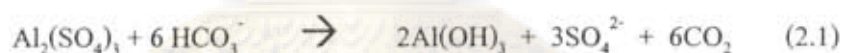
2.1.7.1 การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีเคมี

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีเคมีประกอบด้วยปฏิกิริยาดกผลึก(Precipitation) ปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันและการดูดซับผิว (Adsorption) สารเคมีที่สามารถใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสได้แก่ สารส้ม (Aluminum Sulfate หรือ Alum) หรือ Sodium Aluminate เกลือของเหล็ก เช่น FeCl_3 และ ปูนขาว (Lime)

การเติมสารเคมีดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดกผลึกของฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ เช่น AlPO_4 , FePO_4 หรือ $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ ผลึกฟอสเฟตเหล่านี้เป็นคอลลอยด์ขนาดเล็ก ซึ่งสามารถจับตัวกันเป็นฟล็อกด้วยปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันแบบ Sweep Coagulation คอลลอยด์ฟอสเฟตจะเกาะจับกับสารประกอบฟอสเฟต (ที่เกิดจากปฏิกิริยาดกผลึก) ทำให้ได้ฟล็อกขนาดใหญ่ สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับผิวของฟล็อกที่เกิดขึ้น (มันสิน, 2542)

1) การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยสารส้ม

เมื่อเติมสารส้มลงไปใต้น้ำ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารส้มและสภาพ่างหรือ HCO_3^- ในน้ำ ทำให้เกิดผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังสมการที่ 2.1



ถ้าในน้ำมีฟอสเฟตจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาข้างต้นเป็นการกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้ในการกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำเสีย หรือเป็นคอลลอยด์ AlPO_4 ที่เกิดในภายหลัง ปริมาณสารส้มจะต้องมีมากพอเพียงสำหรับปฏิกิริยาทั้งสองข้างต้น ตามทฤษฎีจะต้องเติมไอออน Al^{3+} ประมาณ 87-100% ของปริมาณฟอสเฟตที่ต้องการกำจัด ถ้าสารส้มมี Al^{3+} 9% จะต้องใช้สารส้มประมาณ 9.5-11 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดฟอสเฟต 1 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารส้มจะทำปฏิกิริยากับ HCO_3^- ที่มีอยู่ตามปกติในน้ำเสีย ปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ในการกำจัดฟอสเฟตจึงสูงกว่าค่าที่ต้องการตามทฤษฎีเสมอ ในทางปฏิบัติควรเติม Al^{3+} ประมาณ 200-

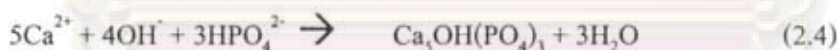
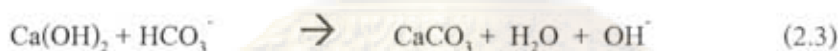
300% ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ต้องการกำจัด ปริมาณที่แท้จริงของสารส้ม (หรือสารเคมีอื่นๆ) จะขึ้นอยู่กับระดับฟอสเฟตที่ต้องการ ให้เหลือและขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย

2) การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยเหล็ก

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยเหล็ก (เช่น FeCl_3) คล้ายคลึงกับของสารส้ม ฟอสเฟตจะตกผลึกในรูปของ FePO_4 ตามทฤษฎีปรากฏว่าต้องใช้ Fe 1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการกำจัด P ทุกๆ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในทางปฏิบัติจะต้องเติมเหล็กให้มากกว่าค่าตามทฤษฎีไม่น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน จะต้องใช้เหล็กประมาณ 15-30 มิลลิกรัมต่อลิตร (เท่ากับ FeCl_3 45-90 มิลลิกรัมต่อลิตร) เพื่อกำจัดฟอสฟอรัสให้ได้ 80-90% ควรเติมโพลิเมอร์เพื่อให้ฟล็อกของเหล็กฟอสเฟตตกตะกอนได้ง่ายมากขึ้น

3) การใช้ปูนขาวในการกำจัดฟอสฟอรัส

ปูนขาวทำปฏิกิริยากับสภาพด่าง HCO_3^- ในน้ำเสียและสร้างหินปูน (CaCO_3) ซึ่งสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ออร์โธฟอสเฟตถูกกำจัดออกมาในรูปของ Calcium Hydroxyapatite ($\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$)



การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยปูนขาวมิได้เกิดขึ้นโดยอาศัยปฏิกิริยาข้างต้นเท่านั้น โพลีฟอสเฟต อาจถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ของ Hydroxyapatite ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้เมื่อพีเอชต่ำกว่า 11.5 ฟอสฟอรัสยังสามารถดูดซับของหินปูนได้อีกด้วยเนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของ Hydroxyapatite ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสจึงสูงขึ้นตามค่าของพีเอชที่เพิ่มขึ้น อาจกล่าวได้ว่า ออร์โธฟอสเฟตตกผลึกได้ทั้งหมดเมื่อพีเอชสูงกว่า 11.5

สารเคมีที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัสอาจเติมให้กับระบบเอเอสได้ที่ตำแหน่งต่างๆ ก็ดังตกตะกอนขั้นต้น และถังเติมอากาศ นอกจากนี้ การกำจัดฟอสฟอรัส (และไนโตรเจน) อาจจะทำโดยบำบัดน้ำทิ้งสุดท้ายของระบบเอเอสด้วยระบบเคมี ระบบกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีเคมี สามารถ

ผลิตน้ำทิ้งที่มีฟอสฟอรัสเหลือประมาณ 1-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี และตำแหน่งเติมสารเคมี หากต้องการกำจัดฟอสฟอรัสให้ได้มากกว่านี้ จะต้องใช้ถังกรองด้วย

ในกรณีที่มีการเติมสารส้มหรือเหล็กให้กับระบบเอเอส จะต้องระวังมิให้เกิดตะกอนแขวนลอยจากปฏิกิริยาเคมีมากเกินไป และต้องไม่เกิดฟล็อกเคมีมากกว่าฟล็อกชีวภาพ (แบคทีเรีย)

ปัจจัยต่างๆ ที่อาจนำมาพิจารณาในการคัดเลือกชนิดของสารเคมีมีดังนี้

1. ขนาดของระบบ
2. ปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างในน้ำที่ผ่านการบำบัด
3. ลักษณะของน้ำเสีย
4. ราคาของสารเคมี
5. วิธีจัดการสลัดจ์ที่เกิดขึ้น
6. ความสะดวกในการควบคุมและเดินระบบ
7. ความเชื่อถือได้ของระบบ
8. ผลกระทบที่เกิดจากการใช้สารเคมี เช่น ผลกระทบของซัลเฟตจากการเติมสารส้มหรือคลอไรด์จากการเติม $FeCl_3$ เป็นต้น ที่มีต่อแหล่งรับน้ำทิ้ง

ปริมาณและชนิดของสารเคมี อาจตรวจสอบได้โดยการทำ Jar Test กับน้ำเสียจริงในห้องปฏิบัติการ สามารถคำนวณปริมาณสารเคมีได้อย่างคร่าวๆ จากทฤษฎีหรือสูตรที่มีแนะนำในตำรา แต่ปริมาณสารเคมีที่แท้จริงจะหาได้จากการทดสอบ Jar Test ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น การทดสอบควรกระทำให้ครอบคลุมถึงความแปรปรวนของน้ำเสียด้วย และควรให้ได้ข้อมูลปริมาณสารเคมีที่ใช้ผลิตน้ำทิ้งที่มีปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างระดับต่างๆ

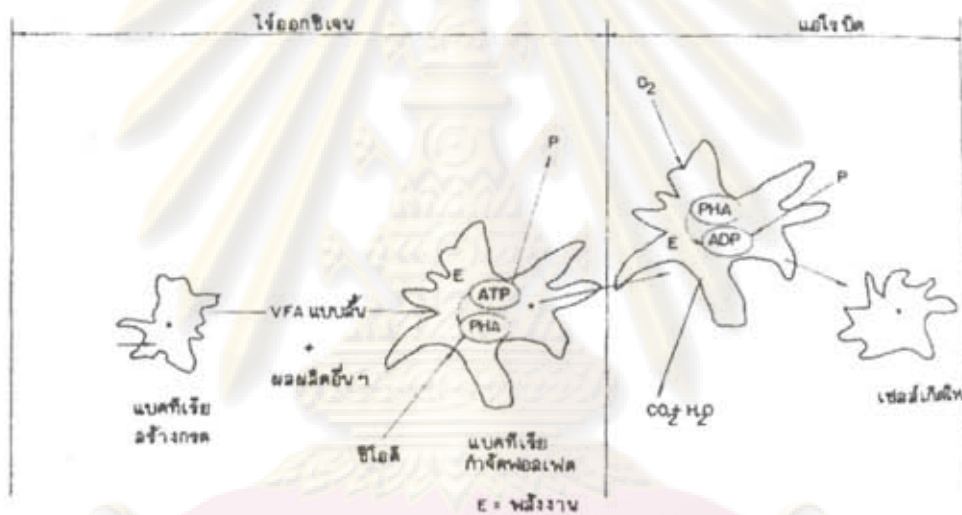
2.1.7.2 การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

การเลี้ยงเพาะเชื้อแบบไม่ใช้ออกซิเจนตามด้วยถังแบบใช้ออกซิเจนหรือแอโรบิก ทำให้เกิดการกักพันธุแบคทีเรียชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถจับฟอสฟอรัสได้มากกว่าปริมาณที่เซลล์ต้องการใช้ในการเจริญเติบโต ลักษณะนี้เรียกว่า Luxury Phosphorus Uptake โดยปกติเซลล์แบคทีเรียจะต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 1.5-2% ของน้ำหนักตัวแห้ง แต่กรณีของ Luxury Uptake แบคทีเรียสามารถจับฟอสฟอรัสได้ 4-12% ของน้ำหนักตัวแห้ง ดังนั้น การทิ้งสลัดจ์ จึงเท่ากับสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าระบบธรรมดา 2.5-4 เท่า แบคทีเรียชนิดพิเศษนี้ได้แก่ Acinetobacteria คำอธิบายถึงกลไก

การเกิด Luxury Phosphorus Uptake แสดงอยู่ในดังเลี้ยงเชื้อแบบไร้ออกซิเจนจะมีปฏิกิริยาแบบ Fermentation ซึ่งผลิตกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยๆ เช่น กรดน้ำส้มหรือ Acetic Acid (HAc) แบคทีเรียชนิดพิเศษจะสามารถดูดซึม VFA ดังกล่าวเข้าไปภายในเซลล์และสะสมเป็นอาหารสำรองในรูป PHA หรือ Polyhydroxyalkanoates แบคทีเรียต้องออกแรงในการสะสม PHA โดยใช้พลังงานจากการสลายตัวของ ATP ดังสมการที่ 2.5



ดังนั้นจึงมีการกำจัด BOD (คือ VFA จากน้ำเข้าไปเก็บไว้ในตัวเซลล์) พร้อมๆ กับการคาย P ในดังเลี้ยงเชื้อแบบไร้ออกซิเจน



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิด Luxury phosphorus uptake
ที่มา: มั่นสิน (2542)

ภายในดังเลี้ยงเชื้อแบบแอโรบิกซึ่งอยู่ตามหลังสภาวะที่มีออกซิเจนทำให้แบคทีเรีย กระดึบกระเจงและทำการย่อยสลาย PHA เพื่อให้ได้เซลล์ใหม่ ออกซิเจนจะถูกดึงเข้าไปในเซลล์เพื่อออกซิไดซ์ PHA เป็นผลทำให้ได้ CO₂, H₂O และเซลล์ใหม่ พร้อมๆ กันก็จะได้พลังงานด้วย พลังงานจะถูกเก็บไว้ในรูป ATP โดยการดึง P จากภายนอกเซลล์มารวมกับ ADP ดังสมการที่ 2.6

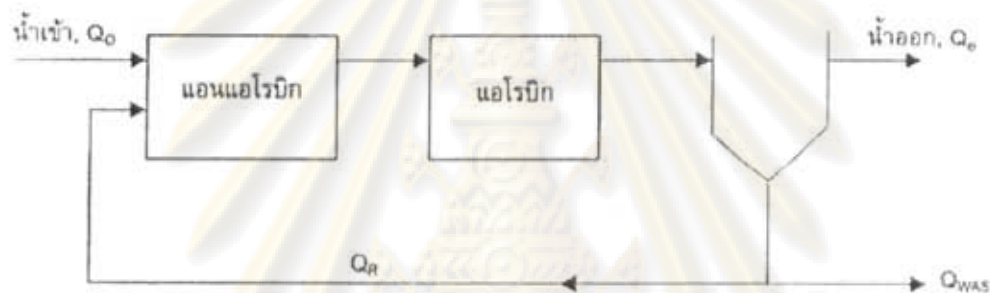


ดังนั้นภายในดังแอโรบิก แบคทีเรียจะดึงฟอสเฟตเข้าไปใช้สร้างพลังงานอย่างรวดเร็วและในปริมาณที่มากกว่าความต้องการเพื่อใช้สร้างเซลล์ใหม่ รูปที่ 2.3 อธิบายให้เห็นถึงการปล่อยฟอสฟอรัสในดังไร้ออกซิเจนและการจับฟอสฟอรัสในดังแอโรบิก

กระบวนการที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่สำคัญๆ ในปัจจุบันมีดังนี้

ก) กระบวนการโฟรีด็อกซ์

กระบวนการโฟรีด็อกซ์มีแผนภาพการไหลดังรูปที่ 2.4 คือมีถังแอนแอโรบิกตามด้วยถังแอโรบิกหรือออกซิก จึงมีชื่อเรียกกันเฉพาะในสหรัฐอเมริกาอีกอย่างว่าระบบเอโอไปยังถังแอนแอโรบิกด้วย ปกติแล้วขั้นตอนทั้งสองคือแอนแอโรบิกและแอโรบิกนั้นถูกแบ่งออกเป็นถังย่อยๆ ขนาดเท่าๆ กันหลาย ๆ ใบ และแต่ละใบทำงานเป็นแบบกวนผสมบูรณ (CSTR) ที่ต่อกันแบบอนุกรม น้ำทิ้งที่ออกจากระบบฯ จะมีคุณภาพในแง่ของฟอสฟอรัสดีมาก

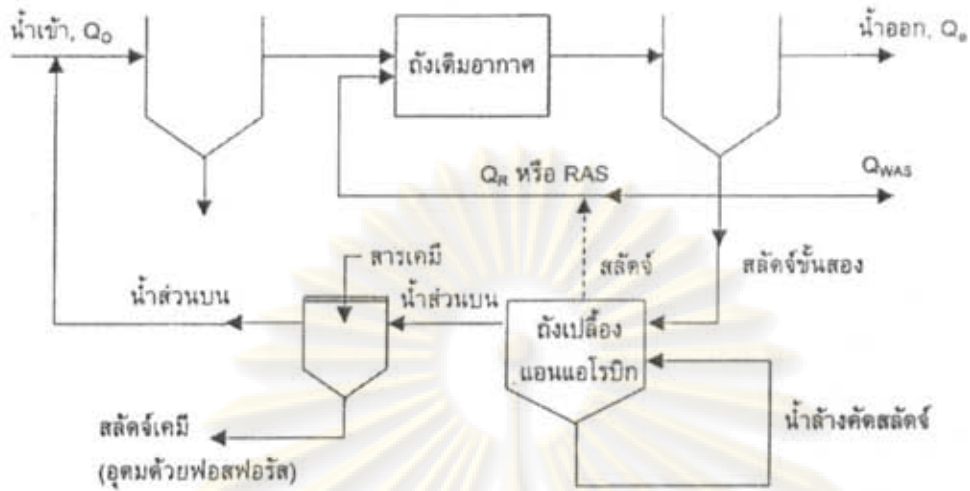


รูปที่ 2.4 กระบวนการ โฟรีด็อกซ์ (ใช้กำจัดฟอสฟอรัสที่สายหลัก)
ที่มา : ธงชัย (2545)

ข) กระบวนการฟอสทริป™

ในอันที่จริงแล้วระบบฟอสทริปไม่ใช่อการใช้กำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่แท้จริงนัก เพราะมีการใช้ปูนขาวมาช่วยก่อตะกอนผลึกของฟอสฟอรัสและจมตัวออกไปในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต แต่กระบวนการนี้ก็ยังมีอาศัยหลักการที่จุลินทรีย์ปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในภาวะแอนแอโรบิกและจับใช้ได้อย่างมากเป็นพิเศษในภาวะแอโรบิก ดังรูปที่ 2.5

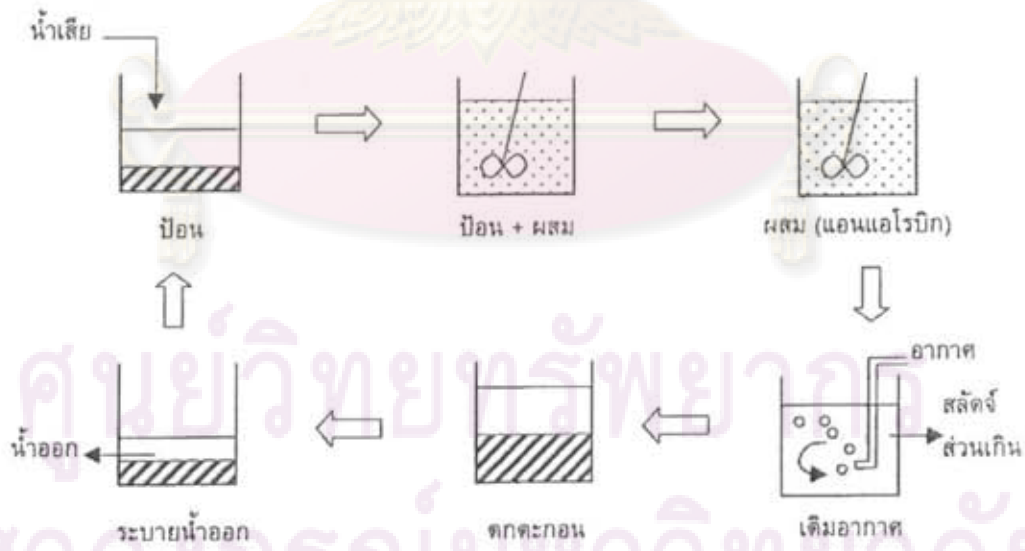
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กระบวนการฟอสทริป™1 (ใช้กำจัดฟอสฟอรัสที่สายรอง)
ที่มา : ธงชัย (2545)

ค) กระบวนการเอสบิโอาร์

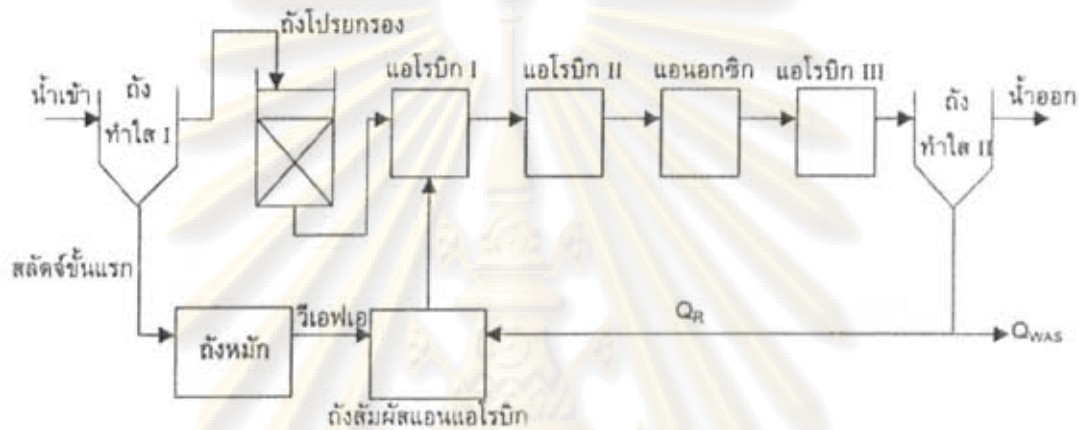
ระบบเอสบิโอาร์นี้สามารถนำมาใช้งานให้กำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้โดยต้องกำหนดให้อายุสลัดจ์ของระบบมีค่าต่ำ ๆ และจัดให้มีชั้นคอนแอนแอโรบิกก่อนแอโรบิกในแต่ละวัฏจักร ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เอสบิโอาร์เพื่อกำจัดฟอสฟอรัส
ที่มา : ธงชัย (2545)

ง) ระบบโอวาสะ™ (OWASA Nutrification™)

ระบบอิมปีฟิเออร์ที่พัฒนาขึ้นไปอีกและได้มีการจดทะเบียนสิทธิบัตรไว้แล้ว อีกรูปแบบหนึ่งคือ ระบบโอวาสะนิวตริฟิเคชัน™ (หมายเหตุ: นิวตริฟิเคชัน ก็คือ การทำให้เกิดนิวเทรียนต์หรือสารอาหารในกรณีนี้) ดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นแผนภาพการไหลของกระบวนการโอวาสะ



รูปที่ 2.7 แผนภาพการไหลของระบบโอวาสะ™

ที่มา : ธงชัย (2545)

2.2 บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

ระบบบึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติที่กำลังได้รับการพัฒนาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากการก่อสร้างและออกแบบไม่ซับซ้อนอีกทั้งการดูแลระบบไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อย นอกจากนี้ระบบบึงประดิษฐ์ ยังเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับว่าเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี เพราะเป็นการใช้ธรรมชาติของ ดิน ต้นไม้ น้ำ และจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย

บึงประดิษฐ์เป็นการสร้างเลียนแบบธรรมชาติถูกสร้างขึ้น โดยมีกั้นขอบดินสูงประมาณ 1 เมตร โดยพื้นที่กั้นบึงปรับให้ได้ระดับเสมอกันเพื่อขังน้ำ ดินพื้นควรมีคุณสมบัติที่ให้พืชน้ำขังเกาะได้ดี เมื่อก่อสร้างงานดินเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำพืชน้ำมาปลูก ซึ่งจะมีทั้งพืชที่มีรากเกาะดิน เช่น ธูปฤาษี บัว กก อ้อ ฯลฯ พืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน ผักตบชวา และพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย เป็นต้น

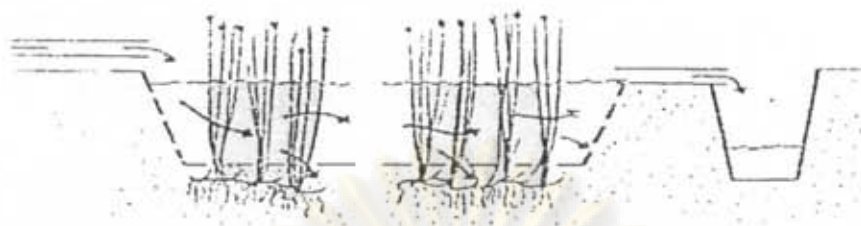
บึงประดิษฐ์ถูกนำมาใช้เป็นระบบในการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปพบว่าสามารถกำจัดมลสารต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระบบนี้มลสารถูกกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมไปถึงกระบวนการตกตะกอน การดูดซับกับอนุภาคของดิน การนำไปใช้โดยพืช และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ ข้อดีของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย คือค่าก่อสร้าง โดยเฉพาะค่าบำรุงรักษาต่ำ ใช้พลังงานน้อย ใช้เทคโนโลยีน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรผู้ชำนาญงานในการดำเนินการและการเดินระบบ ระบบมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกกระทบกระเทือนจากการเปลี่ยนแปลงของภาวะบรรยากาศต่างๆ สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของบึงได้ ระบบผูกพันกับสิ่งแวดล้อมอย่างมากหรือการทดลองใช้กับพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ระบบบึงประดิษฐ์ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System: FWS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินนี้ประกอบไปด้วย บ่อดินที่น้ำไหลซึมลงดินได้น้อย จะมียูหลายบ่อวางเรียงขนานกัน มีระดับความลึกประมาณ 10 – 60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในการปล่อยน้ำเสียเข้าระบบ ควรปล่อยให้ไหลลงอย่างช้าๆ ผ่านก้านลำต้นพืช และรากพืชต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักที่ทำการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้ การเติมอากาศในระบบมาจากพืช ลมพัด และการสังเคราะห์แสง ระบบนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ค่าภาระบีโอดีค่อนข้างปานกลาง ซึ่งไม่ควรเกิน 6 กรัมของบีโอดี/(ตารางเมตร-วัน) ควรมีเวลาเก็บกักประมาณ 4 – 15 วัน และมีค่าภาระขลศาสตร์เท่ากับ 0.01 – 0.05 ลูกบาศก์เมตร/(ตารางเมตร - วัน) (เกรียงศักดิ์, 2539)

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วย บึงที่มีความกว้าง 3 – 5 เมตร และยาวมากกว่า 100 เมตร การบำบัดน้ำเสียจะเป็นไปในลักษณะตามยาว ปลูกด้วยพืชที่มีรากเกาะดิน มีส่วนที่โผล่พ้นผิวน้ำ การบำบัดน้ำเสียเกิดจากส่วนของดินพืชที่จมอยู่ในน้ำและซากพืชที่ทับถมที่ผิวน้ำดิน ช่วยให้จุลินทรีย์มาจับและเจริญเติบโต แต่ส่วนสำคัญที่สุดควรคำนึงถึงก็คือ น้ำเสียอาจจะรั่วออกจากทางน้ำ เพราะพื้นดินด้านล่างไม่ได้ปูด้วยวัสดุกันซึม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน

ที่มา: Vymazal (1998)

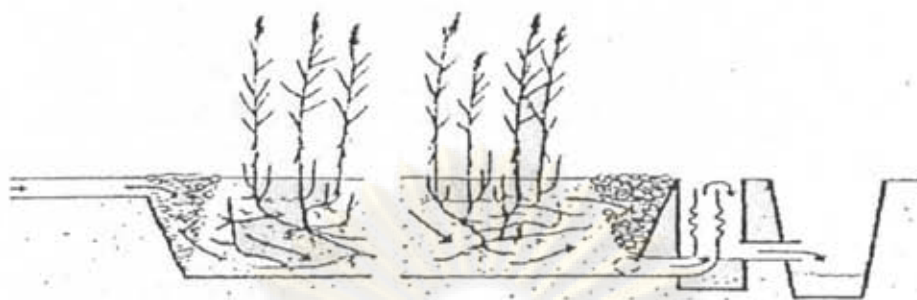
2.2.2 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface System, SFS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินนี้ จะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะ ชั้นตัวกลางที่ใช้ได้แก่ หินบด กรวด ทราย และดิน มีความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60–70 เซนติเมตร ด้านล่างลาดด้วยดินเหนียว วัสดุกันซึมอื่น ๆ หรือปูด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ส่วนก้นบึงให้มีความลาดชันประมาณ 1% เพื่อให้ น้ำไหลลงโดยไม่มี การกักขังเกิดขึ้น และในบริเวณท้ายน้ำจะมีท่อเพื่อทำหน้าที่รวบรวมและรับน้ำออกจากระบบ น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางในสภาพไร้ออกซิเจน และไหลผ่านรากของพืชน้ำที่ปลูก ระบบนี้อาศัยการเติมอากาศด้วยรากพืชเป็นหลัก ซึ่งออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ตามรากพืช ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2539)

ซึ่งบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

2.2.2.1 การไหลตามแนวนอน

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วยแปลงที่ปลูกด้วยต้นพืช ใหล่พื้นน้ำ และปูด้านล่างด้วย วัสดุกันซึม เพื่อป้องกันการรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ตัวกลางที่ใช้ในระบบอาจเป็นดิน กรวด หรือทราย มีการไหลในแนวนอนจากจุดน้ำเข้า ผ่านชั้นตัวกลางและไหลออกที่จุดน้ำออก ดัง แสดงในรูปที่ 2.9 ในช่วงที่น้ำเสียไหลผ่านชั้นรากพืช จะเกิดการบำบัดมลสารให้ลดน้อยลงได้

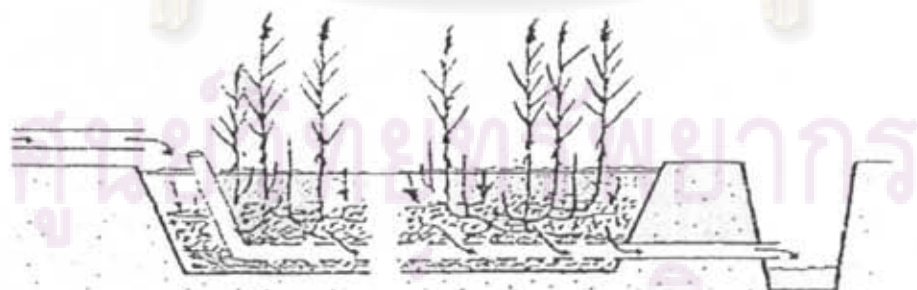


รูปที่ 2.9 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลในแนวนอน
ที่มา: Vymazal (1998)

2.2.2.2 การไหลตามแนวตั้ง

การออกแบบประกอบไปด้วย แปลงบึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยต้นพืชไหล่พื้นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การไหลซึมลงชั้นตัวกลางและการให้น้ำแบบครั้งคราว จะช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดินได้มากกว่าการไหลตามแนวนอนหลายเท่า ในช่วงการให้น้ำเข้าระบบ อากาศจะเติมเข้ามายังช่องว่างในดิน จึงเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดิน ยิ่งไปกว่านั้นการแพร่ของออกซิเจนผ่านดินเพิ่มให้ดีขึ้นได้ในช่วงหยุดการให้น้ำ

การออกแบบและการเดินระบบ เป็นการจัดให้เกิดสภาพมีอากาศ และไม่มีอากาศเกิดขึ้นสลับกันเพื่อกระตุ้นให้เกิด ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) และการดูดซับฟอสฟอรัสตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวตั้ง
ที่มา: Vymazal (1998)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาระบบบึงประดิษฐ์ให้มีความก้าวหน้า และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จึงเกิดระบบใหม่ที่เรียกว่า “บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน” ซึ่งมีขีดความสามารถสูงกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้แบบน้ำไหลได้ผิวดินในแนวนอน หรือแนวคั้งเพียงอย่างเดียว

2.2.3 บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บึงประดิษฐ์แบบผสมผสานนี้ เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่รวมเอาบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินในแนวนอนและแนวคั้งเข้าด้วยกัน

จากการศึกษามากกว่า 13 ปี ในยุโรปแสดงให้เห็นว่า ระบบการไหลในแนวนอนสามารถกำจัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในอัตราที่เพียงพอต่อการเกิดไนตริฟิเคชันได้โดยสมบูรณ์ ส่วนระบบการไหลในแนวคั้งได้ถูกพัฒนามากกว่า 11 ปี เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นกับการไหลในแนวนอน ในการออกแบบสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี และยังสามารถกำจัดบีโอดีได้อีกด้วย แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำ ในระบบผสมผสานนี้ ช่วยให้จุดแข็งและจุดอ่อนของการไหลในแนวคั้งและแนวนอนผสมผสานกันจนเกิดความสมดุล ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดบีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ถ้าสามารถเกิดไนตริฟิเคชันได้สมบูรณ์ก็มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบเพื่อกำจัดไนเตรทโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสามารถทำได้โดยระบบการไหลในแนวนอนเพราะปริมาณออกซิเจนถูกกำจัด ในระบบนี้จะมีพื้นที่ที่มีสภาพแอนน็อกซิกภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งสามารถเอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

2.2.4 พืชที่ใช้ในบึงประดิษฐ์

พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่เป็นพืชที่โผล่พ้นน้ำ เช่น ฐปถายี (Cattail: *Typha*), กก (Bulrush: *Scirpus*), อ้อ (Reed: *Phragmites*) และหญ้าทรงกระเทียม (Sedge: *Carex*) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของพืชโคล่พื้นน้ำชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย

ชื่อสามัญ (ชื่อวิทยาศาสตร์)	แหล่งที่ พบ	อุณหภูมิ °C		ระดับความเค็ม สูงที่พืชทนได้ (ppt)*	พีเอชที่ เหมาะสม
		ที่ต้องการ (Desirable)	ที่ดำรงอยู่ได้ (Survival)		
ชูปญา (<i>Typha spp.</i>)	ทั่วโลก	10-30	12-24	30	4-10
อีอ (<i>Phragmites communis spp.</i>)	ทั่วโลก	12-33	10-30	45	2-8
กกกลม (<i>Juncus spp.</i>)	ทั่วโลก	16-26	-	20	5-7.5
กกสามเหลี่ยม (<i>Scirpus spp.</i>)	ทั่วโลก	16-27	-	20	4-9
หญ้าแห้วหมู (<i>Carex spp.</i>)	ทั่วโลก	14-32	-	-	5

หมายเหตุ : * ppt (part per thousand)

ที่มา : Reed และคณะ (1988)

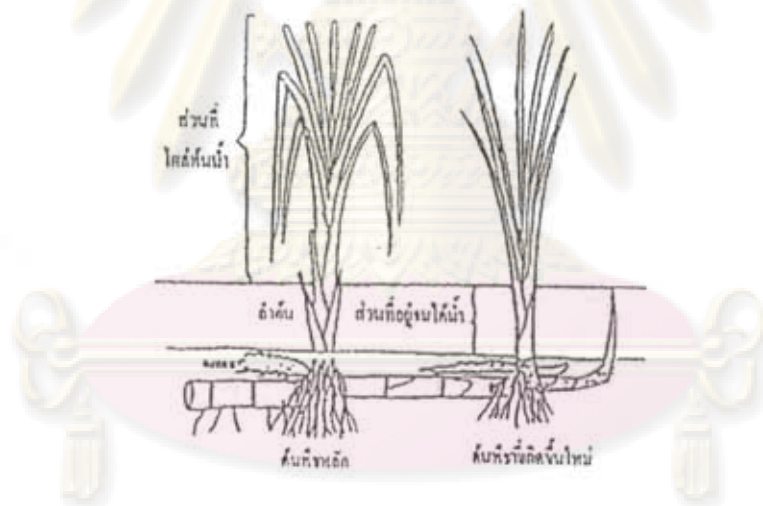
รากของพืชโคล่พื้นน้ำนั้นเป็นส่วนที่สำคัญต่อระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งจะเจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 50 เซนติเมตร หรือมากกว่า โดยทั่วไปจะสร้างลำต้นและใบให้สัมผัสกับอากาศ และแผ่ขยายรากและระบบรากพืชภายใต้ชั้นดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 พืช โผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant)

ที่มา : Thayalakumaran (1994)



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของพืชที่โผล่พ้นน้ำ

ที่มา : Thayalakumaran (1994)

ในระบบบึงประดิษฐ์พืชที่โผล่พ้นน้ำมีหน้าที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.11 ออกซิเจนถูกถ่ายเทผ่านช่องว่างของใบ และลำต้นไปยังรากและระบบรากพืช โดยการแพร่ และโดยการไหลพาของอากาศ ออกซิเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยจากระบบรากออกสู่ชั้นรากพืช โดยรอบ ก่อให้เกิดสภาพมีออกซิเจน และช่วยเสริมในการย่อยสลายอินทรีย์สาร รวมถึงการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของพืชเหล่านี้อยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 45 กรัมของออกซิเจน/(ตารางเมตร-วัน) ของพื้นที่ผิวของบึง

ประคิมรัฐ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืช และระดับความดันของออกซิเจนในดิน การแพร่และการเคลื่อนผ่านของออกซิเจนจากลำต้น และปล่อยออกจากชั้นรากพืชจะไปเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และเพิ่มอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน และเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนคอลลอยด์ฟอสเฟอรัส (Cooper และ Boon, 1987)

ตารางที่ 2.11 หน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประคิมรัฐ

ส่วนประกอบของพืช	หน้าที่ในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ลดความเข้มของแสงเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน ▪ ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว ▪ ลดผลกระทบจากลมต่อผิวน้ำ ▪ ทำให้ระบบมองดูสวยงาม ▪ สะสมสารอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ลดความเร็วกระแสน้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ ▪ เป็นพืชที่ผิวสำหรับการจับตัวของไบโอฟิล์ม ▪ กรองตะกอนขนาดใหญ่ ▪ ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน ▪ ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำอยู่ตัว ถูกกัดเซาะน้อย ▪ ป้องกันตัวกลางอุดตันในระบบการไหลในแนวตั้ง ▪ ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการย่อยสลาย และการเกิดไนตริฟิเคชัน ▪ ดูดซับสารอาหาร ▪ ปลดปล่อยแอนติไบโอติก (Antibiotics)

ที่มา : Brix (1997)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) การนำสารอาหารไปใช้โดยพืช

อัตราการกำจัดสารอาหารของพืชน้ำนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารอาหารในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำเสีย เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่กำจัดได้ยาก ฯลฯ ดังแสดงในตารางที่ 2.12 อัตราการนำสารอาหารไปใช้โดยพืชถูกกำจัดโดยขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของพืช พืชที่ปลูก ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อของพืชและลักษณะของตะกอนและน้ำเสีย การนำสารอาหารไปใช้โดยพืชใล่พื้นน้ำมีปริมาณสูงในพืชที่เพิ่งเริ่มทำการบำบัด หรือมีอายุน้อย (มากกว่า 2.5 กรัมต่อกิโลกรัมของเนื้อเยื่อ) แต่จะน้อยลงเมื่อพืชน้ำใช้งานมานานหรือโตเต็มที่ (Reddy และ Debusk, 1987)

ตารางที่ 2.12 ความเข้มข้นและอัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้โดยทั่วไปในพืชใล่พื้นน้ำ

พืชที่ใล่พื้นน้ำ	อัตราการดูดซึมในพืช		สารอาหารในเนื้อเยื่อไม้		มวล/พื้นที่ กก./เฮก แตร์	ผลผลิต ของพืช กก./เฮก แตร์
	ไนโตรเจน กก./เฮก แตร์.ปี)	ฟอสฟอรัส กก./เฮกแตร์. ปี)	ไนโตรเจน ก./กก.	ฟอสฟอรัส ก./กก.		
ธูปฤาษี	600-630	75-403	5-24	0.54	4.3-22.5	8-61
กกสามเหลี่ยม	125	18	8-27	1-3	-	-
อ้อ	225	35	18-21	2-3	6-35	10-60

ที่มา : Reddy และ Debusk (1987)

2) การสูญเสียน้ำจากการคายระเหย

การคายระเหยเป็นการรวมกันของการระเหยจากพื้นผิวน้ำ และน้ำที่สูญเสียจากพืชใล่พื้นน้ำเอง (Kadlec, 1987) การคายระเหยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ควบคุม เช่น แสงแดด ลม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ (Hammer และ Kadlec, 1983) น้ำที่สูญเสียจากการระเหยในฤดูร้อน จะทำให้ปริมาณน้ำในน้ำเสียที่อยู่ในบึงประดิษฐ์ลดลง และทำให้ความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนที่ยังคงอยู่ในน้ำนั้นมีค่าสูงขึ้น ทำให้เวลากักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะเกิดสภาวะขาดออกซิเจนขึ้นได้ (Reed และคณะ, 1988) ในการแก้ปัญหาการสูญเสียน้ำจากการคายระเหยแต่ยังคงให้ได้อัตราการไหลตาม

ค่าที่ออกแบบไว้ควรจะนำน้ำที่ออกจากระบบบางส่วนกลับเข้ามาใหม่ในจุดแล้งที่มีการสูญเสีย
เป็นปริมาณมาก (Tchobanoglous และคณะ, 2004)

3) การถ่ายเทออกซิเจน

พืชที่ไหล่น้ำ เช่น กก ชูปดามี กกสามเหลี่ยม และต้นอ้อ สามารถดูดซึม ออกซิเจน
จากบรรยากาศผ่านและลำต้นที่อยู่เหนือน้ำไหลลงสู่รากได้ ออกซิเจนจะถูกปลดปล่อยออกจากราก
และสร้างชั้นที่มีออกซิเจน ดังนั้นในโซนของดินจะมีสถานะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนอยู่
พืชไหล่น้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในช่วง 5 ถึง 45 กรัมของออกซิเจน/(ตารางเมตร-วัน) ของ
พื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับออกซิเจนที่มีอยู่ในดิน
(Cooper และ Boon, 1987)

2.2.5 ดิน

สารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่จะได้รับมาจากดินยกเว้น
คาร์บอน ดินในธรรมชาติที่ชูปดามีอยู่จะมีลักษณะเป็น โคลนแต่ส่วนใหญ่แล้วพืชจะเจริญเติบโตใน
ตัวกลาง (Media) ที่แตกต่างกัน ช่องว่างในดินหรือตัวกลางชนิดอื่นจะใช้เป็นช่องทางน้ำไหลแก่
ระบบน้ำได้ดินที่มีการไหลลงสู่เบื้องล่างซึ่งจะมีการบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ที่รากพืชและดิน
ที่อยู่บริเวณโดยรอบ

ดินอาจจะถูกใช้ให้เป็นพื้นที่ของตัวกลางเมื่อต้องการที่จะกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากการ
กำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นดินแต่อย่างไรก็ตามดินที่มีศักยภาพในการกำจัด
ฟอสฟอรัสได้สูงจะต้องเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดและน้ำสามารถซึมผ่านได้ต่ำถึงปานกลางซึ่งอาจจะ
เป็นตัวจำกัดความจุทางศาสตร์ของดินพื้นส่วนล่างในระบบบึงประดิษฐ์ได้

2.2.6 จุลินทรีย์

ในระบบบึงประดิษฐ์จะพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์เช่นแบคทีเรียโปรโตซัว
ฟังไจ จนถึงสัตว์พวกที่มีกระดูกสันหลัง ในกรณีของพืชไหล่น้ำในระบบน้ำไหลได้ผิวดิน
จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ในส่วนของพืชที่จมอยู่ในน้ำ (รากและต้นที่จมอยู่ใต้น้ำ) ในชั้นตะกอนที่
อยู่ด้านล่างและบนผิวดินตัวกลาง (Thayalakumaran, 1994) สิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่มีกระดูกสันหลังและไม่

มีกระดูกสันหลังมีส่วนสำคัญในการถ่ายเทพลังงาน สารอาหาร และยังช่วยจัดระเบียบห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน์ของบึงประดิษฐ์อีกด้วย (Roger และคณะ, 1985)

2.2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดิน

โดยทั่วไปแล้วบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำได้ผิวดินในแนวนอนจะประกอบไปด้วยร่องยาว หรือบ่อที่ปูพื้นข้างล่างด้วยวัสดุที่น้ำไม่สามารถผ่านได้ เพื่อป้องกันการรั่วซึม และภายในบรรจุตัวกลางซึ่งให้พืชไหล่พื้นน้ำยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ ตัวกลางที่ใช้จะมีหินหรือหินบดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 – 15 เซนติเมตร กรวดและดินประเภทต่างๆ ซึ่งภายในบ่ออาจจะบรรจุตัวกลางชนิดเดียวหรือบรรจุตัวกลางหลายชนิดรวมกัน

น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและถูกบำบัดในระหว่างที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางและชั้นรากของพืช ในพื้นผิวดักกลางจะมีสภาวะที่อึดตัวตลอดเวลาซึ่งจะเกิดสภาพขาดออกซิเจนตั้งแต่อย่างไรก็ตามพืชสามารถนำเอาออกซิเจนเข้าสู่ระบบรากได้ ดังนั้นจะมีสภาวะใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณใกล้ๆ รากพืชด้วย

1) การพิจารณาทางชลศาสตร์

ในสภาพที่ตื้นและเต็มไปด้วยสภาวะที่อึดตัวของน้ำในร่องซึ่งไม่มีการรั่วซึมข้างล่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงไฮโดรลิกค่อหนึ่งหน่วยความยาว จะถูกสมมุติให้เป็นความลาดชันของพื้นบ่อ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้ตามสมการที่ (2.7) (Reed และคณะ, 1988)

$$Q = K_s \cdot A \cdot S \quad (2.7)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล

K_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity)

ของพื้นที่ 1 หน่วยของตัวกลาง

A = พื้นที่หน้าตัด

S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรลิกค่อหนึ่งหน่วยความยาว

= $\Delta h / \Delta L$

และสามารถหาพื้นที่หน้าตัดที่สภาวะอิ่มตัวของน้ำจากสมการ (2.8) ได้เป็น

$$ac = \frac{Q}{K_s * S} \quad (2.8)$$

$$S = \frac{8.6}{K_s} \quad (2.9)$$

เมื่อ ac = พื้นที่หน้าตัดของบ่อตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ (ม.²)

และมีค่าเท่ากับ $d_1 \times w_1$

d_1 = ความลึกของน้ำในบ่อ (ม.)

w_1 = ความกว้างของบ่อ (ม.)

K_s = สภาพทางชลศาสตร์ของตัวกลาง (อาจดูได้จากตารางที่ 2.13)

และเมื่อต้องการคำนวณหาเวลาเก็บกักและพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์แบบ SFS สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10) และ (2.11)

$$t = \frac{L * W * Y * n}{Q} \quad (2.10)$$

$$A_s = L * W \quad (2.11)$$

เมื่อ t = เวลาเก็บกัก, วัน

L = ความยาวของบ่อ, ม.

W = ความกว้างของบ่อ, ม.

A_s = พื้นที่ผิวของบ่อ, ม.²

Q = อัตราไหลเฉลี่ยของระบบ $((Q_{in} + Q_{out}) / 2)$, ม.³/วัน

Y = ความลึกของน้ำในบ่อ, ม.

n = ค่าความพรุนของตัวกลางในบ่อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 – 0.45

ขึ้นอยู่กับขนาดของกรวด อาจดูได้จากตารางที่ 2.13

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.13 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้คิวคิน

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์	ความพรุน	สภาพนำทางชลศาสตร์(K_S) ม. ³ /(ม. ² -วัน)	K_{20}
ทรายละเอียดปานกลาง	1	0.42	420	1.84
ทรายหยาบ	2	0.39	480	1.35
กรวดทราย	3	0.35	500	0.86

ที่มา : Tchobanoglous และคณะ (2004)

เมื่อคำนวณหาเวลาเก็บกัก โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการกำจัดบีโอดี จะใช้สมการ (2.12)

$$\frac{BOD_{out}}{BOD_{in}} = e^{-K_T t} \quad (2.12)$$

$$K_T = K_{20}(1.1)^{T-20} \quad (2.13)$$

เมื่อ K_T = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาลำดับหนึ่งที่ตั้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ต่อวัน

T = อุณหภูมิในระบบ, °ซ

เมื่อพิจารณาถึงสภาพนำทางชลศาสตร์ จะใช้สมการ (2.14) คำนวณหา t

$$t = \frac{L}{K_S S} \quad (2.14)$$

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้ฝายน้ำสั้นในการควบคุมการไหลให้ส่วนกันบ่อมีความลาดของบ่อประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ น้ำไหลลง โดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น ส่วนกันบ่อบริเวณปลายท้ายน้ำของบ่อจะมีท่อค้ำเจาะรูรอบท่อเพื่อรับน้ำทิ้งออกจากระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการหลีกเลี่ยงที่จะรบกวนโครงสร้างของตัวกลาง และชั้นรากของพืชและเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการบำบัด ค่าความเร็วของการไหลของน้ำผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 เมตร/วัน ใน

การออกแบบความลึกของบ่อ ควรจะเลือกให้สอดคล้องกับชนิดของพืชในระบบซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ค่าเสนอแนะในการออกแบบความลึกสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ชีวิติน

ชนิดของพืช	ความลึกของบ่อ, ซม.
กกสามเหลี่ยม	76
อ้อ	60
ชูปฤณี	30

ที่มา : Reed และคณะ (1988)

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ มีขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

- 1) พิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ที่จะเลือกใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย
 - 2) ศึกษาว่าควรมีระบบบำบัดน้ำเสียขั้นแรกและหรือขั้นที่สองก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์
 - 3) ทำการเลือกชนิดของพืชที่จะปลูกในบึงประดิษฐ์
 - 4) ศึกษาหาค่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
 - 5) ทำการศึกษาระบบควบคุมแมลงต่างๆ ในบึงประดิษฐ์
 - 6) ออกแบบรายละเอียดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
 - 7) พิจารณาถึงการติดตั้งสถานีตรวจสอบประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบประดิษฐ์
- 2) ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ไม่ได้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าวิกฤตในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์ แต่เป็นตัวตรวจสอบให้แน่ใจว่าได้ชีวิตินมีออกซิเจนพอเพียง โดยทั่วไปแล้วพืชใล่ล้นน้ำสามารถส่งผ่านออกซิเจนได้ในช่วง 5 – 45 กรัมของออกซิเจน/(เมตร-วัน) ของพื้นที่บึงประดิษฐ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของออกซิเจนในบริเวณราก แต่สามารถสมมุติได้ว่าออกซิเจนที่ต้องการมีค่าเป็น 1- 15 เท่าของภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ เป็นค่าสมมุติที่เหมาะสมสำหรับ SFS ซึ่งจะป้องกันอัตราการเกิดออกซิเจนสำหรับพืช ไม่ให้มากกว่า 20 ก. ของ O₂/(ตารางเมตร - วัน) สำหรับค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบ SFS ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

พารามิเตอร์ที่ให้ออกแบบ	หน่วย	ระบบ SFS
- เวลาเก็บกัก (HRT)	วัน	4-15
- ระดับน้ำ	ม.	0.3-0.8
- อัตราการระบรทุกอินทรีย์	กก./(เฮกแตร์-วัน)	<68
- อัตราการระชลศาสตร์	ม. ² /(ม. ³ - วัน)	0.014-0.047
- พื้นที่ผิวจำเพาะ	เฮกแตร์ / (10 ³ /ม. ³ - วัน)	2.14-7.16

ที่มา : Tchobanoglous และคณะ (2004)

3) โครงร่างของระบบ

โดยส่วนใหญ่โครงสร้างของระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน มีลักษณะและรายละเอียดต่างๆ เช่น ความลึกของน้ำและตัวกลาง ชนิดของตัวกลาง ความลาดชันของความลึก ระดับของการบำบัดในชั้นต้น และชนิดของพืช ในอดีตระบบน้ำไหลใต้ผิวดินส่วนใหญ่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง เป็น 10:1 หรือมากกว่า ในระบบน้ำไหลใต้ผิวดินจะมีความลึกของตัวกลางประมาณ 0.3 – 0.76 เมตร และใช้ทราย กรวด หิน ปั่นตัวกลาง พื้นที่ส่วนล่างมีความลาดชัน 0 – 1% ระดับน้ำควรจะต่ำกว่าพื้นผิวบนของตัวกลาง และสามารถควบคุมระดับน้ำได้ดีที่ทางออก (Reed และ Brown, 1992)

4) การบำบัดชั้นต้น

น้ำเสียที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน อย่างน้อยควรผ่านการบำบัดชั้นต้นมาก่อนแล้ว ซึ่งอาจจะผ่านบ่อเกรอะ ถังตกตะกอน การบำบัดชั้นต้นแบบธรรมดา หรือถึงปฏิบัติการไม่ใช้อากาศชั้นต้น ซึ่งจะมีประโยชน์ในการลดสารอินทรีย์ และจำนวนของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง

จากการศึกษาโดยส่วนใหญ่ได้ชี้ให้เห็นว่า บึงประดิษฐ์สามารถกำจัดบีโอดี สารแขวนลอย สารอาหาร โลหะหนัก และเชื้อโรค จากน้ำเสียหลากหลายชนิดได้ในปริมาณสูง กลไกการบำบัดประกอบไปด้วย การตกตะกอน การทำงานของจุลินทรีย์ การดูดซับ การย่อยสลายทางเคมีและการดูดซับของดิน (Roger และคณะ, 1985)

2.3.1 การกำจัดซีโอดี

สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักมากจะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในสภาพที่สงบนิ่ง โดยกระบวนการตกตะกอนและการกรอง สารประกอบอินทรีย์จะถูกย่อยสลายทั้งในสภาพที่มีอากาศและสภาพที่ไม่มีอากาศ โดย Heterotrophic bacteria

ออกซิเจนสำหรับการย่อยสลายในสภาพที่มีอากาศ มาจากกระบวนการแพร่ (Diffusion), กลไกการพาก๊าซ (Convection) และการรั่วไหลของออกซิเจนจากระบบรากพืช ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจนในชั้นตัวกลาง สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพเป็นหลัก ส่วนการใช้สารอาหารโดยพืชสามารถมองข้ามไปได้ (Korkusuz และคณะ, 2005)

2.3.2 การกำจัดสารของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากเวลาเก็บกัก (HRT) ที่ยาวนาน และมีสภาพที่สงบนิ่ง การตกตะกอนโดยส่วนใหญ่ของของแข็งเกิดขึ้นภายใน 2 – 3 ม. แรกจากทางน้ำเข้า (Reed และคณะ, 1988) ยิ่งไปกว่านั้นต้นพืชมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของน้ำเสียที่เข้ามาต่ำลง และช่วยกระจายน้ำเข้าไปทั่วทั้งระบบ ซึ่งช่วยเสริมการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น (Gray, 1989) พวกโคลลอยด์และของแข็งที่ไม่ตกตะกอนถูกกำจัดอย่างน้อยส่วนหนึ่งโดยการจับติดกับแบคทีเรีย การชนกัน การไหลไปรวมกัน และการดูดติดกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ลำต้นพืชด้านข้างและกันร่องดิน (Kessomboon, 1990) การกำจัดของแข็งแขวนลอย และการย่อยสลายมวลสาร เป็นผลให้เกิดชั้นของตะกอน (Sludge Layer) สะสมในร่อง (Hammer และ Kadlec, 1983) การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น, ลดความเร็วของน้ำ และเพิ่มการตกตะกอนและการกรองในระบบราก (Korkusuz และคณะ, 2005)

2.3.3 การกำจัดไนโตรเจน

ปกติไนโตรเจนในน้ำเสียจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์, แอมโมเนีย, ไนไตรท์, ไนเตรท และก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวัฏจักรไนโตรเจน ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน โดยเฉพาะแอมโมเนีย สามารถแสดงถึงความต้องการออกซิเจนของกระบวนการไนตริฟิเคชัน และยังเป็นสาเหตุให้เกิด Eutrophication ในแหล่งน้ำ เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Korkusuz และคณะ, 2005)

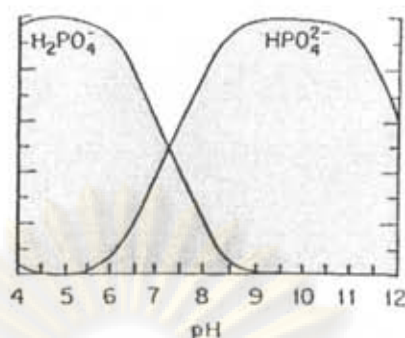
การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์เกิดขึ้นจากกลไกการนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช และการเก็บเกี่ยวภายหลัง การระเหยของแอมโมเนีย การดูดซับแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชัน และกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Roger และคณะ, 1985) กลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจนคือ กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (Korkusuz และคณะ, 2005) การบำบัดไนโตรเจนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ อัตราการระเหยของน้ำ (Hydraulic Loading Rate) กลไกสำคัญในการบำบัดไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียนั้นๆ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณคาร์บอน อุณหภูมิ ตลอดจนอัตราและระยะเวลาในการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด

2.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

ระบบบึงประดิษฐ์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ปกติในระบบนิเวศ มีความต้องการสารอาหารในสัดส่วนโมลาร์ของ C:N:P คือ 106:16:1 หรือ 41:7:1 (โดยมวล) การเพิ่มขึ้นของน้ำเสียจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของสารอาหาร ฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์มักอยู่ในรูปสารละลาย แร่ธาตุฟอสฟอรัสและอินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปของแข็ง ในสารละลายการแตกตัวของตระกูลอนินทรีย์จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (Kadlec และ Knight, 1996) แสดงดังนี้



รูปแบบเหล่านี้กระจายอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายของตระกูลอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่สำคัญในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C
ที่มา: Kadlec และ Knight (1996)

วงจรของฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์ค่อนข้างซับซ้อน และมีฟอสฟอรัสอยู่หลายรูป การใช้สารอาหารโดยพืชไม่ควรนำมาใช้วัดอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ เนื่องจากฟอสฟอรัสที่สะสมในพืชจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ การสะสมของฟอสฟอรัสระยะยาวเป็นผลมาจากการสะสมของซากพืชและสิ่งมีชีวิตเล็กๆ รวมทั้งการทับถมของฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารประกอบที่ย่อยสลายยาก (ศุวศา, 2544)

ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้เร็วเกินไป กลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสคือ การดูดซับ (Adsorption), การทำให้เป็นสารประกอบ (Complexation), การตกตะกอน (Sedimentation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Korkusuz และคณะ, 2005) การกำจัดฟอสฟอรัส เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวกลาง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว, การใช้โดยพืช และการรวมตัวของมวลจุลินทรีย์ ตามลำดับ (Zoubolis และ Prochaska, 2006)

การกำจัดฟอสฟอรัสในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง จะค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 20-30% ถ้าต้องการให้มีการกำจัดได้สูงขึ้น ให้ทำการตกตะกอนทางเคมีในถังตกตะกอนก่อน โดยการเติม Aluminium Polychloride เล็กน้อยในถังตกตะกอน (Brix และ Arias, 2005)

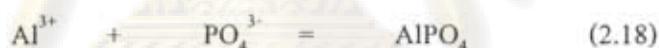
ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถทำให้สูงขึ้นโดยใช้ By-product จากอุตสาหกรรม และวัสดุทางธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone), กรวด (Gravel), แร่วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite), ของเสียจากการทำเหมืองแร่ และทราย ที่มีความเข้มข้นของแคลเซียม (calcium), อะลูมิเนียม (Aluminum), และเหล็ก (Iron) อยู่สูง ส่วนของพืชและจุลินทรีย์ ที่ตายลงจะทำให้ปริมาณของฟอสฟอรัสในระบบเพิ่มขึ้นได้ (Korkusuz และคณะ, 2005)

2.3.4.1 การดูดซับฟอสฟอรัสและการตกตะกอน

ความสามารถของดินหรือตะกอนที่จะกักเก็บฟอสฟอรัสไว้ ขึ้นอยู่กับการดูดซับและการตกตะกอนในรูปแบบต่างๆของเหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียม (Dunne และคณะ, 2005)

การดูดซับในที่นี้เกี่ยวข้องกับทั้งการดูดติดบนผิวของของแข็ง และการดูดติดผิวที่เปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะของแข็งของอะลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์ หรือแร่ธาตุอื่นๆ กระบวนการดูดซับจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และอัตราการเกิดกระบวนการดูดซับจะลดลงตามเวลา โดยทั่วไปในดินอะลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปที่ไม่ตกผลึก (Amorphous) จะเกิดในสภาพไร้อากาศ และรูปที่ตกผลึก (Crystalline) จะเกิดในสภาพมีอากาศ ในการดูดซับฟอสฟอรัส อะลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์ที่ไม่ตกผลึก มักแสดงปฏิกิริยากับพื้นผิวมากกว่ารูปแบบที่ตกผลึก

กระบวนการตกตะกอนเกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากสารละลาย โดยการรวมตัวกับไอออนบวกของอะลูมิเนียม (สมการที่ 2.18) เหล็ก และแคลเซียม ตกตะกอนเป็นของแข็งรูปแบบใหม่



ฟอสฟอรัสปริมาณน้อย จะถูกดูดติดผิวในระยะแรก โดยเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของแคลไซต์ ตามด้วยการตกตะกอนของแคลเซียมที่มีพันธะกับฟอสฟอรัส (สมการที่ 2.19) พวกไอออนบวก เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแมกนีเซียม (Mg) จะมีผลต่อการดูดติดผิวของฟอสฟอรัส โดยจะไปเคลื่อนย้ายแคลเซียมให้เป็นอิสระ กระบวนการตกตะกอนของฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ของแคลเซียมที่มีพันธะกับฟอสฟอรัส เป็นปัจจัยการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของดินและตะกอนในบึง ที่มีค่าพีเอชมากกว่า 7



2.3.4.2 Isotherm ของการดูดซับฟอสฟอรัส

Isotherm ของการดูดซับฟอสฟอรัส มีประโยชน์ในการระบุปริมาณของกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัส โดยดินและตะกอน ซึ่งมักจะวัด โดยการผสมดินหรือตะกอนที่รู้ปริมาณ กับสารละลายที่รู้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส แล้วทำให้สมดุลโดยใช้เครื่อง Shaker เครื่อง 24 ชั่วโมง ที่

อุณหภูมิกองที่ เป็นการพิจารณาถึงปริมาณต่างๆ ของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ และที่ถูกค้นพบในสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆกัน หลังจากปรับสมดุล (Dunne และคณะ, 2005)

Adsorption Isotherm ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ Langmuir, Freundlich และ Tempkin model ซึ่งปกติแล้วจะใช้ Langmuir และ Freundlich model มากที่สุด

Langmuir model มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับ Freundlich model คือ สามารถให้ข้อมูลพารามิเตอร์ของการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่า สามารถหาโดยใช้สมการที่ 2.20

$$q = \frac{x/m}{1 + bc} = \frac{abc}{1 + bc} \quad (2.20)$$

โดยที่ q คือ ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
 x คือ มวลของฟอสฟอรัส (กรัม หรือ มิลลิกรัม)
 m คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม หรือ กิโลกรัม)
 c คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหลือในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 a และ b คือ ค่าคงที่

Freundlich model สามารถอธิบายในรูปแบบ Linear ดังสมการที่ 2.21

$$\text{Log } S = \log K + n \log C \quad (2.21)$$

โดยที่ S คือ ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
 K คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
 n คือ ค่าคงที่ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 C คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการ Kinetic อย่างง่ายดังที่อธิบาย มักจะผิดพลาดเมื่อเอาผลของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง (Dunne และคณะ, 2005)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yoo และคณะ (2006) ได้ศึกษาถึงลักษณะการดูดซับและการกำจัดฟอสฟอรัส ในพื้นที่ชุ่มน้ำ ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของดินตะกอน, พารามิเตอร์การดูดซับฟอสฟอรัสละลาย (SRP) เช่น ค่าการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด (PS_{max}), สมดุลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (EPC_0) และความสามารถในการกักเก็บฟอสฟอรัสของดินตะกอน การดูดซับโดยดินตะกอนมีความสัมพันธ์กับรูปแบบที่ไม่ตกผลึกของเหล็ก และอะลูมิเนียมอย่างมาก ส่วนรูปแบบที่ตกผลึกจะมีปริมาณน้อย

Zouboulis และ Prochaska (2006) ได้ทำการศึกษาบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง โดยใช้ตัวกลางที่ผสมระหว่างทราย และ Dolomite ในอัตราส่วน 10:1 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) เพื่อกำจัดฟอสฟอรัส เน้นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ไม่นับบทบาทของพืชและจุลินทรีย์ ระบบทำการติดตั้งกลางแจ้ง ปลุกด้วยต้นอ้อ (*Phragmites australis*) น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อลดความแปรปรวนขององค์ประกอบในน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยสสารที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ โดยทำการป้อนอย่างไม่ต่อเนื่อง 2 กะ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะทำการวัดค่าฟอสเฟตละลายในช่วงเวลา มากกว่า 3 เดือน ทำการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ 45% การสะสมของฟอสฟอรัสโดยตัวกลางในบึงประดิษฐ์อยู่ในช่วง 6.5-18.0% เทียบกับตัวกลางที่ยังไม่ได้ใช้งาน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นตัวกลางและภาระบรรทุก ปริมาณที่สกัดได้ของ Ca Mehlich-III มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงการกำจัดฟอสเฟตโดยการดูดติดผิวของออร์โธฟอสเฟตไอออนบนแคลเซียมคาร์บอเนต และ/หรือ การรวมตัวของออร์โธฟอสเฟตไอออนกับแคลเซียมไอออน ตกตะกอนเป็นแคลเซียมฟอสเฟต

Molle และคณะ (2006) อธิบายถึงพารามิเตอร์การไหลเข้าที่แตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นกรอง และเพื่อหาขีดจำกัดการรับอัตราภาระบรรทุกเกิน (hydraulic overloads) ความถี่ในการป้อนน้ำเสีย (Batch feeding frequency) และอัตราการเจริญเติบโตของต้นอ้อ (*Phragmites australis*) โดยทำการเปรียบเทียบสถานะของการป้อนและการหยุดพัก การดูดตันของชั้นตัวกลางเป็นปัญหาในระยะยาวของระบบนี้ และการที่รับอัตราภาระบรรทุกเกิน ทำให้เสี่ยงต่อการดูดตันเร็วขึ้น การรักษาสภาพที่มีออกซิเจน ควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบเกาะติด และการตกตะกอนที่ผิวหน้าชั้นกรอง เป็นสิ่งที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพ และการควบคุมการตกตะกอนสะสมที่ผิวหน้าชั้นกรอง เมื่อความถี่ของการป้อนต่ำจะมีการระบายน้ำออกได้ดี, คุณภาพน้ำที่ออกต่ำ, อัตราการซึมผ่านสูง และการกำจัดค่าซีไอดีต่ำ เมื่อความถี่ของการป้อนสูงจะมีการระบายน้ำออกได้น้อย, คุณภาพน้ำที่ออกดี, อัตราการซึมผ่านต่ำ, การใช้ออกซิเจนเป็นข้อดีของระบบ และการกำจัดค่าซีไอดีต่ำ

Brix และ Arias (2005) การกำจัดฟอสฟอรัสโดยบึงประดิษฐ์ ถูกจำกัดโดยความสามารถของตัวกลางในการดูดซับ การจับหรือการตกตะกอนฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ การกำจัดฟอสฟอรัสที่มากขึ้นในบึงประดิษฐ์อาจจะใช้ทรายที่มีแคลเซียม หรือเหล็กอยู่มาก การศึกษานี้มุ่งประเด็นไปที่การประเมินค่าวัสดุที่มีแคลเซียมสูงที่ใช้เป็นตัวกลางในการจับกับฟอสฟอรัส ได้แก่ แคลไซต์ ทราย และเปลือกหอยจากทะเล การทดลองจะหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ, Equilibrium isotherm และคอลัมน์ที่ใช้ทดลอง ซึ่งค่า Equilibrium isotherm เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง ถึงแม้จะมีข้อจำกัดของการหาค่าในการ Full scale แต่วัสดุในคอลัมน์ก็แสดงถึงความสามารถในการจับกับฟอสฟอรัสได้

Heal และคณะ (2005) ได้ศึกษาการใช้ Ochre (มีออกไซด์ของเหล็กเป็นหลัก) ที่ได้จากเหมืองแร่ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสมากกว่า 26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใช้ในบึงประดิษฐ์เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ochre กำจัดฟอสฟอรัสได้ 90 เปอร์เซ็นต์ จากน้ำเสียหลังจากเขย่า (Shaking) 15 นาที

Korkusuz และคณะ (2005) ทำการศึกษาการใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง (Vertical flow constructed wetland) ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนของ Campus of the Middle East technical University (METU), Ankara, ในประเทศตุรกี เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดของการใช้ตัวกลางที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตัวกลางกากแร่จากเตาหลอมเหล็ก (slag-based) และตัวกลางกรวด (gravel-based) ทั้ง 2 ระบบมีพื้นที่เท่ากับ 4.5x6.5x0.6 เมตร (กว้างxยาวxลึก) พื้นที่ผิว 30 ตารางเมตร พื้นล่างปูด้วย Polyethylene หนา 1 มิลลิเมตร ความชัน 1% บึงประดิษฐ์แรกบรรจุด้วย slag และทราย บึงประดิษฐ์ที่สองบรรจุด้วย gravel และทราย ใช้ท่อ PVC กระจายน้ำเสียให้ทั่วถึงเท่ากัน พืชที่ใช้เป็นต้นอ้อ (*Phragmites australis*) มีความหนาแน่น 9 ต้นกล้า/ตารางเมตร สูบน้ำเสียจากบ่อพักที่รับน้ำเสียชุมชนและน้ำฝน ไปที่ถังตกตะกอน 2 ถัง น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะเข้าสู่บึงประดิษฐ์ 1 ครั้ง/วัน อัตราการไหล 3 ลูกบาศก์เมตร/วัน ที่อัตราการระเหย 0.1 เมตร/วัน

ผลการทดลอง น้ำเสีย มีค่า COD:BOD₅ ratio เท่ากับ 4.3 ข้อมูลทางอุทกนิยมนิเวศวิทยายังเป็นค่าเฉลี่ยต่อเดือนของอุณหภูมิ, ปริมาณน้ำฝน และอัตราการระเหย ทั้ง 2 บึงประดิษฐ์ เริ่มต้นความสูงเฉลี่ยของพืช 40±9 เซนติเมตร (n=20) ท้ายสุดของการศึกษาสำหรับ slag และ gravel system ความสูงเฉลี่ยของพืช 149±23 เซนติเมตร และ 120±28 เซนติเมตร อัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 2.72 มิลลิเมตร/วัน และ 2.0 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยของ slag และ gravel ในบึงประดิษฐ์แสดงดังนี้ TSS (63% และ 59%), COD (47% และ 44%), NH₄⁺-N (88% และ 53%), TN (44% และ 39%), PO₄³⁻-P (44% และ 1%) และ TP (45% และ 4%) จะเห็นได้ว่า

กระบวนการบำบัดของ slag-based ดีกว่า gravel-based ในเทอมของการกำจัดฟอสฟอรัส และการผลิตไบโอแตรค

Holland และคณะ (2004) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความลึกของบึงประดิษฐ์ และอัตราการไหลที่มีผลต่อลักษณะของเวลาเก็บกัก (Residence time distribution; RTD) ซึ่ง RTD เป็นสิ่งที่สำคัญทางชลศาสตร์ (Hydraulics) สำหรับการทำให้โคลนและการออกแบบบึงประดิษฐ์อย่างเหมาะสม ในการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่า ความลึกของน้ำสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางชลศาสตร์ (Hydraulic efficiency) เวลาเก็บกักที่นานกว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น และเป็นผลดีต่อกระบวนการบำบัด

Molle และคณะ (2003) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของแคลไซต์ และคอนกรีตบด ทำการทดลองแบบกะ และแบบต่อเนื่อง คอนกรีตบดมีความไวในการตกตะกอนฟอสฟอรัส แต่ก็ทำให้ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) และค่าพีเอช (pH) ในน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงขึ้น ประสิทธิภาพของแคลไซต์จะขึ้นอยู่กับสมมูลของคาร์บอนเนตของสารละลาย การสังเกตที่ผิวของแคลไซต์แสดงให้เห็นถึงการตกตะกอนฟอสฟอรัสในรูปผลึก กระบวนการตกผลึกดูเหมือนจะเป็นกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างหนึ่ง

Arias และคณะ (2001) กล่าวว่า การดูดซับฟอสฟอรัสโดยทราย เป็นกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดิน ในการศึกษาทำการหาค่าความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสของทราย 13 แหล่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี คุณสมบัติการกำจัดฟอสฟอรัสมาจากค่า Isotherm คุณสมบัติที่สำคัญของทรายในการกำจัดฟอสฟอรัส ก็คือปริมาณแคลเซียม ปริมาณแคลเซียมที่สูงมักจะตกตะกอนกับฟอสฟอรัสละลายเป็นแคลเซียมฟอสเฟตในสถานะที่เป็นด่างอ่อนๆ ของน้ำเสีย ในสภาวะการบำบัดที่เป็นกรด ปริมาณของเหล็กและอะลูมิเนียมมีความสำคัญมากในการตกตะกอน การประมาณค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด จะใช้ Langmuir Isotherm ซึ่งไม่ได้บ่งบอกความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสของทรายได้ แต่ชี้ให้เห็นถึงการคัดเลือกตัวกลางที่มีศักยภาพ ในการกำจัดฟอสฟอรัส

Brooks และคณะ (2000) ศึกษาการใช้แร่วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) เป็นตัวกลางในบึงประดิษฐ์ ในการกำจัดฟอสฟอรัสละลายจากน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดขั้นที่สอง การทดลองจะใช้คอลัมน์ที่มีการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical upflow) ที่มีเวลาเก็บกักแปรผันระหว่าง 15-180 ชั่วโมง คอลัมน์ยาว 1.5 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร น้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ 11 คอลัมน์ เก็บตัวอย่าง 411 วัน สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกจาก

ระบบอยู่ในช่วง 0.14-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร) เวลาเก็บกักมากกว่า 40 ชั่วโมง

Sakadevan และ Bavor (1998) ศึกษาการใช้บึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสีย โดยปรับปรุงการใช้ตัวกลางที่เหมาะสม ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของตัวกลางดิน วัสดุอุตสาหกรรม 2 ชนิด และซีโอไลท์ Freundlich และ Langmuir Isotherm ใช้ในการอธิบายลักษณะการดูดซับของตัวกลาง Langmuir Isotherm ใช้ในการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด วัสดุอุตสาหกรรมอย่างหนึ่งคือ กากแร่จากเตาหลอม (Blast furnace slag) มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด เท่ากับ 44.2 กรัมฟอสเฟตต่อกิโลกรัมกากแร่ รองลงมาคือดิน 4.2 ถึง 5.2 ฟอสเฟตต่อกิโลกรัมดิน ซีโอไลท์ดูดซับฟอสเฟตได้ 2.15 กรัมต่อกิโลกรัม

ศักดิ์ชัย (2547) ได้ทำการศึกษาการทำงานจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดิน ร่วมกับระบบการระเหยโดยพืชในการบำบัดน้ำเสียบ้านเรือน โดยปลูกต้นธรรมรักษา (*Heliconia psittacorum cv'Lady Di'*) และต้นเข็ม (*Ixoracoccinea, L*) ในดงที่มีการไหลในแนวคิ่ง และในกระบะที่มีการไหลในแนวนอนตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากหอพักนิสิตที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว ตัวกลางที่ใช้ได้แก่ทรายปนหิน โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ 8.23 และ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน และรูปแบบการให้น้ำเสียเข้าสู่ระบบจากการให้แบบต่อเนื่องเป็นการให้แบบเป็นระยะ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของดงที่มีการไหลในแนวคิ่งได้แก่การให้น้ำแบบเป็นระยะ ที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟตเท่ากับ 71.27 63.45 64.92 88.00 88.16 และ 17.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการให้น้ำแบบต่อเนื่องที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เดียวกันมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟตเท่ากับ 62.06 63.67 67.92 83.24 82.93 และ 18.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่ออัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่า บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก.

ส่วนประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช ที่มีการให้น้ำเสียอย่างต่อเนื่องที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน ให้ผลเช่นเดียวกับประสิทธิภาพของดงที่มีการไหลในแนวคิ่ง สำหรับประสิทธิภาพสูงสุดของระบบได้แก่

การให้น้ำแบบเป็นระยะ ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวันซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับ 91.81 92.08 91.05 98.27 96.48 และ 96.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อัตราการระเหยของระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.68 ลิตรต่อวัน อัตราการดูดซึมน้ำไปใช้ ของต้นเข็มอยู่ในช่วง 2.50-3.17 มิลลิลิตรต่อวัน ขนาดของพื้นที่ที่จะติดตั้งระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช สำหรับนำไปใช้กับบ้านพักอาศัยจะใช้พื้นที่ประมาณ 78 ตารางเมตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

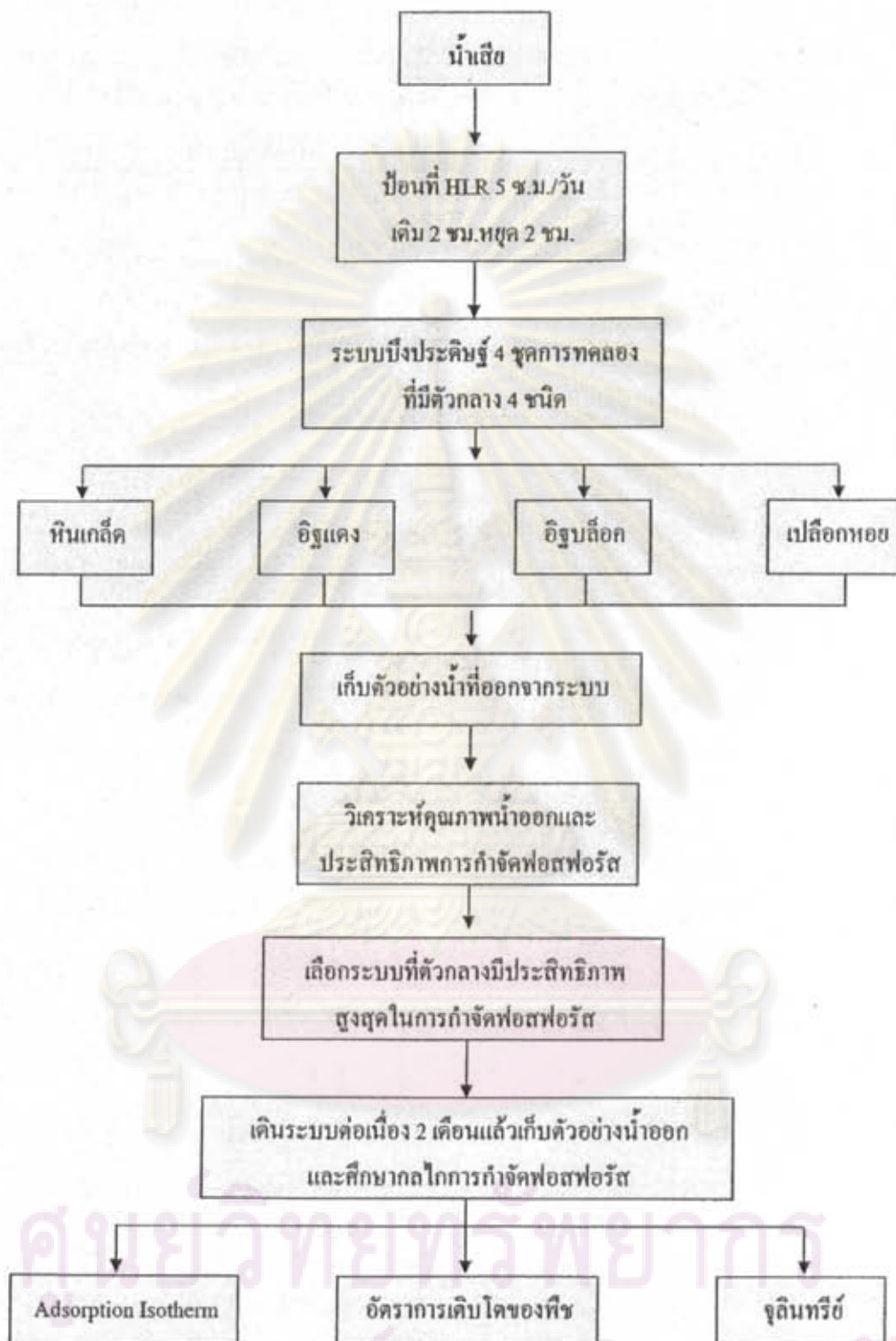
การดำเนินการวิจัยทำโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวดิ่ง เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของตัวกลางต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวดิ่ง การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ทั้ง 2 ระยะในช่วงเริ่มต้นได้ทำการเลี้ยงพืชให้คุ้นเคยกับระบบบึงประดิษฐ์ โดยป้อนด้วยน้ำประปา 15 วัน พืชที่ใช้ปลูกคือต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') ที่มีขนาดใกล้เคียงกันอายุประมาณ 2 เดือน หลังจากนั้นทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง หยุดป้อน 2 ชั่วโมงสลับกัน ที่อัตราภาระชลศาสตร์ 10 เซนติเมตรต่อวัน รวมไปถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของหินเกล็ด อีรูแดง อีรูบล็อก และเปลือกหอย

โดยระยะที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวดิ่ง ที่มีการใช้ตัวกลางแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ หินเกล็ด อีรูแดง เปลือกหอยและอีรูบล็อก ส่วนระยะที่ 2 กระทำต่อเนื่องจากเฟสที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน และศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวดิ่ง 2 ระบบ และเพิ่มชุดควบคุมที่ไม่ได้ปลูกพืชทั้ง 2 ระบบ สรุปแผนผังของการทดลองดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนผังของการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

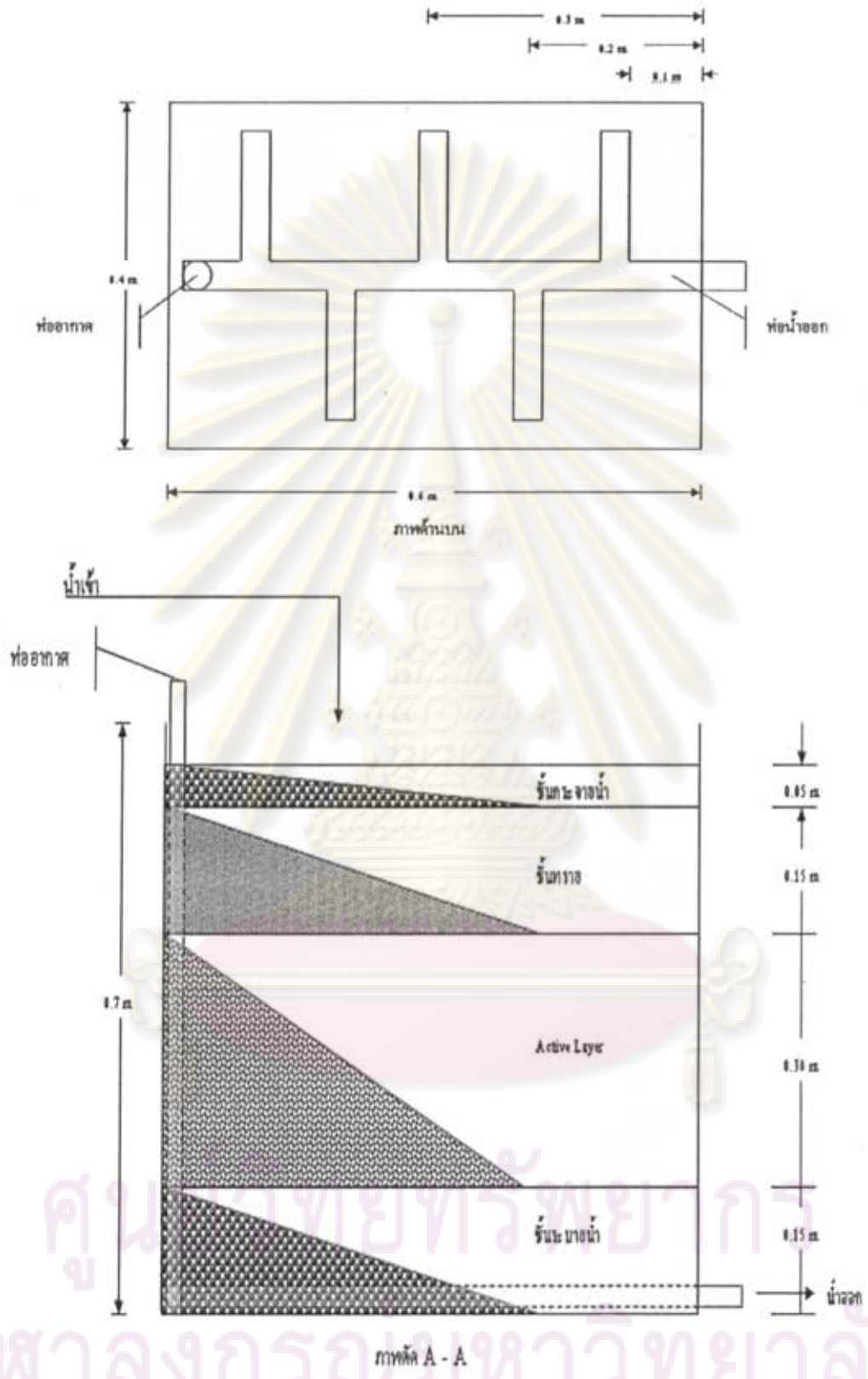
3.2.1 ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิจัยนี้ เป็นบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินในแนวตั้ง ใช้ถังน้ำโพลีเอทิลีนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดกว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.6 เมตร ลึก 0.7 เมตร และพื้นที่ผิว 0.24 ตารางเมตร บรรจุด้วยตัวกลาง 4 ชั้นเรียงต่อกันแสดงดังรูปที่ 3.2

ชั้นบนสุดบรรจุด้วยกรวดขนาด 10-20 มิลลิเมตร หนาประมาณ 5 เซนติเมตร เป็นชั้นที่ใช้ในการกระจายน้ำเสีย ชั้นที่ 2 บรรจุด้วยทรายละเอียดขนาด 0.15-0.60 มิลลิเมตร หนาประมาณ 15 เซนติเมตร ชั้นที่ 3 ตัวกลาง (Active layer) หนาประมาณ 30 เซนติเมตร บรรจุด้วยตัวกลางที่ใช้เปรียบเทียบได้แก่ หินเกล็ด อีซูแดง อีซูบล็อก และเปลือกหอย ชั้นล่างสุด บรรจุด้วยกรวดขนาด 10-20 มิลลิเมตร หนาประมาณ 15 เซนติเมตร เป็นชั้นที่ใช้ในการรวบรวมน้ำเสียออกจากระบบ ส่วนรูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดตั้งและการจัดเรียงตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง



ก.ระบบบึงประดิษฐ์ในระยะที่ 1



ข.ระบบบึงประดิษฐ์ในระยะที่ 2



ค. ดันก้ามกุ้ง



ง. สายยางกระจายน้ำเสีย

จ. ท่อรวบรวมน้ำเสีย
และท่ออากาศ

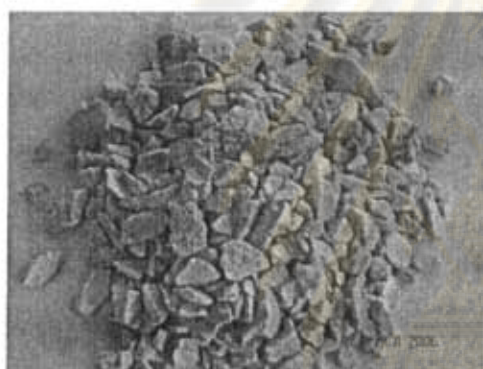
รูปที่ 3.3 แสดงระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง

3.2.2 ระบบท่อ

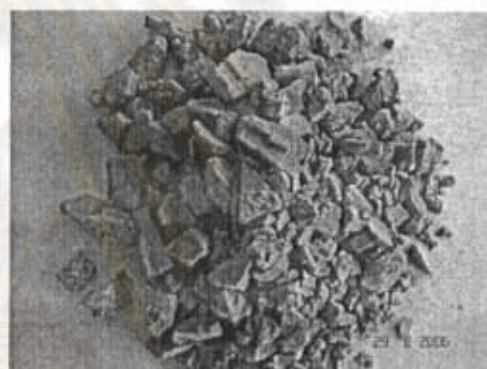
ในการกระจายน้ำเสียเข้าระบบอย่างทั่วถึงจะใช้สายยางที่เจาะรู ระยะห่างของรูเท่ากับ 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 (ง) ท่อที่ใช้รวบรวมน้ำออกที่ผ่านการบำบัดแล้ว ใช้ท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ต่อเป็นลักษณะก้างปลา เจาะเป็นรูขนาด 5 มิลลิเมตร ตลอดแนวท่อ วางที่ชั้นกรวดด้านล่างตามแนวนอน แสดงดังภาพด้านบนในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 (จ) ปลายท่อด้านในต่อกับท่อพีวีซีขนาด 3/4 นิ้ว ในแนวตั้งเพื่อระบายอากาศ

3.2.3 ตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในการเปรียบเทียบได้แก่ หินเกล็ด อีรูแดง และอีรูบล็อกนั้นทำการจัดหาจากร้านค้าวัสดุก่อสร้างในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ส่วนเปลือกหอยนั้นเป็นเปลือกหอยแครงจากจังหวัดชลบุรี ในการเตรียมตัวกลางเปรียบเทียบ เริ่มต้นจะทำการตากแห้งตัวกลางเป็นเวลา 3 วัน ต่อจากนั้นทำการบดอีรูแดง อีรูบล็อก และเปลือกหอย โดยใช้หมอนบดแล้วทำการคัดเลือกเศษตัวกลางที่ขนาดใกล้เคียงกับหินเกล็ด แล้วทำการตากแห้งตัวกลางที่ได้อีก 3 วัน โดยตัวกลางทั้งหมดมีขนาดประมาณ 2-6 มิลลิเมตร ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองระยะที่ 1 และระยะที่ 2 เป็นตัวกลางชุดเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.4



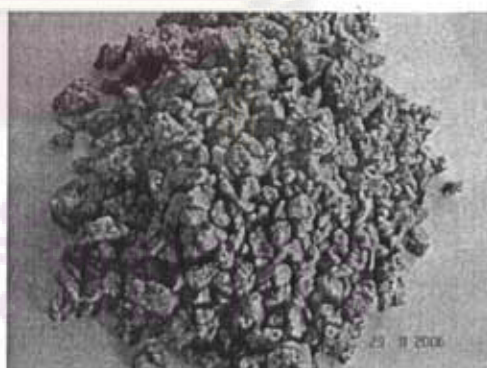
ก. หินเกล็ด



ข. อีรูแดง



ค. เปลือกหอย



ง. อีรูบล็อก

รูปที่ 3.4 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 พืชที่ปลูกในการทดลอง

พืชที่ใช้ในการทดลองเป็นต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') โดยคัดเลือกต้นที่อายุประมาณ 2 เดือนที่มีขนาดและความสูงของลำต้นใกล้เคียงกันแยกหน่อมาเพาะเลี้ยงโดยปลูกลงดินประมาณ 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นคัดเลือกต้นก้ามกุ้งมาปลูกลงทรายในระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจำนวน 6 ต้นต่อระบบ ระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 20 เซนติเมตร ความหนาแน่นประมาณ 25 ต้นต่อตารางเมตร แสดงตามรูปที่ 3.3 (ค) ก่อนป้อนน้ำเสียจริงจะทำการป้อนด้วยน้ำประปาก่อนประมาณ 15 วัน เพื่อให้พืชคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อม ในการทดลองระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ไม่ได้ใช้พืชชุดเดียวกัน แต่แหล่งที่มาของพืช (จังหวัดพระนครศรีอยุธยา) และวิธีการเตรียมต้นพืชเหมือนกัน

3.2.5 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชนที่ใช้ป้อนเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์ เพื่อเหตุผลด้านสุขภาพ ความปลอดภัย และลดความแปรปรวนขององค์ประกอบในน้ำเสียระหว่างการทดลอง น้ำเสียสังเคราะห์จะถูกเตรียมก่อนการป้อนเข้าสู่ระบบ โดยการผสมองค์ประกอบ 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ ไอโซมิลค์ 200 มิลลิกรัม (วัชรินทร์ และ โปสิฐ, 2543) NH_4Cl 191 มิลลิกรัม และ KH_2PO_4 35.1 มิลลิกรัม ดังนั้น น้ำเสียสังเคราะห์จะประกอบไปด้วยค่าซีโอดี 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทีเคเอ็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสฟอรัสทั้งหมด 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการทดลองระยะที่ 1 และระยะที่ 2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะเตรียมครั้งละ 40 ลิตร ป้อนน้ำเสีย 12 ลิตรต่อวัน ซึ่งใช้ได้ประมาณ 3 วัน และจะทำการสุ่มตรวจวัดค่าซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมด สัปดาห์ละ 1 ครั้ง

3.3 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์

3.3.1 ตัวแปรอิสระ คือตัวแปรที่ต้องการศึกษาและสนใจในงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. ชนิดและขนาดของตัวกลาง
2. ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง
3. อัตราการเจริญเติบโตของพืช (ความสูงของลำต้น, จำนวนหน่อ ใบ และดอกที่เพิ่มขึ้น, อัตราการใช้ฟอสฟอรัสโดยพืช)

3.3.2 ตัวแปรกำหนด คือตัวแปรที่มีการควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการวิจัยนี้ ได้แก่

1. ขนาดของระบบ
2. ชนิดของต้นไม้
3. ความสูงของชั้นตัวกลาง
4. ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ
5. อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ

3.3.3 ตัวแปรตาม คือตัวแปรที่ต้องวิเคราะห์หาค่าจากน้ำที่ผ่านการบำบัด ได้แก่

1. พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่
 - อุณหภูมิ
 - พีเอช
 - โออาร์พี
 - ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
 - ซีไอดี
 - บีไอดี
 - ทีเคเอ็น
 - ฟอสเฟตฟอสฟอรัส
 - ฟอสฟอรัสทั้งหมด
2. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบ

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

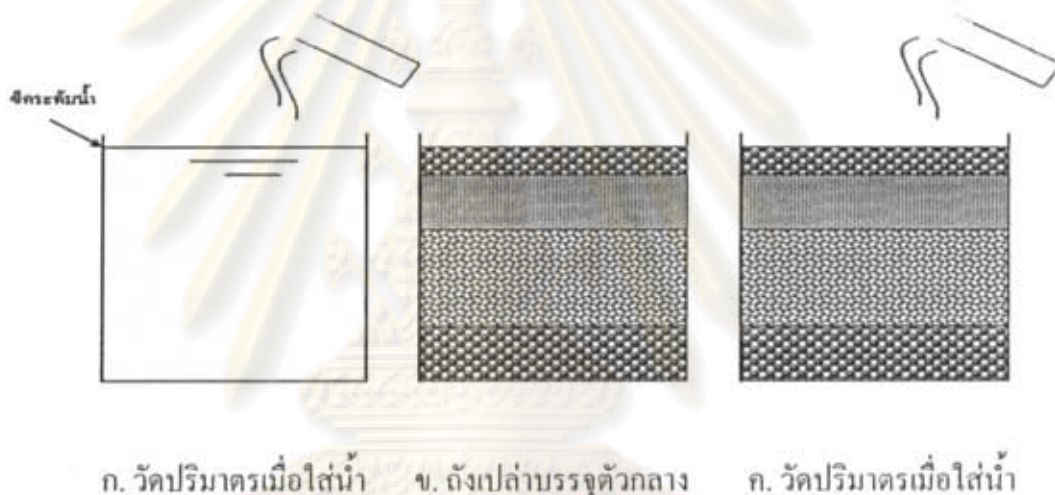
3.4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ-เคมีของตัวกลาง

- 1) วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (The Elemental Compositions) ของหินแก๊ส อีซูแดง อีซูบลีอก และเปลือกหอย โดยใช้ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF); Oxford Model ED 2000 วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) วิเคราะห์สภาวะของธาตุองค์ประกอบ (The mineral phase compositions) ของหินเกล็ด อีฐแดง อีฐบลีอก และเปลือกหอย โดยใช้ X-Ray Diffractometer (XRD); Bruker AXS Model D8 Discover วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) หากการกระจายขนาด (Particle Size Distribution) ของหินเกล็ด อีฐแดง อีฐบลีอก และเปลือกหอย โดยการทำให้ Sieve Analysis วิเคราะห์โดย College of Engineering Rangsit University

4) หาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Space) ของหินเกล็ด อีฐแดง อีฐบลีอก และเปลือกหอย โดยหลักการแทนที่น้ำดังรูปที่ 3.5 และสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.5 การหาอัตราส่วนช่องว่างโดยการแทนที่ของน้ำ

$$\text{Void Space} = \frac{\text{ปริมาณน้ำเมื่อบรรจุตัวกลาง}}{\text{ปริมาณน้ำเมื่อไม่ได้บรรจุตัวกลาง}} \quad (3.1)$$

5) หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของหินเกล็ด อีฐแดง อีฐบลีอก และเปลือกหอย โดยวิธี N_2 Gas Adsorption รายงานผลเป็นตารางเมตรต่อกรัม วิเคราะห์โดย Micromeritics Instrument Corporation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6) วัดค่า pH ของหินเกล็ด อีฐแดง อีฐบลีอก และเปลือกหอย โดย pH Meter หลังจากผสมตัวกลางบด 10 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร (Adam และคณะ, 2007)

3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์

1) ทำการสร้างแบบจำลอง อุปกรณ์จ่ายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ วางระบบท่อรวบรวมน้ำที่ผ่านการบำบัด รวมทั้งการจัดเรียงชั้นตัวกลางต่าง ดังรูปที่ 3.3

2) พืชที่ใช้ทดลองได้แก่ ต้น ก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum cv 'Lady Di'*) โดยทำการคัดเลือกลำต้นที่มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกัน นำมาปลูกในแบบจำลองที่เตรียมไว้ ซึ่งจะทำการปลูกจำนวน 6 ต้น ระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 20 เซนติเมตร ความหนาแน่นประมาณ 25 ต้นต่อตารางเมตร เริ่มต้นจะทำการเลี้ยงพืชด้วยน้ำประปา เพื่อให้พืชคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมที่เป็นทรายก่อน ประมาณ 15 วัน

3) ทำการตรวจสอบการลัดวงจรของระบบ (Tracer test) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร มีปริมาตร 1 ลิตร ป้อนเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำประปาอย่างต่อเนื่อง แล้วทำการเก็บน้ำออกจากระบบทุก 5 นาที

4) เริ่มเดินระบบ ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ HLR 5 เซนติเมตรต่อวันอย่างไม่ต่อเนื่อง (เต็ม 2 ชั่วโมง หยุด 2 ชั่วโมง)

5) การเก็บตัวอย่างน้ำ จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สัปดาห์ละ 1 ครั้ง และเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบแสดงตามตารางที่ 3.1

6) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช ไออาร์พี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ซีไอดี บีไอดี ทีเคเอ็น ฟอสเฟตฟอสฟอรัส และฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำ เพื่อศึกษาถึงภาพรวมของการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง

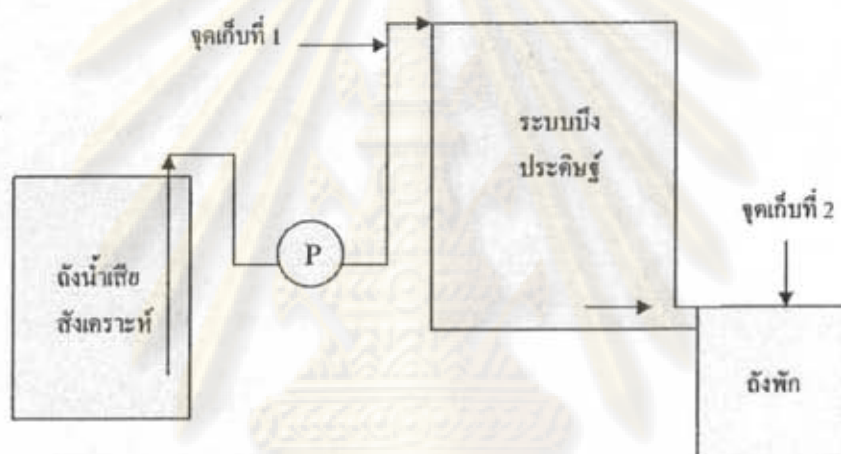
7) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสระหว่างบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด อิฐแดง อิฐบล็อก และเปลือกหอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์

1) จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

การทดลองนี้ จะดำเนินการเก็บตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 2 จุด ในถังน้ำเสียดังเคราะห์ เป็นจุดเก็บที่ 1 ทำการเก็บทุกครั้งเตรียมก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ ส่วนจุดเก็บที่ 2 เป็นน้ำในถังพักน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ตัวแปรและความถี่ในการวิเคราะห์น้ำที่ออกจากระบบ

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรและความถี่ในการวิเคราะห์น้ำที่ออกจากระบบ

ตัวแปร	ความถี่
อุณหภูมิ	A
pH	A
ORP	A
SS	A
COD	A
BOD	B
TKN	B
PO ₄ ⁻ -P	A
TP	A

หมายเหตุ: A คือ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ 3 ครั้งต่อสัปดาห์

B คือ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ 1 ครั้งต่อ 2 สัปดาห์

3) วิธีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 แสดงวิธีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
อุณหภูมิ	Thermometer (Mercury filled thermometer)
pH	Electrometric pH meter method
ORP	Electronic ORP meter with platinum electrode method
SS	Dried at 103-105°C
COD	Dichromate closed reflux method
BOD	Azide modification method
TKN	Macro Kjeldahl method
PO ₄ ⁻ -P	Vanadomolybdophosphoric acid method
TP	Vanadomolybdophosphoric acid method

3.5 การศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ

นำตัวกลางในบึงประดิษฐ์ที่มีผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุด จากการทดลองในหัวข้อ 3.4.2 มาศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ โดยการทำสมดุลสารฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$P_{\text{influent}} = P_{\text{effluent}} + P_{\text{remove}} \quad (3.2)$$

$$P_{\text{remove}} = P_{\text{adsorb}} + P_{\text{plant}} + P_{\text{microbe}} + P_{\text{other}} \quad (3.3)$$

- โดยที่ P_{influent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{effluent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{remove} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{adsorb} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลาง (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{plant} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{microbe} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)
 P_{other} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยกลไกอื่นๆ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส)

3.5.1 หาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสโดยตัวกลาง

วิธีการที่ใช้ในการหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง คือ Adsorption Isotherm test มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมตัวกลางที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุด มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (ขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร) และชั่งน้ำหนักมา 8 กรัม ใส่ขวดรูปชมภู 300 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำละลายฟอสฟอรัส 250 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 0 4 8 20 40 80 160 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร เปิดเครื่อง Shaker เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ปิดเครื่อง Shaker และกรองน้ำเพื่อกำจัดตัวกลางผงออก นำน้ำที่กรองแล้วไปหาค่าฟอสฟอรัสที่เหลือ
- 4) หาค่าการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดโดยคำนวณจากสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$q = \frac{(C_i - C_f) \times V}{M} \quad (3.4)$$

โดยที่ q = ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลาง (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ต่อกิโลกรัมตัวกลาง)

C_i = ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ค่าความเข้มข้นสุดท้ายของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายฟอสเฟตที่เติมในขวดรูปชมภู (0.250 ลิตร)

M = น้ำหนักแห้งของตัวกลาง (0.008 กิโลกรัม)

3.5.2 การวัดอัตราการเติบโตของพืช

- 1) วัดความสูงและน้ำหนักของพืชเริ่มต้น และในตอนท้ายของการทดลอง
- 2) หาปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ โดยการหาค่าจากมวลของฟอสฟอรัสที่ออกจากชุดควบคุมลบด้วยมวลของฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบที่ปลูกพืช

3.5.3 การย่อยและดูดซึมโดยจุลินทรีย์

การหาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกย่อยและดูดซึมโดยจุลินทรีย์นั้น จะทำการศึกษาในตอนท้ายการทดลองระยะที่ 2 โดยเก็บตัวกลางจากชุดควบคุมทั้ง 2 ระบบที่ระดับความลึกจากผิวหน้า 25 35 และ 45 เซนติเมตร นำตัวกลางที่ได้ไปเข้าเครื่องอุตสาหกรรมเพื่อแยกตัวกลางกับตะกอนจุลินทรีย์ หลังจากนั้นทำการหาปริมาณฟอสฟอรัสในจุลินทรีย์ที่เกาะติดผิวตัวกลาง

3.5.4 กลไกอื่นๆ

กลไกอื่นๆ ที่เกิดขึ้นได้แก่ การตกตะกอน (Yoo J.H. และคณะ, 2005; Zoubolis และ Prochaska, 2006) ซึ่งเมื่อทราบปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางในหัวข้อ 3.5.1 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกใช้โดยพืชในหัวข้อ 3.5.2 และปริมาณของฟอสฟอรัสจากการย่อยและดูดซึมโดยจุลินทรีย์ในหัวข้อ 3.5.3 ก็สามารถหาค่าฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยกลไกอื่น (P_{other}) ได้จากสมการ 3.3

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การดำเนินการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของตัวกลางต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ทั้ง 2 ระยะในช่วงเริ่มต้นได้ทำการเลี้ยงพืชให้คุ้นเคยกับระบบบึงประดิษฐ์ โดยป้อนด้วยน้ำประปา 15 วัน พืชที่ใช้ปลูกคือต้นก้ามกุ้ง (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') ที่มีขนาดใกล้เคียงกันอายุประมาณ 2 เดือน หลังจากนั้นทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง หยุดป้อน 2 ชั่วโมงสลับกัน ที่อัตราภาระชลศาสตร์ 5 เซนติเมตรต่อวัน รวมไปถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของหินเกล็ด อีรูแดง อีรูบลีอก และเปลือกหอย

โดยระยะที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง ที่มีการใช้ตัวกลางแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ หินเกล็ด อีรูแดง เปลือกหอยและอีรูบลีอก ผลการเปรียบเทียบได้ทำการคัดเลือก 2 ระบบที่ตัวกลางมีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุด ได้แก่ อีรูบลีอกและอีรูแดง เพื่อศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสต่อไป

ส่วนระยะที่ 2 กระทำต่อเนื่องจากเฟสที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง 2 ระบบที่มีการใช้ตัวกลางเป็นอีรูบลีอกและอีรูแดง และเพิ่มชุดควบคุมที่ไม่ได้ปลูกพืชทั้ง 2 ระบบ ซึ่งจากผลการทดลองระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อีรูบลีอกเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุด จากนั้นจึงทำการเลือกระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อีรูบลีอกเป็นตัวกลางมาศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัส

การทดลองในระยะที่ 1 ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 25 ธันวาคม 2549 ถึง 31 มกราคม 2550 ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจากเดินระบบได้ประมาณ 24 วัน และในระยะที่ 2 เก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 3 ธันวาคม 2550 ถึง 1 กุมภาพันธ์ 2551 ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจากเดินระบบได้ประมาณ 33 วัน

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพ - เคมีของตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิดได้แก่ หินเกล็ด อีฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อก ผลการวิเคราะห์สภาวะของธาตุองค์ประกอบ (The mineral phase compositions) โดย X-ray diffraction (XRD) มีดังนี้

- หินเกล็ดประกอบด้วย Calcium Carbonate (CaCO_3), Quartz (SiO_2), Stishovite (SiO_2)
- อีฐแดงประกอบด้วย Quartz (SiO_2), Phengite 2M1, Fe-rich, heated- $\text{K}(\text{Al,Fe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- เปลือกหอยประกอบด้วย Calcium Carbonate (CaCO_3)
- อิฐบล็อกประกอบด้วย Calcium Carbonate (CaCO_3), Quartz (SiO_2), Silicon Oxide (SiO_2), Stishovite (SiO_2)

ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้ในการดูดซับและตกตะกอน ได้แก่ แคลเซียม เหล็ก และอลูมิเนียม (Zhu และคณะ, 1997) แคลเซียมเป็นธาตุที่มีบทบาทเด่นที่สุดในการดูดซับและตกตะกอน (Korkusuz และคณะ, 2007) ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (The elemental compositions) ของหินเกล็ด อีฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อก โดย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) (ตารางที่ 4.1) พบว่าหินเกล็ดประกอบด้วย CaO และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 90.1 และ 0.13 โดยน้ำหนักตามลำดับ อีฐแดงประกอบด้วย CaO ต่ำเท่ากับร้อยละ 1.47 แต่มี Al_2O_3 ร้อยละ 11.41 และ Fe_2O_3 ร้อยละ 6.46 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้อีฐแดงยังมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 14.75 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าตัวกลางอื่นๆ เปลือกหอยนั้นประกอบด้วย CaO สูงมากเท่ากับร้อยละ 99.44 โดยน้ำหนัก ส่วนอิฐบล็อกนั้นมี CaO ร้อยละ 79.99 และมี Fe_2O_3 ร้อยละ 1.39 โดยน้ำหนัก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3.24 ตารางเมตรต่อกรัม

นอกจากนี้ตารางที่ 4.1 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Space) ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective size) D_{10} , D_{60} ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient: UC) และค่าพีเอช (pH) ของตัวกลางทั้ง 4 ชนิด ซึ่งขนาดของตัวกลางเท่ากับ 0.2-1 มิลลิเมตร และค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอมีค่าน้อยกว่า 3 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับบึงประดิษฐ์ (Zouboulis และ Prochaska, 2006)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางทั้ง 4 ชนิด

ธาตุองค์ประกอบ (% by wt.)	หินแก๊ส	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
MgO	-	-	-	0.34
Al ₂ O ₃	0.04	11.41	-	0.41
SiO ₂	0.06	74.93	-	3.23
SO ₃	-	0.18	0.10	0.50
K ₂ O	0.14	2.68	-	0.23
CaO	90.1	1.47	99.44	79.99
TiO ₂	-	1.15	-	0.16
MnO ₂	-	0.26	0.03	0.02
Fe ₂ O ₃	0.13	6.46	0.12	1.39
SrO	0.04	-	0.31	0.25
ZrO ₂	-	0.11	-	-
BaO	-	0.22	-	-
Void Space	0.55	0.65	0.63	0.60
Specific Surface area (m ² /g)	0.57	14.75	0.75	3.24
Effective size: D ₁₀ (mm.)	2.6	3.0	1.3	2.5
Effective size: D ₆₀ (mm.)	5.7	7.0	4.7	6.0
Uniformity Coefficient: UC	2.2	2.3	3.6	2.4
pH	9.73	8.60	9.54	10.15

4.3 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบทดลองมีการควบคุมให้ทุกพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง ซึ่งมีค่าซีโอดีเฉลี่ยระหว่าง 185.2 ถึง 192.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยระหว่าง 46.6 ถึง 51.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยระหว่าง 7.6 ถึง 8.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ทดลองในระยะที่ 1 และระยะที่ 2 แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ใช้ในระยะที่ 1

ค่าเฉลี่ย± SD.	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
	หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.2 ± 1.3	29.2 ± 1.3	29.2 ± 1.3	29.2 ± 1.3
pH	6.3 ± 0.1	6.2 ± 0.1	6.2 ± 0.2	6.2 ± 0.1
ORP (mV)	80.5 ± 6.7	82.1 ± 6.1	82.3 ± 10.6	82.3 ± 8.4
SS (mg/l)	22.8 ± 7.3	22.4 ± 5.2	22.1 ± 5.7	23.2 ± 6.7
COD (mg/l)	186.2 ± 17.9	186.3 ± 53.0	192.2 ± 45.4	187.1 ± 57.9
BOD (mg/l)	109.2 ± 6.4	108.7 ± 14.8	109.8 ± 13.0	109.8 ± 15.7
TKN (mg/l)	47.3 ± 9.4	51.5 ± 5.3	46.9 ± 7.6	48.8 ± 8.0
TP (mg/l)	8.2 ± 0.2	8.2 ± 0.2	8.2 ± 0.2	8.1 ± 0.2

หมายเหตุ : n = 6 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ใช้ในระยะที่ 2

ค่าเฉลี่ย± SD.	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 2 ชนิด			
	ชุดควบคุม อิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุม อิฐแดง	อิฐแดง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.9 ± 0.6	29.9 ± 0.6	29.9 ± 0.6	29.9 ± 0.6
pH	6.2 ± 0.1	6.2 ± 0.1	6.2 ± 0.1	6.2 ± 0.2
ORP (mV)	81.5 ± 5.6	80.1 ± 6.1	81.4 ± 7.7	81.5 ± 9.6
SS (mg/l)	22.5 ± 5.9	23.6 ± 8.0	24.8 ± 6.7	22.5 ± 6.3
COD (mg/l)	185.2 ± 24.2	190.8 ± 12.5	191.5 ± 24.5	191.2 ± 19.1
BOD (mg/l)	114.3 ± 18.0	110.8 ± 8.4	115.4 ± 19.0	112.1 ± 17.9
TKN (mg/l)	46.6 ± 5.9	47.2 ± 6.5	46.9 ± 6.5	47.6 ± 5.7
TP (mg/l)	7.6 ± 0.3	7.8 ± 0.2	7.8 ± 0.3	7.8 ± 0.2

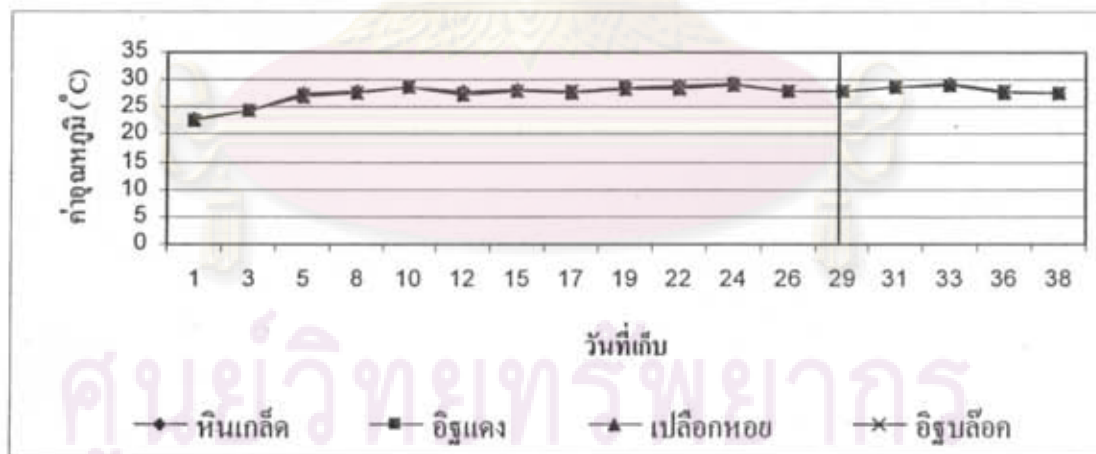
หมายเหตุ : n = 8 ตัวอย่าง

4.4 ระยะที่ 1 ประสิทธิภาพการนำน้ำคของระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด อีฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อก

จากผลการเดินระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิดและปลูกด้วยต้นก้ามกุ้ง เป็นเวลา 38 วัน พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวในวันที่ 29 ซึ่งใช้ค่าซีไอดีเป็นตัวกำหนด (ค่าของ ข้อมูลแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5) ดังนั้นผลการทดลองจะนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆตั้งแต่วันที่ 29 ถึง วันที่ 38 มาเฉลี่ยและเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการกำจัดค่อไป

4.4.1 อุณหภูมิ

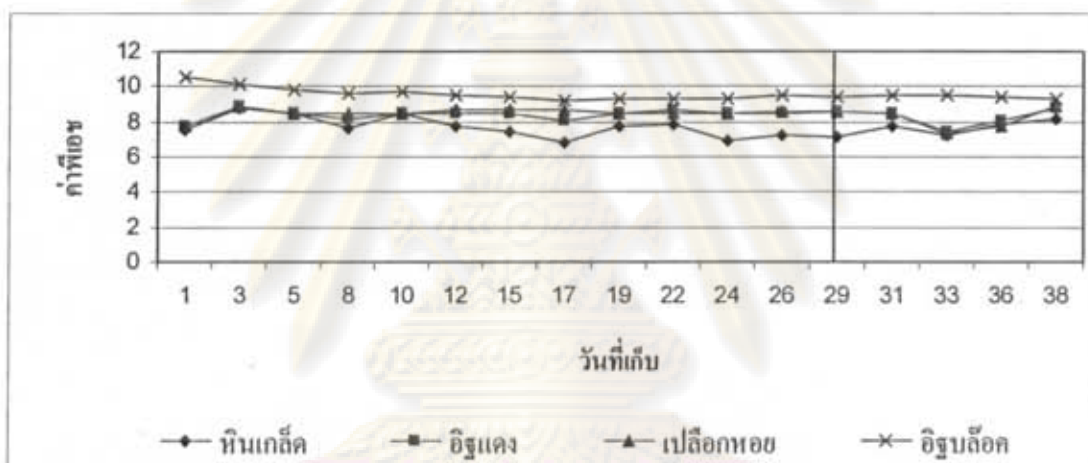
จากผลการทดลอง อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ (จุดเก็บที่ 2) ที่สภาวะคงตัว ของระบบที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 27.7-29.5 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28.40 องศาเซลเซียส) ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง 27.7-29.2 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28.24 องศาเซลเซียส) ระบบที่ บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 27.5-29.0 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28.12 องศาเซลเซียส) และระบบที่ บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 27.5-29.1 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28. องศาเซลเซียส) ซึ่งจากรูปที่ 4.1 เส้นกราฟของทั้ง 4 ระบบมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แสดงถึงอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบทั้ง 4 มีค่าใกล้เคียงกัน ระบบอยู่ในสภาวะที่มีค่าอุณหภูมิเดียวกัน



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.2 ค่าพีเอช

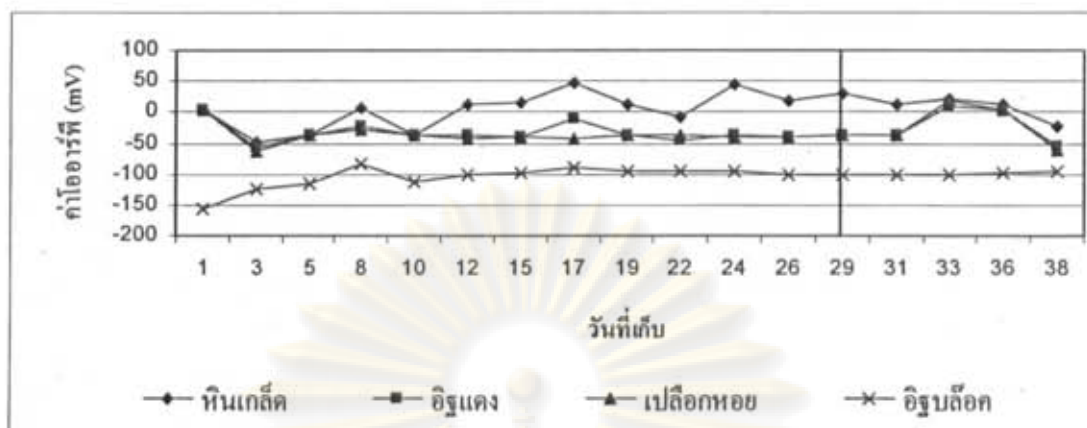
ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.2-6.3 โดยเมื่อน้ำเสียผ่านระบบบึงประดิษฐ์แล้วพบว่ามีความพีเอชสูงขึ้น ที่สภาวะคงตัวค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 7.15-8.15 (เฉลี่ย 7.64) ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง 7.45-8.82 (เฉลี่ย 8.27) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 7.39-8.85 (เฉลี่ย 8.22) และระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 9.32-9.48 (เฉลี่ย 9.42) ดังรูปที่ 4.2 น้ำทิ้งจากระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าพีเอชเริ่มต้นสูง แต่มีแนวโน้มลดลงตามเวลาและมีค่าคงที่ประมาณวันที่ 17 ของการทดลอง คาดว่าคุณสมบัติความเป็นบัฟเฟอร์ของตัวกลางน่าจะลดลงเมื่อมีการใช้งานไปเรื่อยๆ ส่วนค่าพีเอชของระบบที่บรรจุหินเกล็ด อิฐแดง และเปลือกหอย มีค่าน้อยกว่า 9



รูปที่ 4.2 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.3 โออาร์พี

ค่าโออาร์พีเฉลี่ยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าระหว่าง 80.5 ถึง 82.3 มิลลิโวลต์ ที่สภาวะคงตัวค่าโออาร์พีของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง -23.1 ถึง 31.0 มิลลิโวลต์ ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง -54.3 ถึง 11.1 มิลลิโวลต์ ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง -59.3 ถึง 18.0 มิลลิโวลต์ และระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง -100.9 ถึง -94.1 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 4.3 ค่าโออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบทุกระบบมีค่าอยู่ในช่วง -150 ถึง 50 คาดว่าระบบอยู่ในสถานะแอนน็อกซิก การที่น้ำจากระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าโออาร์พีเป็น (-) คาดว่าระบบอยู่ในสถานะแอนน็อกซิกเช่นกัน



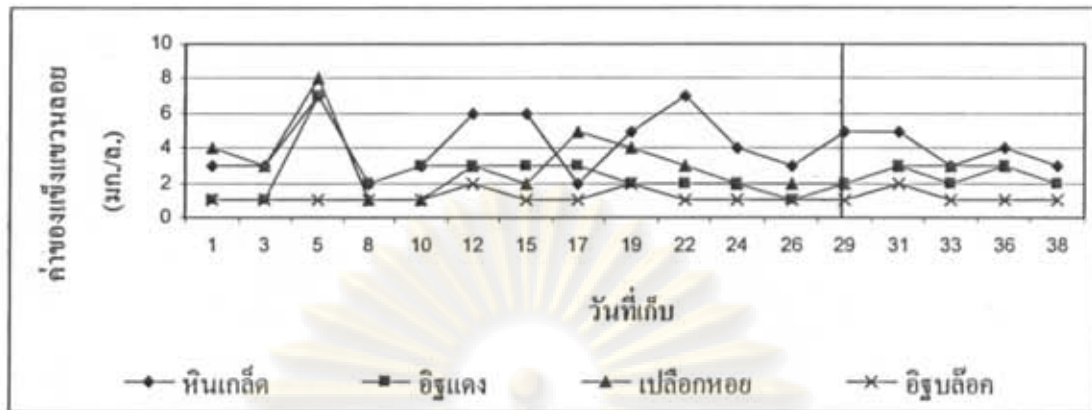
รูปที่ 4.3 โออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.4 ของแข็งแขวนลอย

น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยระหว่าง 22.1 ถึง 23.2 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งที่ผ่านระบบพบว่า มีของแข็งแขวนลอยต่ำมาก ที่สภาวะคงตัวค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 3-5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 4.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.60 มิลลิกรัมต่อลิตร) และระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.4 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากทั้ง 4 ระบบ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีค่าไม่ค่อนขงที่ อาจเนื่องมาจากการหลุดลอกของตะกอนจุลินทรีย์และตัวกลางภายในระบบ แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่า ตัวกลางอิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 94.83 รองลงมาคืออิฐแดง เปลือกหอย และหินเกล็ด คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 89.29 88.24 และ 82.46 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



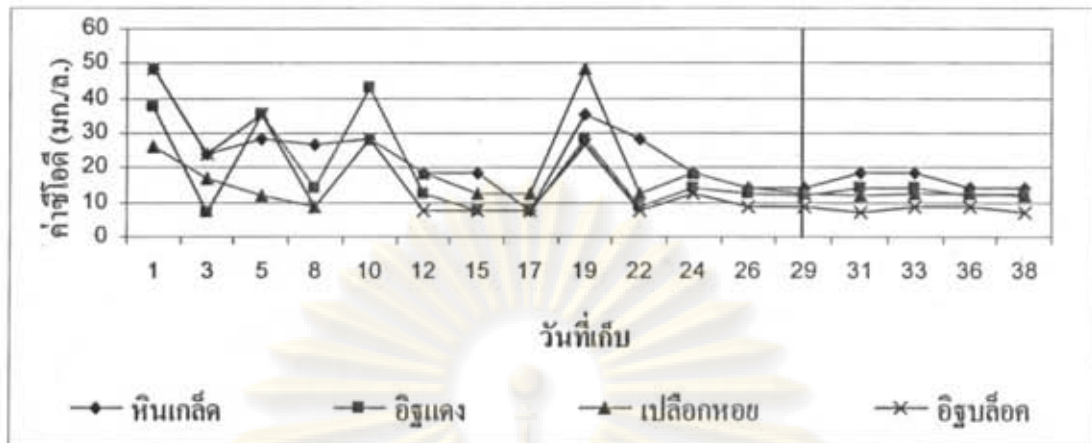
รูปที่ 4.4 ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.5 ซีไอดี

น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีไอดีเฉลี่ยระหว่าง 186.2 ถึง 192.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกค่าซีไอดีมีค่าไม่คงที่ คาดว่าเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวเข้ากับสภาพน้ำเสีย แต่เมื่อเดินระบบได้ประมาณ 29 วัน ค่าซีไอดีเริ่มคงที่ แสดงถึงระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งที่สภาวะคงตัวค่าซีไอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าลดลงอยู่ระหว่าง 14.29-18.47 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 15.96 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุอีฐแดงมีค่าซีไอดีระหว่าง 11.90-14.29 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 12.94 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าซีไอดีระหว่าง 11.90-12.31 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 12.15 มิลลิกรัมต่อลิตร) และระบบที่บรรจุอีฐบลีอกมีค่าซีไอดีระหว่าง 7.27-8.93 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 8.25 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.5

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางอีฐบลีอกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95.59 รองลงมาคือเปลือกหอย อีฐแดง และหินเกล็ด คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 93.68 93.06 และ 91.43 ตามลำดับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

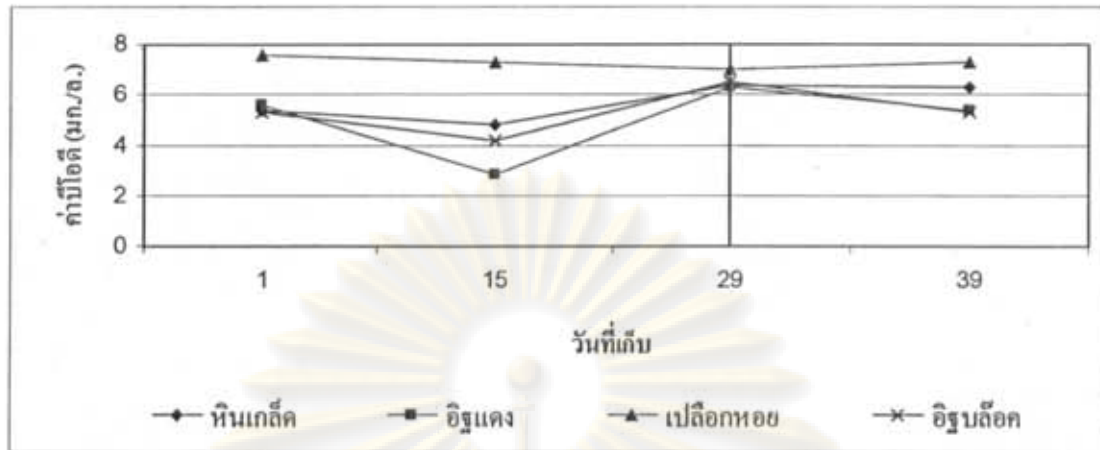


รูปที่ 4.5 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.6 บีโอดี

น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าบีโอดีเฉลี่ยระหว่าง 108.7 ถึง 109.8 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้ได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด อิฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อกมีค่า BOD₅:COD ratio เท่ากับ 0.59 0.58 0.57 และ 0.59 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าน้ำเสียสังเคราะห์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี (Tchobanoglous และคณะ, 2004) ที่สภาวะคงตัวค่าบีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 6.3-6.4 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 6.35 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง 5.4-6.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.85 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 7.0-7.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 7.15 มิลลิกรัมต่อลิตร) และระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 5.3-6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.90 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.6 ค่าบีโอดีของทั้ง 4 ระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตั้งแต่เริ่มเดินระบบ จนถึงทำการทดลองค่าบีโอดีไม่ค่อยแตกต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



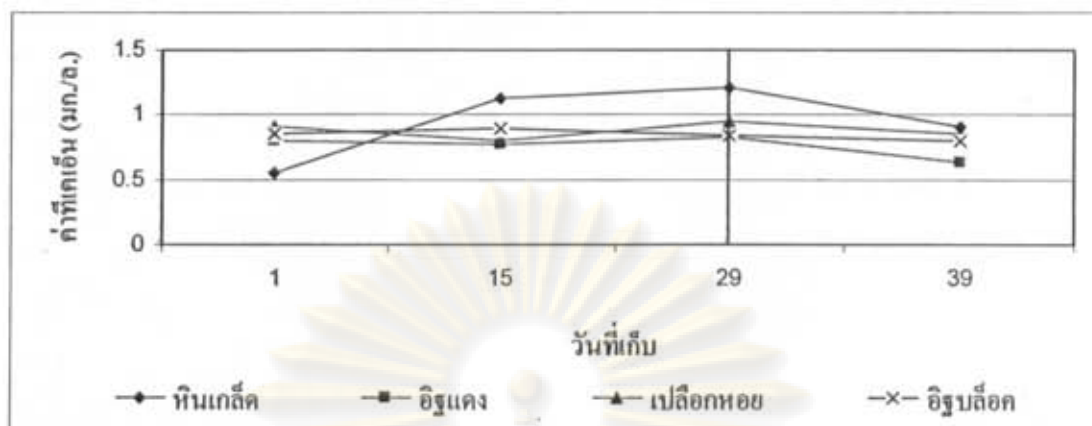
รูปที่ 4.6 บีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.7 ทีเคเอ็น

น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยระหว่าง 46.9 ถึง 51.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะคงตัวค่าทีเคเอ็นของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 0.91-1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.06 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีค่าระหว่าง 0.63-0.82 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.73 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 0.86-0.95 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.90 มิลลิกรัมต่อลิตร) และระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 0.80-0.83 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.82 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากรูปที่ 4.7 ค่าทีเคเอ็นของทั้ง 4 ระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตั้งแต่เริ่มเดินระบบ จนถึงทำการทดลองค่าทีเคเอ็นมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.58 รองลงมาคืออิฐบล็อก เปลือกหอย และหินเกล็ด คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 98.32 98.08 และ 97.76 ตามลำดับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

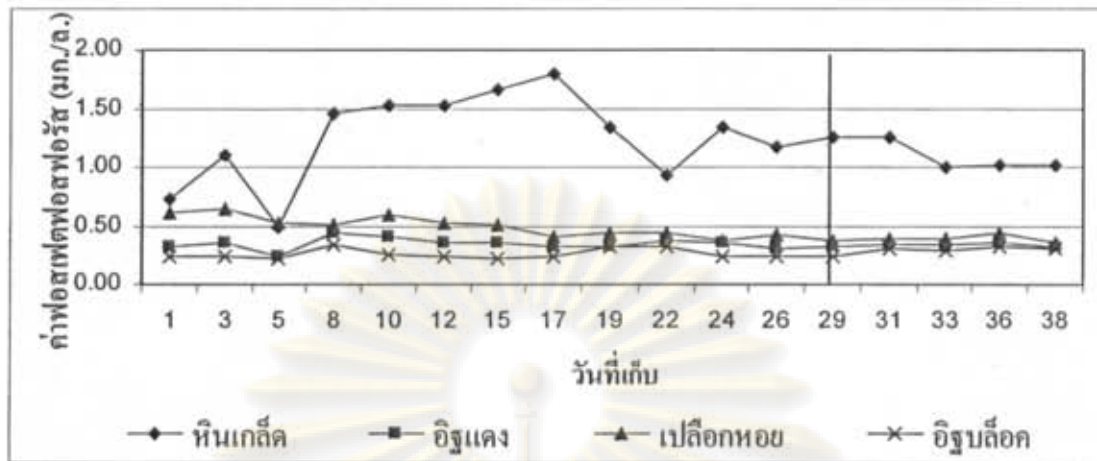


รูปที่ 4.7 ที่เคเอ็นของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.8 ฟอสเฟตฟอสฟอรัส

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยระหว่าง 8.1 ถึง 8.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านระบบบึงประดิษฐ์แล้วพบว่ามีความฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปของฟอสเฟตฟอสฟอรัส โดยที่สภาวะคงตัวค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 1.00-1.26 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.11 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุอีฐแดงมีค่าระหว่าง 0.32-0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.33 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีค่าระหว่าง 0.36-0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.39 มิลลิกรัมต่อลิตร) และระบบที่บรรจุอีฐบลีอกมีค่าระหว่าง 0.24-0.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.8 ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด มีค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัสสูงที่สุด ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อีฐแดง เปลือกหอย และอีฐบลีอก มีค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำ และคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงท้ายการทดลอง

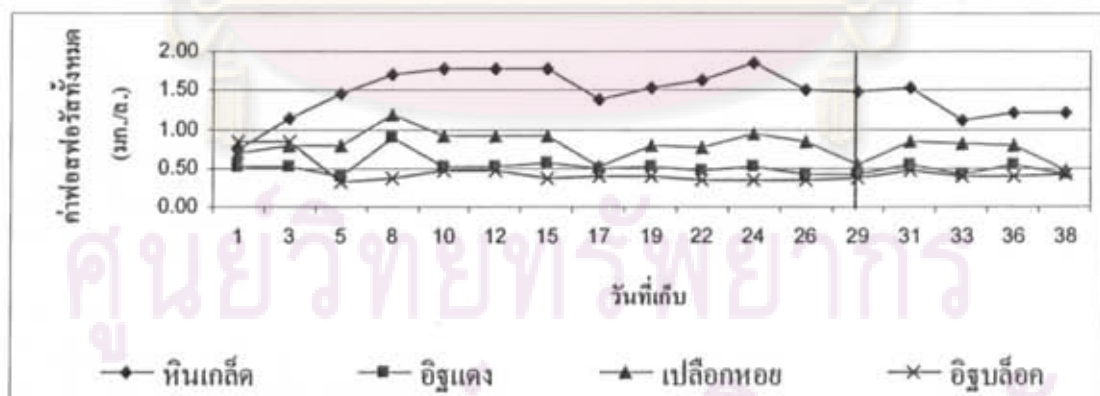
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.9 ฟอสฟอรัสทั้งหมด

ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่สภาวะคงตัวมีค่าใกล้เคียงกับค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทั้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินเกล็ด อิฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อกมีค่าเท่ากับ 1.31 0.47 0.69 และ 0.41 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 84.04 94.25 91.54 และ 94.92 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอิฐบล็อกและอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางต่างๆ

4.4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางทั้ง 4 ชนิด

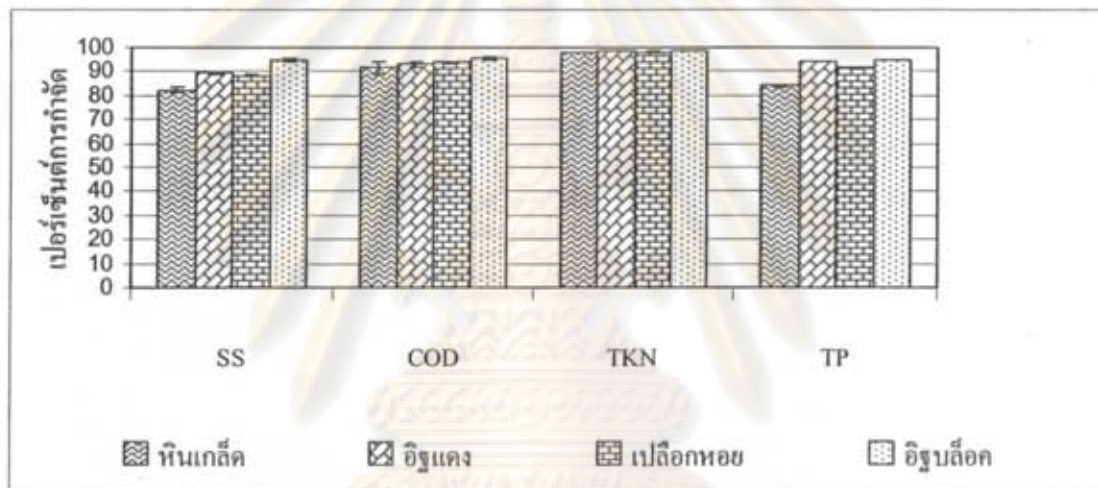
การทดลองในเฟสที่ 1 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำตั้งแต่วันที่ 25 ธันวาคม 2549 ถึง 31 มกราคม 2550 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด แสดงเป็นค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4.4

การเปรียบเทียบระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด ได้แก่ หินเกล็ด อิฐแดง เปลือกหอย และอิฐบล็อก ระบบที่บรรจุหินเกล็ดมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.46 91.43 97.76 และ 84.04 ตามลำดับ ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 89.29 93.06 98.58 และ 94.25 ตามลำดับ ระบบที่บรรจุเปลือกหอยมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 88.24 93.68 98.08 และ 91.54 ตามลำดับ ระบบที่บรรจุอิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 94.83 95.59 98.32 และ 94.92 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด

ค่าเฉลี่ย± SD.	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
	หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
อุณหภูมิ (°C)	28.4 ± 0.7	28.2 ± 0.6	28.1 ± 0.6	28.2 ± 0.6
pH	7.6 ± 0.4	8.3 ± 0.5	8.2 ± 0.6	9.4 ± 0.1
ORP (mV)	10.5 ± 20.1	-22.5 ± 28.1	-22.4 ± 31.8	-98.7 ± 2.8
SS (mg/l)	4.0 ± 1.0	2.4 ± 0.6	2.6 ± 0.6	1.2 ± 0.5
COD (mg/l)	16.0 ± 2.3	12.9 ± 1.3	12.2 ± 0.2	8.3 ± 0.9
BOD (mg/l)	6.4 ± 0.1	5.9 ± 0.6	7.2 ± 0.2	5.9 ± 0.9
TKN (mg/l)	1.1 ± 0.2	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.0
PO ₄ ⁻ P (mg/l)	1.1 ± 0.1	0.3 ± 0.0	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0
TP (mg/l)	1.3 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.4 ± 0.0

ในการพิจารณาคัดเลือกตัวกลางที่เหมาะสม จากผลการทดลองในระยะที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าตัวกลางทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้สูง โดยน้ำทิ้งมีค่าพารามิเตอร์ผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้งทั้งหมด สำหรับต่อไปการทดลองในระยะที่ 2 จะเน้นระบบบึงประดิษฐ์ที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาในการคัดเลือกตัวกลางที่เหมาะสม จึงพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสูงสุด ซึ่งพบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่บรรจุอิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.92 รองลงมาได้แก่ระบบที่บรรจุอิฐแดงมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.25 จึงคัดเลือกทั้ง 2 ระบบไปทำการทดลองต่อในการทดลองระยะที่ 2 ต่อไป ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางทั้ง 4 ชนิด

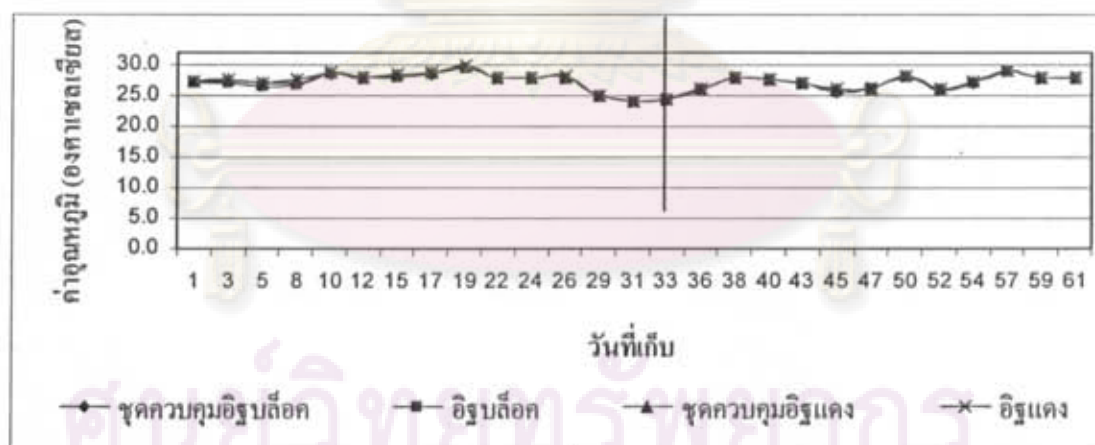
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ระยะที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกและโอโซนแดง

การทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกและโอโซนแดงที่มีการปลูกพืช และมีชุดควบคุม (ไม่ปลูกพืช) โดยเดินระบบตั้งแต่วันที่ 3 ธันวาคม 2550 ถึง 1 กุมภาพันธ์ 2551 พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 33 วัน ซึ่งใช้ค่าซีไอดีเป็นตัวกำหนดเช่นกัน (ค่าของข้อมูลแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดลองระยะที่ 1 ดังนี้

4.5.1 อุณหภูมิ

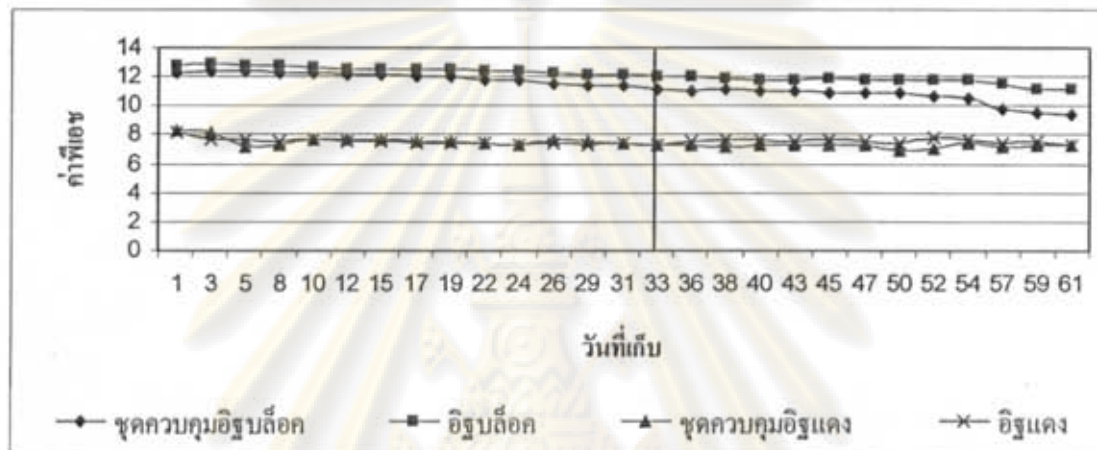
จากผลการทดลอง อุณหภูมิของน้ำที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่สภาวะคงตัวอุณหภูมิของน้ำทั้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกมีค่าระหว่าง 24.5-28.9 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 26.90 องศาเซลเซียส) ชุดควบคุมโอโซนลิอกมีค่าระหว่าง 24.5 -29.0 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 26.98 องศาเซลเซียส) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนแดงมีค่าระหว่าง 24.5-29.0 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 27.05 องศาเซลเซียส) และชุดควบคุมโอโซนแดงมีค่าระหว่าง 24.5 -29.0 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 27.02 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่พืชและจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำออกเล็กน้อย



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางโอโซนลิอก โอโซนแดง และชุดควบคุม

4.5.2 พีเอช

ค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่สภาวะคงตัวของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 11.14-12.00 (เฉลี่ย 11.72) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 9.47-11.20 (เฉลี่ย 10.62) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 7.25-7.84 (เฉลี่ย 7.55) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 6.96-7.45 (เฉลี่ย 7.25) ดังรูปที่ 4.12



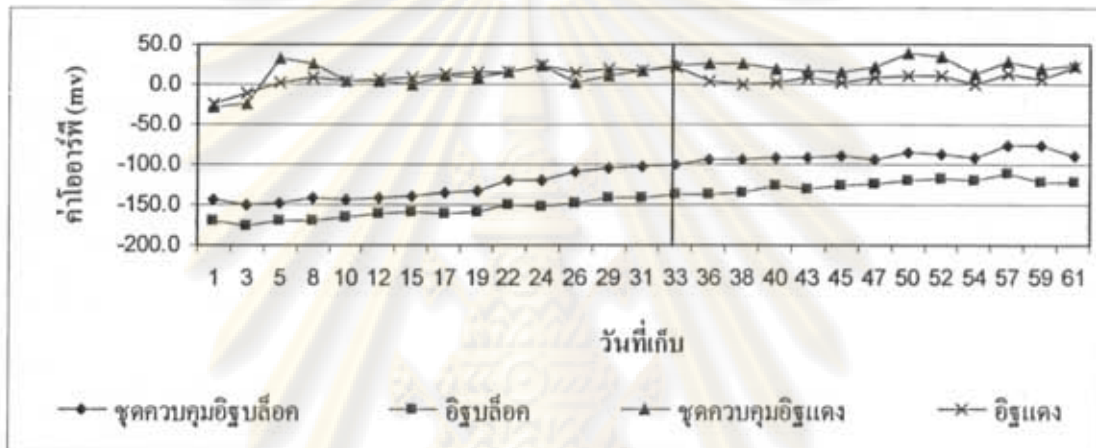
รูปที่ 4.12 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6.2 เมื่อผ่านระบบค่าพีเอชของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกและชุดควบคุมอิฐบล็อกเริ่มต้นมีค่าสูง (มากกว่า 12) แต่มีแนวโน้มลดลงตามเวลา ซึ่งการลดลงของค่าพีเอชคาดว่าเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมที่เกิดเป็นผลึกของแคลเซียมฟอสเฟต ถ้าทำการทดลองต่อไป ในท้ายที่สุดค่าพีเอชจะลดลงไปถึง 8 ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นตัวควบคุมค่าพีเอช (Adam และคณะ, 2006) ชุดควบคุมอิฐบล็อก (ไม่ปลูกพืช) มีค่าพีเอชต่ำกว่าระบบที่ปลูกพืช อาจเนื่องมาจากระบบที่ปลูกพืชนั้นรากพืชมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์จึงทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น อีกปัจจัยที่อาจทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นในเวลากลางวันคือการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในระบบ ส่วนค่าพีเอชของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง และชุดควบคุมอิฐแดง มีค่าน้อยกว่า 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.3 โออาร์พี

จากผลการทดลอง ค่าโออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่สภาวะคงตัวของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าระหว่าง -110.8 ถึง -138.0 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย -125.19 มิลลิโวลต์) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง -76.1 ถึง -99.7 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย -88.68 มิลลิโวลต์) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 22.3 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย 8.65 มิลลิโวลต์) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 13.3 ถึง 38.1 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย 23.58 มิลลิโวลต์) ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 โออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

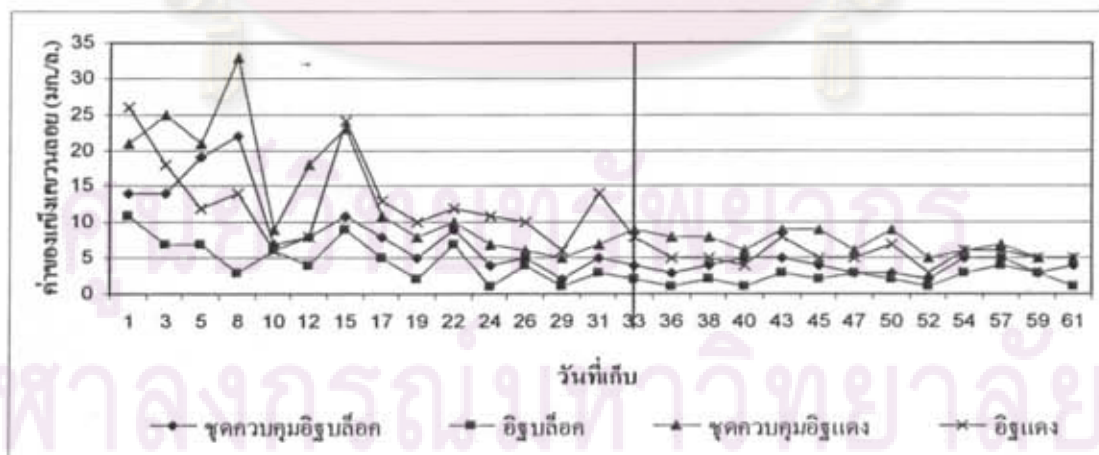
ค่าโออาร์พีเฉลี่ยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าระหว่าง 80.1 ถึง 81.5 มิลลิโวลต์ แต่ค่าโออาร์พีของน้ำที่ออกจากระบบระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก และชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าอยู่ในช่วง -140 ถึง -110 มิลลิโวลต์ คาดว่าระบบอยู่ในสภาวะการย่อยสลายแบบแอนีอ็อกซิก ส่วนระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงและชุดควบคุมอิฐแดงอยู่ในช่วง 0 ถึง 25 มิลลิโวลต์ คาดว่าระบบอยู่ในสภาวะการย่อยสลายแบบแอนีอ็อกซิกเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชของน้ำออกมีค่าสูง ค่าโออาร์พีจะมีแนวโน้มลดลงมากขึ้น

4.5.4 ของแข็งแขวนลอย

ในช่วงเริ่มต้นการทดลอง ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ของทั้ง 4 ระบบค่อนข้างสูงและมีค่าลดลงในเวลาต่อมา ดังรูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบนั้นคาดว่ามาจากตะกอนจุลินทรีย์และตัวกลางในระบบ ซึ่งเมื่อเดินระบบต่อไประบบรากเพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวในการกรองเพิ่มขึ้น ทำให้การกรองและการตกตะกอนในระบบรากเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลง (Korkusuz และคณะ, 2005)

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยระหว่าง 22.5 ถึง 24.8 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งที่ผ่านระบบพบว่า มีของแข็งแขวนลอยต่ำมาก ที่สภาวะคงตัวค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 1-4 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.15 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 2-5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 3.85 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 3-8 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตร) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 5-9 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 7.08 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางอิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 90.90 ชุดควบคุมอิฐบล็อกเท่ากับร้อยละ 82.89 ส่วนอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 75.38 ชุดควบคุมอิฐแดงเท่ากับร้อยละ 71.39



รูปที่ 4.14 ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

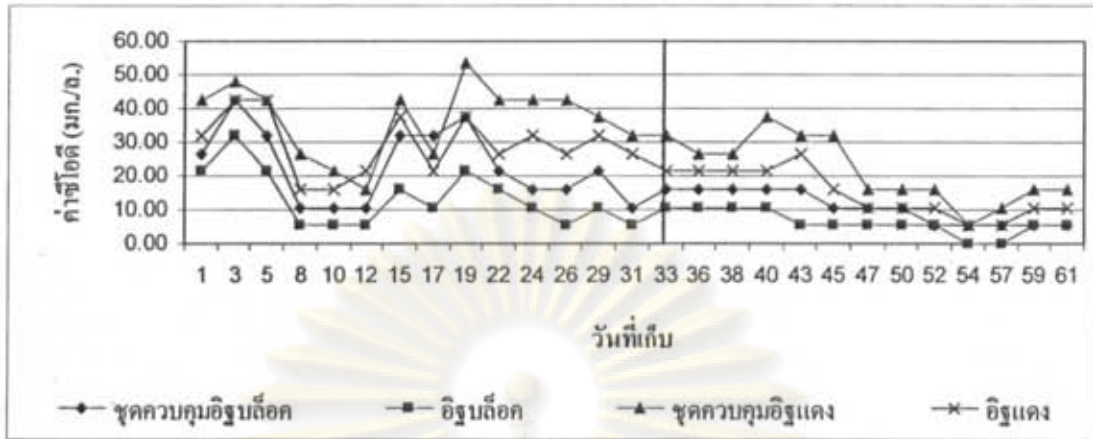
4.5.5 ค่าซีไอดี

ในช่วงแรกของการเดินระบบน้ำทิ้งมีค่าซีไอดีแปรปรวน ไม่คงที่ คาดว่าเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพของน้ำเสีย แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 33 วัน ค่าซีไอดีมีค่าลดลงและคงที่ แสดงถึงระบบที่เข้าสู่สภาวะคงที่ (ค่าของข้อมูลแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5) ในบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง สารอินทรีย์ที่ตกตะกอน จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในสภาพที่สงบนิ่ง โดยกระบวนการตกตะกอนและการกรอง สารประกอบอินทรีย์จะถูกย่อยสลายทั้งในสภาพที่มีอากาศ และสภาพที่ไม่มีอากาศ โดย Heterotrophic bacteria จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่กับผิวของตัวกลาง หน่อและรากของพืช (ศุวศา, 2544) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน การใช้สารอาหารโดยพืชน้อยมากเมื่อเทียบกับการย่อยสลายทางชีวภาพ (Korkusuz และคณะ, 2005)

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยระหว่าง 185.2 ถึง 191.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่สภาวะคงตัวของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อุบลีอกมีค่าระหว่าง 0.00-10.67 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 6.15 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอุบลีอกมีค่าระหว่าง 5.33-16.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 10.67 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 5.33-37.33 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 21.74 มิลลิกรัมต่อลิตร) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 5.33-26.67 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 14.77 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางอุบลีอกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 96.78 ชุดควบคุมอุบลีอกเท่ากับร้อยละ 94.24 ส่วนอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีเท่ากับร้อยละ 92.27 ชุดควบคุมอิฐแดงเท่ากับร้อยละ 88.65 ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการปลูกพืชมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่าระบบไม่มีพืช

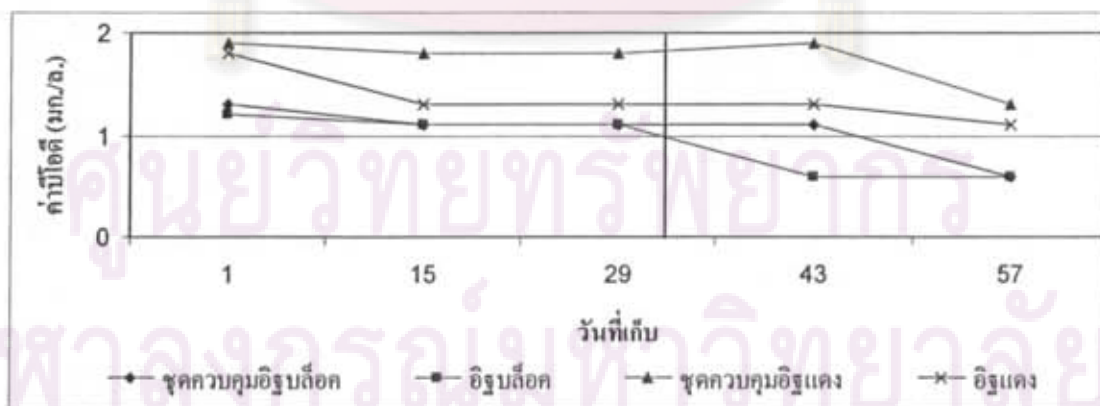
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบดอัด อิฐแดง และชุดควบคุม

4.5.6 บีโอดี

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าบีโอดีเฉลี่ยระหว่าง 110.8 ถึง 115.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะคงตัว ค่าบีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบดอัดมีค่าระหว่าง 0.6-0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.60 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐบดอัดมีค่าระหว่าง 0.6-1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.04 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 1.1-1.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 1.3-1.9 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.74 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่าระบบที่ปลูกพืช และระบบที่ไม่ปลูกพืช มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงมาก โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย

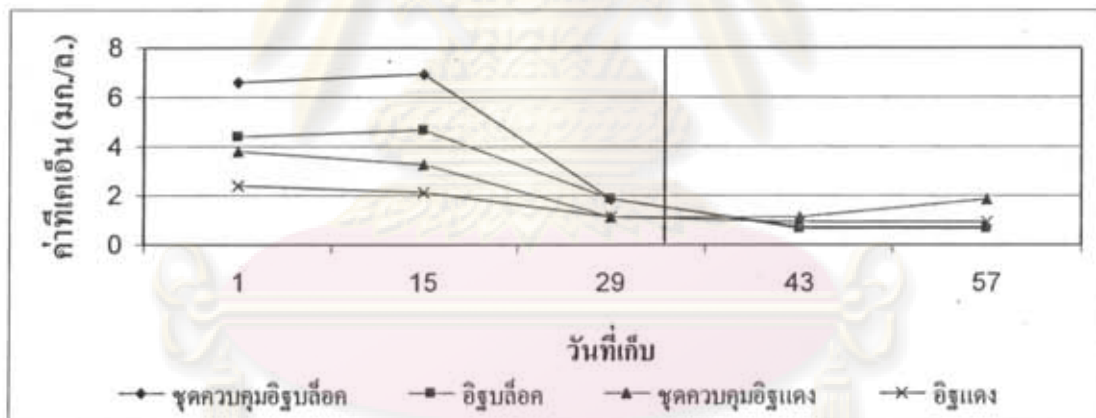


รูปที่ 4.16 บีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบดอัด อิฐแดง และชุดควบคุม

4.5.7 ทีเคเอ็น

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยระหว่าง 46.6 ถึง 47.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าน้ำออกทั้ง 4 ระบบมีค่าทีเคเอ็นค่อนข้างต่ำ และใกล้เคียงกัน ที่สภาวะคงตัวค่าทีเคเอ็นของ น้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 0.65-0.65 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.65 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 0.75-0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 0.93-0.93 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.93 มิลลิกรัมต่อลิตร) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 1.12-1.87 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร) แสดงดังรูปที่ 4.17

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นของระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางอิฐ บล็อกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.62 ชุดควบคุมอิฐบล็อกเท่ากับร้อย ละ 98.39 ส่วนอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นเท่ากับร้อยละ 98.04 ชุดควบคุมอิฐแดง เท่ากับร้อยละ 96.80

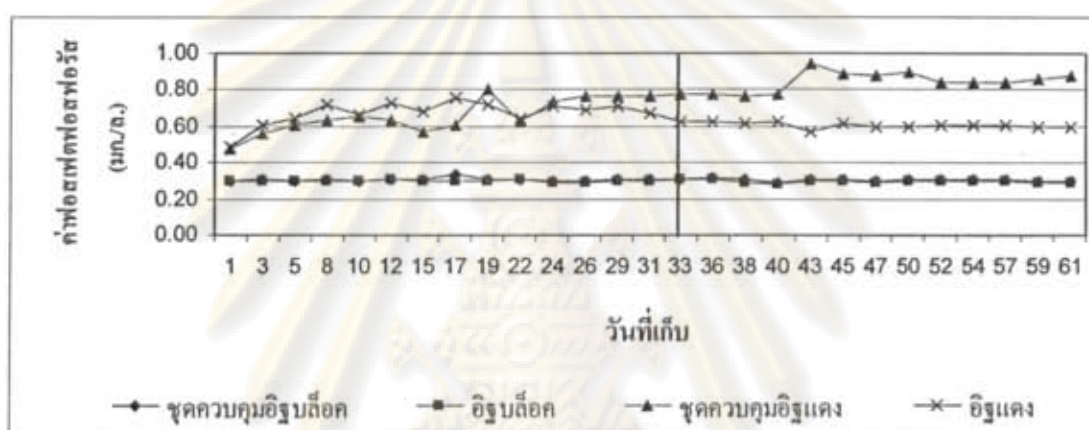


รูปที่ 4.17 ทีเคเอ็นของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

ในระบบบึงประดิษฐ์ ไนโตรเจนในน้ำเสียจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ การระเหยของ แอมโมเนีย การนำไปใช้โดยพืช รวมทั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งถือเป็น กระบวนการที่สำคัญในการกำจัดไนโตรเจน (ศักดิ์ชัย, 2547) การระเหยของแอมโมเนียเป็นกลไก สำคัญในการกำจัดไนโตรเจน เนื่องจากระบบมีค่าพีเอชค่อนข้างสูง

4.5.8 ฟอสเฟตฟอสฟอรัส

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยระหว่าง 7.6 ถึง 7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะคงตัวค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 0.28-0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีค่าระหว่าง 0.29-0.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีค่าระหว่าง 0.59-0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.61 มิลลิกรัมต่อลิตร) และชุดควบคุมอิฐแดงมีค่าระหว่าง 0.77-0.95 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.84 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.18

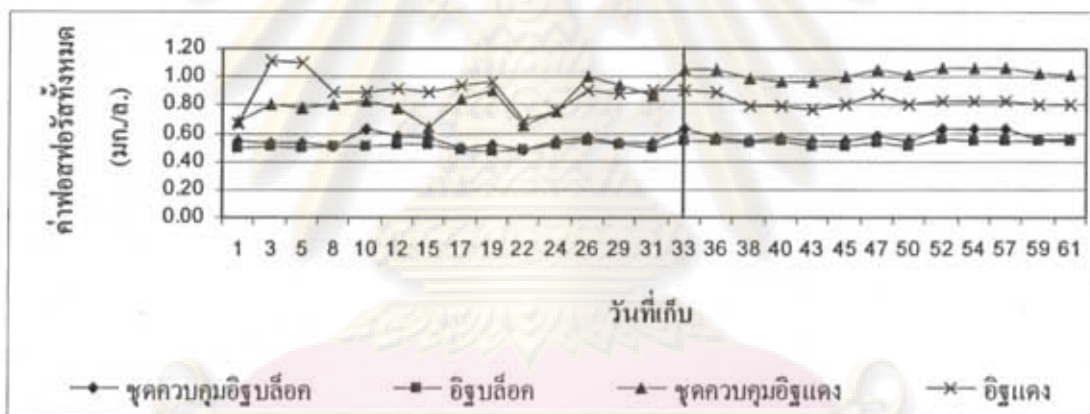


รูปที่ 4.18 ฟอสเฟตฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.9 ฟอสฟอรัสทั้งหมด

ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟอสเฟต ฟอสฟอรัส โดยพบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าฟอสฟอรัส ทั้งหมดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 93.09 และมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 0.54 มิลลิกรัม ต่อลิตร (0.50-0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าฟอสฟอรัส ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 92.39 มีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.55-0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดค่า ฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 89.53 และมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 0.82 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.77-0.91 มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดควบคุมอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดค่า ฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 86.81 มีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 1.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.97-1.07 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

4.5.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกและโอโซนแดง

การทดลองในระยะที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำตั้งแต่ วันที่ 3 ธันวาคม 2550 ถึง 1 กุมภาพันธ์ 2551 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์บึง ประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกและโอโซนแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ค่าเฉลี่ย \pm S.D.	โอโซนลิอก	%การกำจัด	โอโซนแดง	%การกำจัด	มาตรฐานน้ำทิ้ง
อุณหภูมิ	26.9 \pm 1.3	-	27.1 \pm 1.3	-	-
pH	11.7 \pm 0.3	-	7.6 \pm 0.2	-	5-9 ²
ORP	-125.2 \pm 8.2	-	8.7 \pm 7.0	-	-
SS	2.2 \pm 1.0	90.9	5.5 \pm 1.5	75.4	30 ²
COD	6.2 \pm 3.7	96.8	14.8 \pm 6.9	92.3	-
BOD	5.2 \pm 0.6	-	6.0 \pm 0.5	-	20 ²
TKN	0.7 \pm 0.0	98.6	0.9 \pm 0.0	98.0	8 ¹
PO ₄ ⁻ -P	0.3 \pm 0.0	-	0.6 \pm 0.0	-	-
TP	0.5 \pm 0.0	93.1	0.8 \pm 0.0	89.5	1 ¹

¹มาตรฐานน้ำทิ้งในสหรัฐอเมริกา (ธงชัย, 2545)

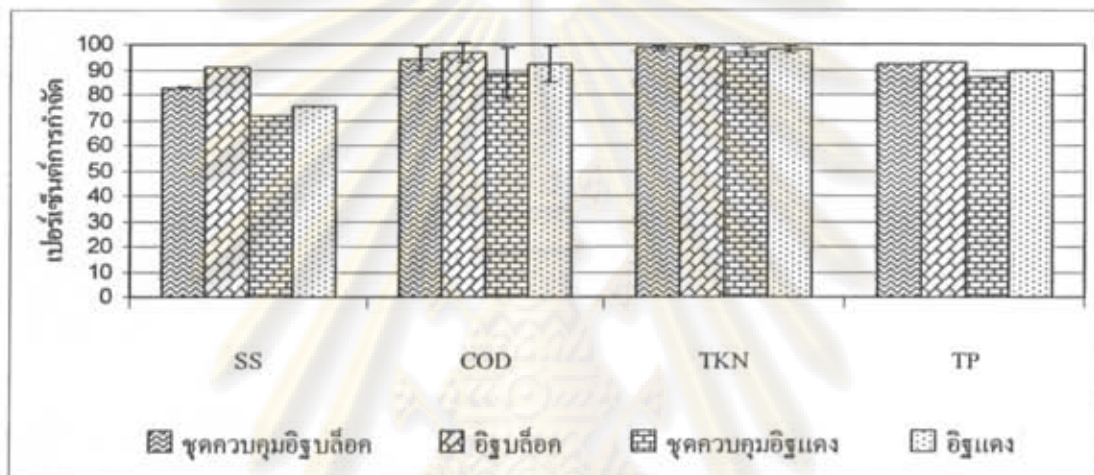
²มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนตึกคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (สันศักดิ์, 2549)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอก และโอโซนแดง พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนลิอกมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีไอดี ค่า ทีเคเอ็น และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับร้อยละ 90.90 96.78 98.62 และ 93.09 ตามลำดับ ระบบบึง ประดิษฐ์ที่ใช้โอโซนแดงมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีไอดี ค่าทีเคเอ็น และค่า ฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 75.38 92.27 98.04 และ 89.53 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสพบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 93.09 ส่วนระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 89.53

เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ปลูกพืช พบว่าชุดควบคุมอิฐบล็อกและชุดควบคุมอิฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบที่ปลูกพืช คิดเป็นร้อยละ 92.39 และ 86.81 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆก็มีแนวโน้มต่ำกว่าเช่นกัน



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก อิฐแดง และชุดควบคุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การศึกษาผลกระทบการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอโซน

จากผลการศึกษาทดลองประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางแตกต่างกัน 2 ชนิด ที่มีการปลูกพืช รวมทั้งชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืช สามารถสรุปได้ว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีมาก และบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางโอโซนก็มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดถึงร้อยละ 93.09 ซึ่งจากการทดลองยังพบว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชก็ยังคงมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 92.39 ส่วนบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางโอโซนแฉะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสร้อยละ 89.53 ซึ่งจากการทดลองยังพบว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชก็ยังคงมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 86.81 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางโอโซน และโอโซนแฉะ มาศึกษาผลกระทบการกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับโดยตัวกลาง การนำไปใช้โดยพืช รวมไปถึงการย่อยและดูดซึมโดยจุลินทรีย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 การหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของโอโซน

ในการหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส ใช้สารละลายโปแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) ซึ่งเป็นสารละลายที่แตกตัวในน้ำให้ HPO_4^{2-} , KH_2PO_4 และ PO_4^{3-} ไอออนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ทันที (Brooks และคณะ, 2000) ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นรูปแบบของฟอสฟอรัสที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และทำให้เกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำได้

จากการทดลองเตรียมโอโซนที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (ขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร) ใส่ขวดรูปชมภู 300 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0 4 8 20 40 80 160 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเข้าเครื่อง Shaker 1 ชั่วโมงได้ผลดังตารางที่ 4.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับของอิฐบล็อก

ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (C_e) (mg/l)	ความสามารถในการดูดซับ (q) (mg P/Kg)
0	0.01	0
4	1.04	92.5
8	1.53	202.19
20	2.93	533.44
40	4.55	1,107.81
80	5.28	2,335.00
160	5.46	4,829.38
320	5.45	9,829.69

จากตารางที่ 4.6 ค่าความสามารถในการดูดซับของอิฐบล็อกอยู่ในช่วง 0 ถึง 9,830 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมอิฐบล็อก ค่าการดูดซับฟอสฟอรัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

ที่อุณหภูมิห้อง 26.6 องศาเซลเซียส ปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นเท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5.05 (เท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสคงเหลือเท่ากับ 1.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7.53 ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลาง (P_{adsorb}) เท่ากับ 6.47 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลางเท่ากับ 202.19 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมอิฐบล็อก เนื่องจากน้ำหนักของอิฐบล็อกทั้งระบบเท่ากับ 23.8 กิโลกรัม ดังนั้นปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลางทั้งหมดเท่ากับ 4,812 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส

ดังนั้น ในการประมาณระยะเวลาการอิมมัตว์ต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของชั้นอิฐบล็อก ในระบบบึงประดิษฐ์ สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของอิฐบล็อกเท่ากับ 4,830 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม จากการคำนวณหลังจากเดินระบบได้ 4 ปี ชั้นอิฐบล็อกก็จะอิมมัตว์ ซึ่งระยะเวลาที่คำนวณได้นี้ สามารถใช้เป็นแค่การประมาณระยะเวลาการดูดซับโดยตัวกลางของระบบเท่านั้น เนื่องจากไม่ได้มีการพิจารณาถึงกระบวนการอื่นๆ เช่น การเจริญเติบโตของพืชฟิล์มจุลินทรีย์ และการตกตะกอนทับถมในระยะยาว ดังนั้นระยะเวลาการอิมมัตว์ของตัวกลางจริงควรจะนานกว่านี้

หลังจากทำการทดลองได้นำอิฐบล็อกไปวิเคราะห์สภาวะของธาตุโดยใช้ XRD ก็ปรากฏมีแคลเซียมอยู่ในรูป $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ในสภาวะปกติ ($7 < \text{pH} < 14$) องค์ประกอบของตัวกลางที่เป็นแคลเซียมมีความสำคัญมากต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งการดูดซับและการตกตะกอนออร์โธฟอสเฟตไอออนโดยแคลเซียมคาร์บอเนต จะเกิดได้ดีที่ค่าพีเอชสูงๆ (Zouboulis และ Prochaska, 2006) ในการทดลองระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกมีค่าพีเอชสูงอยู่ในช่วง 11.14-12.88 (ค่าเฉลี่ย 12.12) การรวมตัวกันของแคลเซียมกับฟอสเฟตเป็นกลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัส (Korkusuz และคณะ, 2007) ในการดูดซับและการตกตะกอนฟอสฟอรัส จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมกับไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ได้เป็น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ดังสมการที่ 4.1



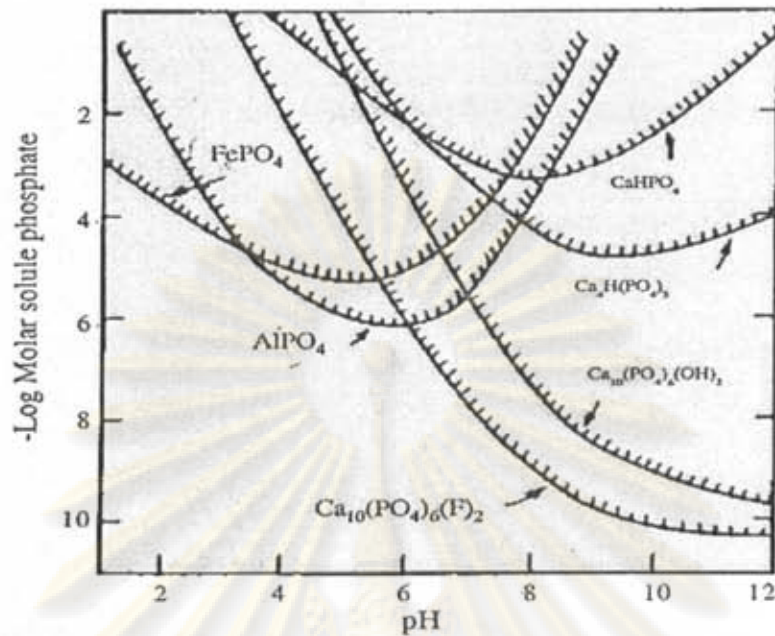
ปฏิกิริยาสามารถดำเนินต่อไปในรูปอื่นได้อีก ดังสมการที่ 4.2 องค์ประกอบที่เป็นโลหะอื่น เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส ก็สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตได้เช่นกัน (Korkusuz และคณะ, 2007)



ในการดูดซับฟอสฟอรัสกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ จะเกิดได้ดีที่ค่าพีเอชเป็นกรด และที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้นต่ำๆ (มิลลิโมล) ที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตสูงๆ และค่าพีเอชสูงจะเกิดเกลือของแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.21

จากผลการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบของอิฐบล็อกพบว่ามี CaO , Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ร้อยละ 79.99 1.39 และ 0.41 ตามลำดับ และสภาวะของน้ำที่ใช้ทดลองมีพีเอชเป็นด่าง ดังนั้นคาดว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยอิฐบล็อกน่าจะเกิดจากปริมาณ CaO

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

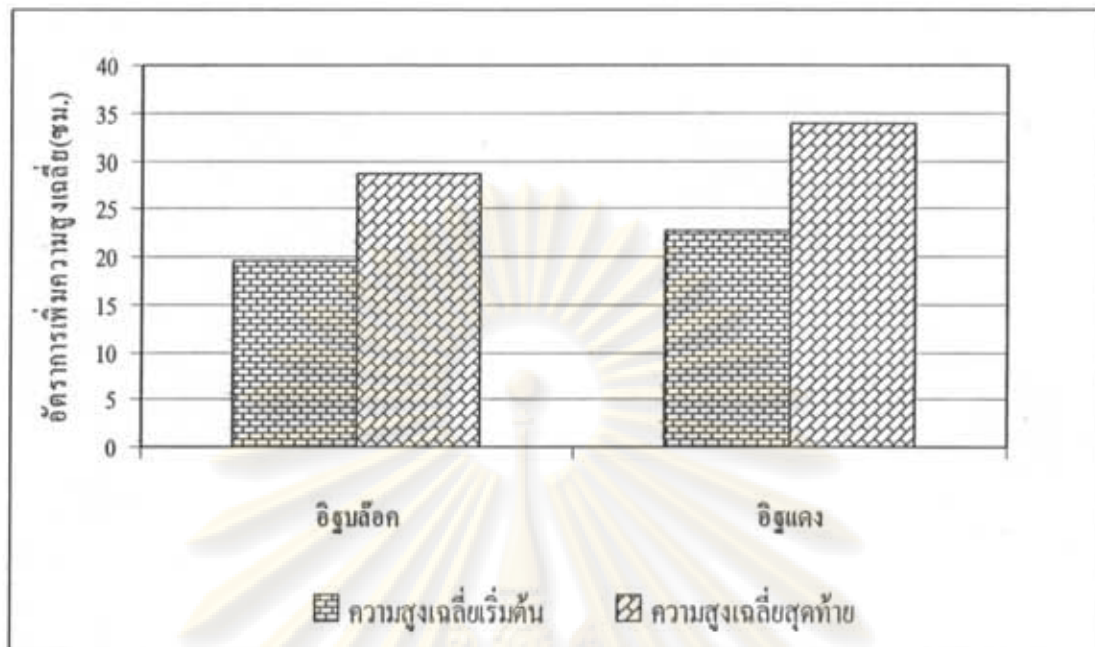


รูปที่ 4.21 ความสามารถในการละลายของโลหะฟอสเฟต
ที่มา: Zouboulis และ Prochaska, 2006

4.6.2 การหาค่าฟอสฟอรัสจากการนำไปใช้โดยพืช

การวัดอัตราการเจริญเติบโตของต้นก้ามกุ้ง ทำโดยการวัดความสูงและน้ำหนักของต้นก้ามกุ้งในตอนเริ่มต้น และในตอนท้ายของการทดลอง จากการทดลองความสูงเฉลี่ยเริ่มต้นของต้นก้ามกุ้งของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกและอิฐแดง วัด ณ วันที่ 3 ธันวาคม 2550 มีค่าเท่ากับ 19.67 และ 22.80 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ยสุดท้ายของต้นก้ามกุ้งของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกและอิฐแดง วัด ณ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2551 มีค่าเท่ากับ 28.72 และ 33.98 เซนติเมตร สรุปอัตราการเพิ่มความสูงเฉลี่ยของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อกและอิฐแดง มีค่าเท่ากับ 0.15 และ 0.18 เซนติเมตรต่อวัน แสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดงมีอัตราการเพิ่มความสูงเฉลี่ยมากกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

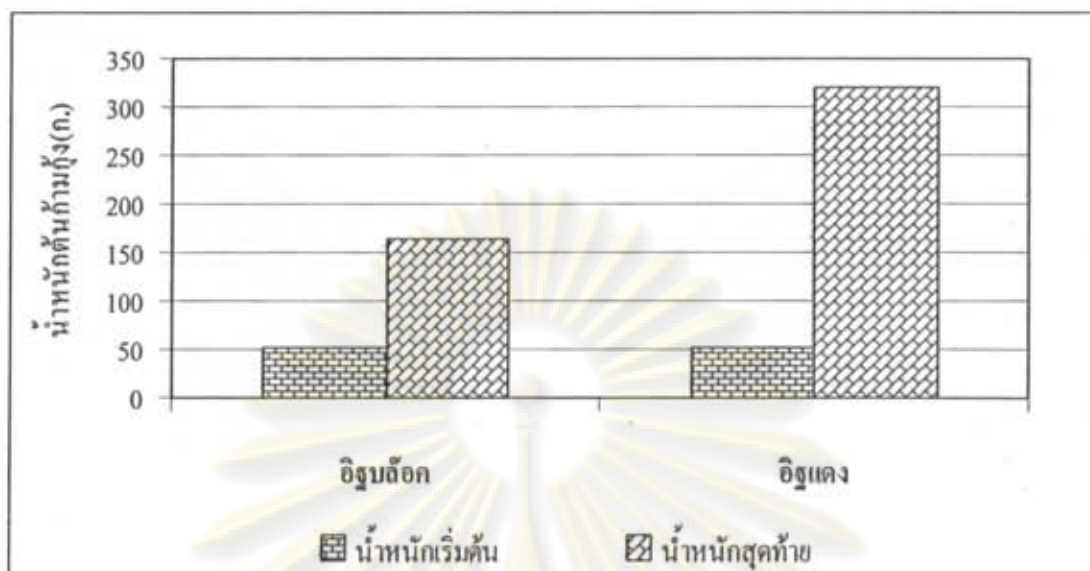


รูปที่ 4.22 ความสูงเฉลี่ยของดินก้ามกุ้ง

การวัดน้ำหนักของดินก้ามกุ้งในตอนเริ่มต้น และในตอนท้ายของการทดลอง จากการทดลองน้ำหนักเริ่มต้นของดินก้ามกุ้งจำนวน 6 ดินที่ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อีฐบลีอกและอีฐแดง ในวันที่ 3 ธันวาคม 2550 มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 50.06 และ 50.05 กรัม เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2551 ได้เก็บตัวอย่างดินก้ามกุ้งเพื่อชั่งน้ำหนักรวมหลังอบแห้งพบว่ามีความเท่ากับ 164.98 และ 319.76 กรัม น้ำหนักพืชที่เพิ่มขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อีฐบลีอกและอีฐแดง มีความเท่ากับ 1.85 และ 4.39 กรัมต่อวันตามลำดับ ดังรูปที่ 4.23

การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ โดยนำปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่เป็นชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ลบด้วยปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ปลูกพืช ซึ่งผลต่างที่ได้ก็คือปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้นั่นเอง

$$\begin{aligned}
 P_{\text{plant}} &= P_{\text{ที่ออกจากชุดควบคุม}} - P_{\text{ที่ออกจากระบบที่ปลูกพืช}} \\
 &= 424.56 - 395.28 \text{ มิลลิกรัมฟอสฟอรัส} \\
 &= 29 \text{ มิลลิกรัมฟอสฟอรัส}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.23 น้ำหนักของต้นก้ามกุ้ง

ปริมาณฟอสฟอรัสถูกนำไปใช้ในพืชโดยระบบรากและหน่อ ฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชเปลี่ยนแปลงไปตามชนิด สิ่งแวดล้อม และฤดูกาล การนำฟอสฟอรัสไปใช้โดยพืชจะสูงในฤดูกาลเจริญเติบโต (Vymazal, 2007) พืชสามารถดูดฟอสฟอรัสได้ในรูปของอนุมูลไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) และ โมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) ส่วนอนุมูลออร์โทฟอสเฟต (PO_4^{3-}) นั้นพืชไม่สามารถดูดไปใช้ได้ และมักจะตกตะกอนเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เช่นแคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมฟอสเฟตหรืออะลูมิเนียมฟอสเฟต เมื่อพืชดูดอนุมูลไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟตเข้าไปแล้วจะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่นฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate: ATP) น้ำตาลฟอสเฟต (Sugarphosphate) นิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) โคเอนไซม์ (Coenzyme) และกรดไฟติก (Phytic Acid) เป็นต้น (ศรีสม, 2544)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3 การหาค่าฟอสฟอรัสจากการย่อยสลายและดูดซึมโดยจุลินทรีย์

จากการทดลองนำตัวอย่างอิฐบดที่ความลึก 0.25, 0.35 และ 0.45 เมตร ชั่งน้ำหนักแห้งได้ 82.7 กรัม มาเข้าเครื่องอุตสาหกรรม ปริมาณน้ำที่ใส่แยกเท่ากับ 400 มิลลิลิตร ได้น้ำที่แยกออกมา มีค่า MLSS เท่ากับ 460 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า MLVSS เท่ากับ 210 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร

- การหาค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่แยกมาได้เท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้น้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตรจากทั้งหมด 100 มิลลิลิตร คิดเป็น 0.85 มิลลิกรัมต่ออิฐบด 82.7 กรัม เนื่องจากน้ำหนักอิฐบดที่ระบบเท่ากับ 23.8 กิโลกรัม ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในจุลินทรีย์เท่ากับ 245 มิลลิกรัม

- การหาค่า MLVSS เท่ากับ 210 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้น้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรจากทั้งหมด 100 มิลลิลิตร คิดเป็นมวลจุลินทรีย์ 21 มิลลิกรัมต่ออิฐบด 82.7 กรัม เนื่องจากน้ำหนักอิฐบดที่ระบบเท่ากับ 23.8 กิโลกรัม ดังนั้นมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบเท่ากับ 6,044 กรัม

- เมื่อนำปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในจุลินทรีย์เท่ากับ 245 มิลลิกรัม มาคิดเทียบกับมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบเท่ากับ 6,044 กรัม จะได้เป็นปริมาณฟอสฟอรัสต่อมวลจุลินทรีย์เท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมจุลินทรีย์

4.6.4 การทำสมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ

จากการทดลองหาปริมาณฟอสฟอรัสจากการหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของอิฐบด (P_{adsorb}) การหาค่าฟอสฟอรัสจากการนำไปใช้โดยพืช (P_{plant}) และการหาค่าฟอสฟอรัสจากการย่อยสลายและดูดซึมโดยจุลินทรีย์ (P_{microbe}) สามารถทำสมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบได้ดังรูปที่ 4.22 เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$P_{\text{influent}} = P_{\text{effluent}} + P_{\text{remove}} \quad (4.3)$$

$$P_{\text{remove}} = P_{\text{adsorb}} + P_{\text{plant}} + P_{\text{microbe}} + P_{\text{other}} \quad (4.4)$$

- โดยที่ P_{influent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบ (5,856 mg P)
 P_{effluent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (395 mg P)
 P_{remove} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (mg P)
 P_{adsorb} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ โดยอิฐบด (4,812 mg P)
 P_{plant} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ต้นก้ามกุ้งนำไปใช้ (29 mg P)
 P_{microbe} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ (245 mg P)
 P_{other} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยกลไกอื่นๆ (mg P)

แทนค่า P_{adsorb} , P_{plant} และ P_{microbe} ลงในสมการที่ 4.3 ได้

$$P_{\text{remove}} = 4,812 + 29 + 245 + P_{\text{other}}$$

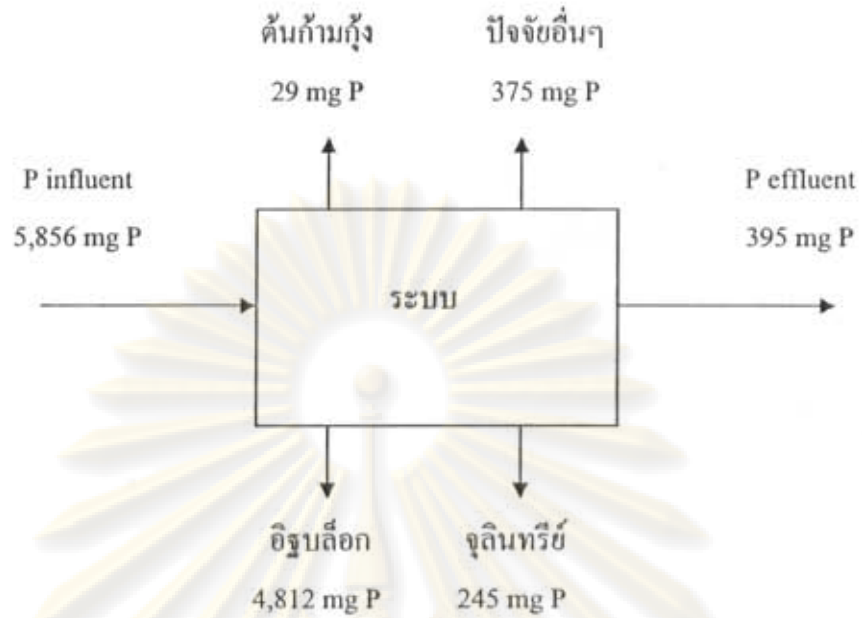
แทนค่า P_{remove} ลงในสมการที่ 4.3 ได้

$$5,856 = 395 + P_{\text{remove}} = 395 + 4,812 + 29 + 245 + P_{\text{other}}$$

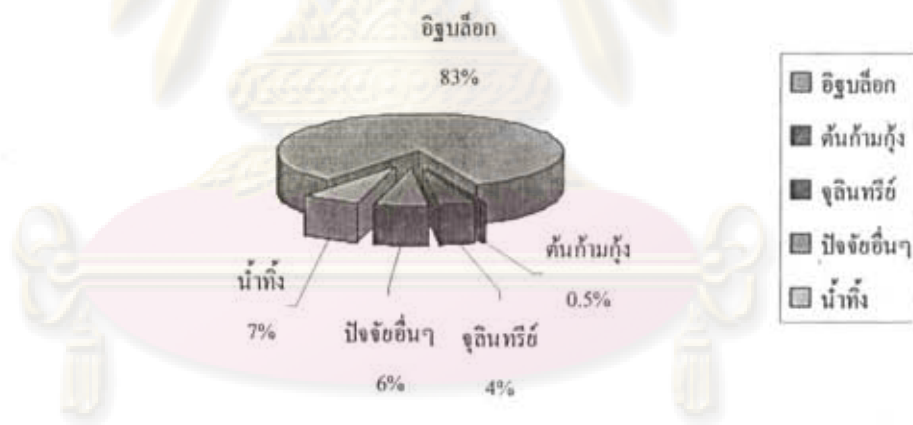
$$P_{\text{other}} = 375 \text{ mg P}$$

ปริมาณฟอสฟอรัสที่ป้อนเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ถูกกำจัดโดยกลไกการดูดซับโดยอิฐบดเท่ากับ 4,812 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 83 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ การนำไปใช้โดยต้นก้ามกุ้งเท่ากับ 29 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 0.5 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ การย่อยสลายและการดูดซึมโดยจุลินทรีย์เท่ากับ 245 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 4 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ จากปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ การตกตะกอนในระบบบึงประดิษฐ์ การดูดซับบนผิวภาชนะ ฯลฯ เท่ากับ 375 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ และปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 395 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 7 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ ดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก



รูปที่ 4.25 กราฟร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสในปัจจัยต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐบล็อก

4.7 การศึกษากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้โอฐแดง

4.7.1 การหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของโอฐแดง

จากการทดลองเตรียมโอฐแดงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (ขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร) ใส่ขวดรูปชมภู 300 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0, 4, 8, 20, 40, 80, 160 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเข้าเครื่อง Shaker 1 ชั่วโมงได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับของโอฐแดง

ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (C_e) (mg/l)	ความสามารถในการดูดซับ (q) (mg P/Kg)
0	0.01	0
4	1.34	83.13
8	1.95	190.63
20	3.74	508.13
40	5.00	1,093.75
80	5.39	2,331.56
160	5.48	4,828.75
320	5.55	9,826.56

จากตารางที่ 4.7 ค่าความสามารถในการดูดซับของโอฐแดงอยู่ในช่วง 0 ถึง 9,827 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมโอฐแดง ค่าการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่าเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูง

ที่อุณหภูมิห้อง 26.6 องศาเซลเซียส ปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นเท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5.05 (เท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสคงเหลือเท่ากับ 2.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5.84 ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลาง (P_{adsorb}) เท่ากับ 5.95 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลางเท่ากับ 190.63 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมโอฐแดง เนื่องจากน้ำหนักของโอฐแดงทั้งระบบเท่ากับ 24 กิโลกรัม ดังนั้นปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวกลางทั้งหมดเท่ากับ 4,575 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส

ดังนั้น ในการประมาณระยะเวลาการอิมมัตว์ต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของชั้นอิฐบล็อก ในระบบบึงประดิษฐ์ สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของอิฐบล็อกเท่ากับ 4,829 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม จากการคำนวณหลังจากเดินระบบได้ 4.2 ปี

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของอิฐแดงพบว่าพบว่ามี CaO , Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ร้อยละ 1.47 6.46 และ 11.41 ตามลำดับ และสารละลายมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกรด (5.84) ดังนั้นจึงคาดว่าฟอสเฟตในน้ำจะถูกกำจัดโดยการดูดซับและตกตะกอนกับ Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ในตัวกลางอิฐแดง

ในตอนท้ายการทดลองได้นำอิฐแดงไปวิเคราะห์ XRD ได้ฟอสเฟตอยู่ในรูป $\text{Fe}(\text{PO}_3)_3$, AlPO_4 และ $\text{Al}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ในการดูดซับฟอสฟอรัสกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ จะเกิดได้คือค่าพีเอชเป็นกรด และที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้นต่ำๆ (มิลลิโมล) ที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตสูงๆ และค่าพีเอชสูงจะเกิดเกลือของแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.21

4.7.2 การหาค่าฟอสฟอรัสจากการนำไปใช้โดยพืช

การวัดอัตราการเจริญเติบโตของต้นก้ามกุ้ง แสดงดังหัวข้อ 4.6.2 การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ โดยนำปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่เป็นชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ลบด้วยปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ปลูกพืช ซึ่งผลต่างที่ได้ก็คือปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้นั่นเอง

$$\begin{aligned} P_{\text{plant}} &= P_{\text{ที่ออกจาชุดควบคุม}} - P_{\text{ที่ออกจากระบบที่ปลูกพืช}} \\ &= 753.96 - 600.24 \text{ มิลลิกรัมฟอสฟอรัส} \\ &= 154 \text{ มิลลิกรัมฟอสฟอรัส} \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7.3 การหาค่าฟอสฟอรัสจากการย่อยสลายและดูดซึมโดยจุลินทรีย์

จากการทดลองนำตัวอย่างอิฐแดงที่มีความลึก 0.25, 0.35 และ 0.45 เมตร ซึ่งน้ำหนักแห้งได้ 84.7 กรัม มาเข้าเครื่องอุตสาหกรรม ปริมาณน้ำที่ใช้แยกเท่ากับ 400 มิลลิลิตร ได้น้ำที่แยกออกมามีค่า MLSS เท่ากับ 630 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า MLVSS เท่ากับ 370 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร

- การหาค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำที่แยกมาได้เท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้น้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตรจากทั้งหมด 100 มิลลิลิตร คิดเป็น 1.5 มิลลิกรัมต่ออิฐแดง 83.5 กรัม เนื่องจากน้ำหนักอิฐแดงทั้งระบบเท่ากับ 24 กิโลกรัม ดังนั้นปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมใน จุลินทรีย์ เท่ากับ 431 มิลลิกรัม

- การหาค่า MLVSS เท่ากับ 370 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้น้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรจากทั้งหมด 100 มิลลิลิตร คิดเป็นมวลจุลินทรีย์ 37 มิลลิกรัมต่ออิฐแดง 83.5 กรัม เนื่องจากน้ำหนักอิฐแดงทั้งระบบเท่ากับ 24 กิโลกรัม ดังนั้นมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบเท่ากับ 10,635 กรัม

- เมื่อนำปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในจุลินทรีย์เท่ากับ 431 มิลลิกรัม มาคิดเทียบกับมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบเท่ากับ 10,635 กรัม จะได้เป็นปริมาณฟอสฟอรัสต่อมวลจุลินทรีย์เท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมจุลินทรีย์

4.7.4 การทำสมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ

จากการทดลองหาปริมาณฟอสฟอรัสจากการหาค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของอิฐแดง (P_{adsorb}) การหาค่าฟอสฟอรัสจากการนำไปใช้โดยพืช (P_{plant}) และการหาค่าฟอสฟอรัสจากการย่อยสลายและดูดซึมโดยจุลินทรีย์ (P_{microbe}) สามารถทำสมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบ ได้ดังรูปที่ 4.22 เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.3 และ 4.4

โดยที่ P_{influent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบ (5,856 mg P)

P_{effluent} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบ (600 mg P)

P_{remove} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (mg P)

P_{adsorb} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยอิฐแดง (4,575 mg P)

P_{plant} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ต้นก้ามกุ้งนำไปใช้ (154 mg P)

P_{microbe} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ (431 mg P)

P_{other} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดโดยกลไกอื่นๆ (mg P)

แทนค่า P_{adsorb} , P_{plant} และ P_{microbe} ลงในสมการที่ 4.3 ได้

$$P_{\text{remove}} = 4,575 + 154 + 431 + P_{\text{other}}$$

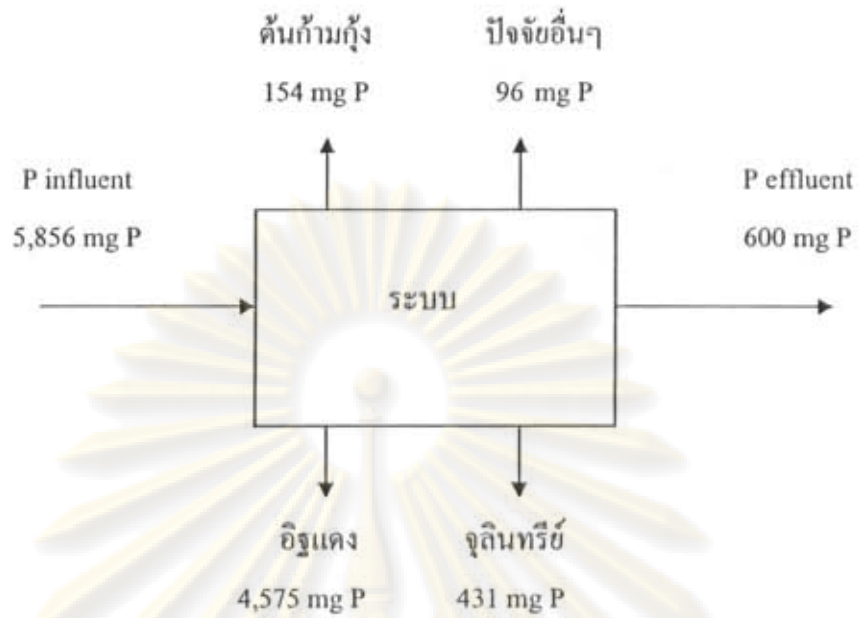
แทนค่า P_{remove} ลงในสมการที่ 4.3 ได้

$$5,856 = 600 + P_{\text{remove}} = 600 + 4,575 + 154 + 431 + P_{\text{other}}$$

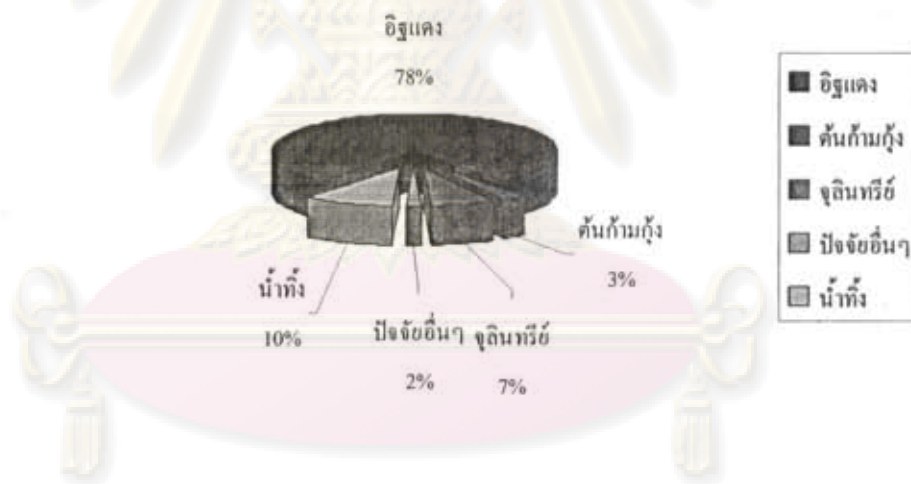
$$P_{\text{other}} = 96 \text{ mg P}$$

ปริมาณฟอสฟอรัสที่ป้อนเข้าระบบเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ถูกกำจัดโดยกลไกการดูดซับโดยอิฐแดงเท่ากับ 4,575 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 78 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ การนำไปใช้โดยต้นก้ามกุ้งเท่ากับ 154 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 3 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ การย่อยสลายและการดูดซึมโดยจุลินทรีย์เท่ากับ 431 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 7 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ จากปัจจัยอื่นๆได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับที่ผิวภาชนะ ฯลฯ เท่ากับ 96 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 2 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ และปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 600 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าระบบ ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐแดง



รูปที่ 4.27 กราฟร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสในปัจจัยต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางอิฐแดง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินเกล็ด อีฐแดง เปลือกหอยและอีฐบล็อก ที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะทุก 2 ชั่วโมงที่ค่าอัตราภาระชลศาสตร์ 5 เซนติเมตรต่อวัน พบว่าทุกตัวกลางมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดี โดยสามารถกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมด ได้สูงอยู่ระหว่างร้อยละ 83.07-95.09 91.36-95.23 97.76-98.58 และ82.83-95.04 ตามลำดับ โดยพบว่าระบบที่ใช้ตัวกลางอีฐบล็อกและอีฐแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 95.04 และ94.25 ตามลำดับ

2. ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางอีฐบล็อก ที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่อัตราภาระชลศาสตร์ 5 เซนติเมตรต่อวัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเฉลี่ยร้อยละ 93.09 และใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดี โดยสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีเคเอ็น ได้สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 90.90 96.78 และ98.62 ตามลำดับ น้ำทิ้งที่ผ่านระบบมีค่าได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งโดยมีค่าของแข็งแขวนลอย ซีโอดี บีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 2.15 6.15 0.60 0.65 และ0.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3. ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางอีฐแดง ที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่ค่าอัตราภาระชลศาสตร์ 5 เซนติเมตรต่อวัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกำจัดได้ร้อยละ 89.53 และสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีเคเอ็น ได้ร้อยละ 75.38 92.27 และ98.04 ตามลำดับ น้ำทิ้งที่ผ่านระบบมีค่าได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งโดยมีค่าของแข็งแขวนลอย ซีโอดี บีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 5.54 14.77 1.20 0.93 และ0.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางอิฐบดบล็อก พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยใช้กลไกการดูดซับและตกตะกอนบนตัวกลางอิฐบดบล็อกสูงถึงร้อยละ 83 โดยใช้กลไกการดูดซับบนตัวกลาง นอกจากนี้ฟอสฟอรัสบางส่วนถูกใช้ในกระบวนการสะสมตัวทางชีวภาพ (Bioaccumulation) โดยสะสมในพืชและจุลินทรีย์ในระบบคิดเป็นร้อยละ 0.5 และ 4 ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบเท่ากับ 395 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 6 ส่วนที่เหลืออื่นๆ อาจเกิดการตกตะกอนในระบบ หรือการดูดซับบนผิวภาชนะ เป็นต้น

5. กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางอิฐแดง พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5,856 มิลลิกรัม ส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยใช้กลไกการดูดซับและตกตะกอนบนตัวกลางอิฐแดงเฉลี่ยร้อยละ 78 โดยใช้กลไกการดูดซับบนตัวกลาง นอกจากนี้ฟอสฟอรัสบางส่วนถูกใช้ในกระบวนการสะสมตัวทางชีวภาพ (Bioaccumulation) โดยสะสมในพืชและจุลินทรีย์ในระบบคิดเป็นร้อยละ 3 และ 7 ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกจากระบบเท่ากับ 600 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 10 ส่วนที่เหลืออื่นๆ อาจเกิดการตกตะกอนในระบบ หรือการดูดซับบนผิวภาชนะ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส โดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง
2. ศึกษากระบวนการบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้ง และระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวนอนในการกำจัดธาตุอาหาร
3. ศึกษาการใช้ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งที่มีตัวกลางอื่นๆ ที่เป็นของเสียจากสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งเป็นแนวทางในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สยามสเตรชเน็ทส์พลาซัส, 2539.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 4. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, 2543.
- ธงชัย พรหมสวัสดิ์. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545.
- มันสิน คัมจุลเวศม์. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน คัมจุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- วัชรินทร์ คัญจัญญ์ และไพสิฐ กาญจนสุนทร. การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพในถังแอโรบิก-แอนน็อกซิกโดยจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตแบบเกาะติด. ปริญญาทิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต, 2543
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. ระบบบำบัดน้ำเสีย. สำนักพิมพ์ท้อป, 2549
- ศักดิ์ชัย อังคสิงห์. การบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ศรีสม สุวรรณวงศ์. การวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544
- ศุภา กานตวนิชกูร. การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined Constructed Wetland ในเขตอากาศร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.
- อนุพันธ์ อีจัวร์น และคณะ. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545.

ภาษาอังกฤษ

- Arias C.A., Del B.M. and Brix H., 2001. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. Water Research. 35 : 1159-1168.
- Adam K., Kogstad T., Vrale L., Sovik A.K. and Jenssen P.D., 2007. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P-Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. Ecological Engineering. 29 : 200-208.

- Blake G.R. and Hartge K.H., 1986. Bulk Density, Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods. in A. Klute, ed., Agronomy Monograph. 9 (2nd Ed.): 363-375.
- Brix H., 1997. Do macrophytes play a role in constructed wetlands?. Water Science and Technology. 35(5): 11-17.
- Brix H. and Arias C.A., 2005. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. Ecological Engineering. 25 : 491-500.
- Brooks A.S., Rozenwald M.N., Geohring L.D., Lion L.W. and Steenhuis T.S., 2000. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate. Ecological Engineering. 15 : 121-132.
- Cooper P.E. and Boon A.G., 1987. Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Dunne E., Culleton N., Donovan G.O' and Harrington R., 2005. Phosphorus Retention and Sorption by Constructed Wetland Soils. Agriculture and Food Development Authority.
- Gray N.F., 1989. Biological of Wastewater Treatment. Trinity College University of Dublin, Oxford University Press.
- Hammer D.E. and Kadlec R.H., 1983. Design Principals for Wetlands Treatment System. University of Michigan, National Technical Information Service, Oklahma, U.S.A.
- Heal K.V., Dobbie K.E., Bozika E., McHaffie H., Simpson A.E. and Smith K.A., 2005. Enhancing phosphorus removal in constructed wetlands with ochre from mine drainage treatment. Water Science and Technology. 51 : 275-282.
- Holland J.F., Martin J.F., Granata T., Bouchard V., Quigley M. and Brown L., 2004. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. Ecological Engineering. 23 : 189-203.
- Kadlec R.H., 1987. Nutrient Dynamics of Wetland. In Reddy, K.R. and Smith, W.H.(eds). Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Kadlec R.H. and Knight R.L., 1996. Treatment Wetlands. CRC Press Inc.
- Kessomboon S., 1990. Piggery Wastewater Treatment by Aquatic Plant System. Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Korkusuz E.A., Beklioglu M. and Demirer G.N., 2005. Comparision of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands

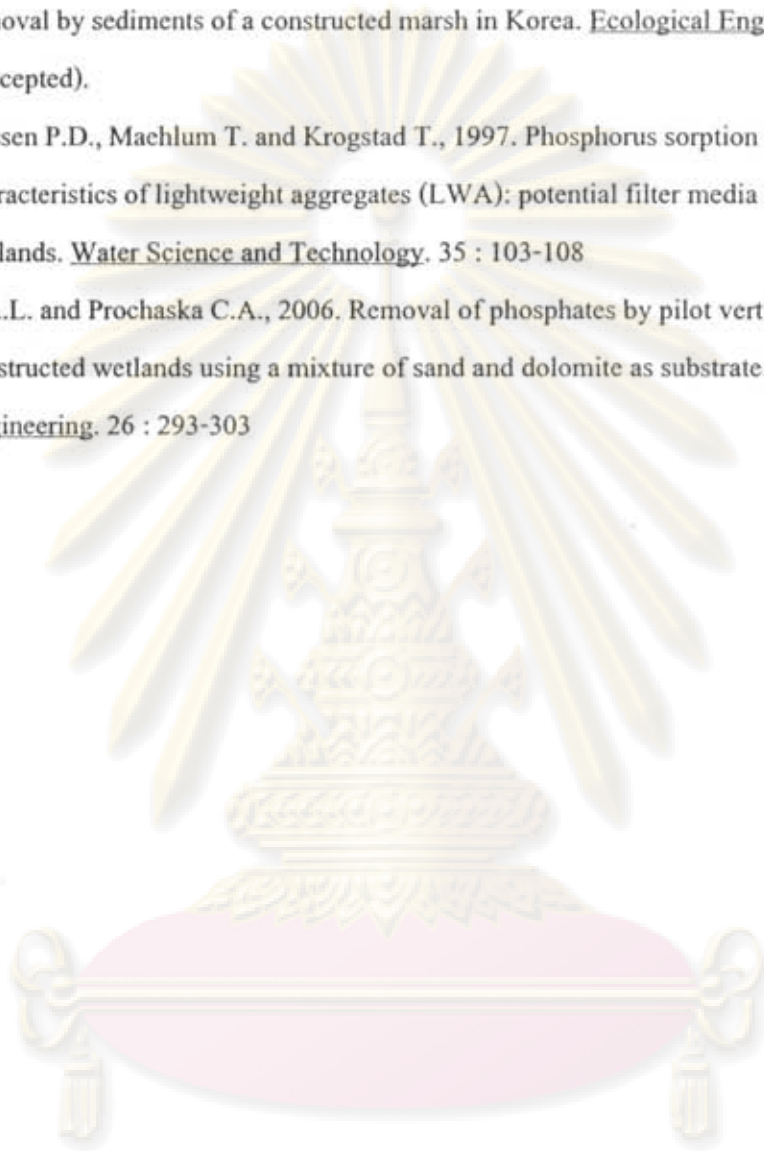
- operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey. Ecological Engineering. 24 : 187-200.
- Korkusuz E.A., Beklioglu M. and Demirer G.N., 2007. Use of blast furnace granulated slag as a substrate in vertical flow reed beds: Field application. Bioresource Technology. 98 : 2089-2101
- Molle P., Lienard A., Grasmick A. and Iwema A., 2003. Phosphorus retention in subsurface constructed wetlands: investigations focused on calcareous material and their chemical reactions. Water Science and Technology. 48 : 75-83.
- Molle P., Lienard A., Grasmick A. and Iwema A., 2006. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. Water Research. 40 : 606-612.
- Reddy K.R. and Debusk W.F., 1987. Nutrient Storage Capabilities of Aquatic and Wetland Plant. In Reddy, K.R. and Smith W.H.(eds). Aquatic Plant for Wastewater Treatment and Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Reed S.C. and Brown D., 1992. Constructed Wetland Design-The First Generation. Water Environmental Research. 64(6): 776-781
- Reed S.C., Middlebrook E.J. and Crites R.W., 1988. Natural System for Waste Management and Treatment. New York: McGraw-Hill Book.
- Roger F.G.L., Roger K.H. and Buzer J.S., 1985. Wetlands for Wastewater Treatment. Witwatersard University Press, Johannesburg, South Africa.
- Sakadevan K. and Bavor H.J., 1998. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. Water Research. 32 : 393-399.
- Tchobanoglous G., Burton F.L. and Stensel H.D., 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Metcalf and Eddy, Mcgraw Hill, International Edition.
- Thayalakumaran N., 1994. Application of Constructed Wetland to the Treatment of a Heavy Metal Wastewater. Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Tsagarakis K.P., Mara D.D. and Aggelakis A.N., 2003. Applications of cost criteria for selection of municipal wastewater system. Water Air and Soil Pollution Control. 142 : 187-210.
- Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M.B. and Harberl R., 1998. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. London: Backhuys Publishers.

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

Yoo J.H., Ro H.M., Choi W.J., Yoo S.H. and Han K.H., 2006. Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in Korea. Ecological Engineering. (Accepted).

Zhu T., Jenssen P.D., Machlum T. and Krogstad T., 1997. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA): potential filter media in treatment wetlands. Water Science and Technology. 35 : 103-108

Zouboulis A.L. and Prochaska C.A., 2006. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. Ecological Engineering. 26 : 293-303



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินกลัด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	22.9	22.7	22.5	22.5
2	27/12/2549	24.5	24.5	24.5	24.5
3	29/12/2549	27.5	27.1	27	27.1
4	1/1/2550	27.9	27.7	27.5	27.5
5	1/3/2550	28.7	28.7	28.5	28.5
6	1/5/2550	27.9	27.5	27.2	27.2
7	1/8/2550	28.2	28	28	28
8	1/10/2550	27.9	27.9	27.5	27.9
9	1/12/2550	28.7	28.5	28.2	28.2
10	15/1/2550	29	28.7	28.2	28.5
11	17/1/2550	29.2	29.2	29	29
12	19/1/2550	28	28	27.9	28
13	22/1/2550	28.1	28	27.9	27.9
14	24/1/2550	28.7	28.5	28.5	28.5
15	26/1/2550	29.5	29.1	29	29.1
16	29/1/2550	28	27.9	27.7	27.9
17	31/1/2550	27.7	27.7	27.5	27.5
	เฉลี่ย	28.46	28.34	28.21	28.27

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าพีเอชของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	7.6	7.77	7.78	10.56
2	27/12/2549	8.78	8.9	8.94	10.16
3	29/12/2549	8.47	8.48	8.47	9.81
4	1/1/2550	7.62	8.16	8.51	9.67
5	1/3/2550	8.44	8.44	8.45	9.75
6	1/5/2550	7.81	8.45	8.68	9.5
7	1/8/2550	7.42	8.5	8.65	9.39
8	1/10/2550	6.85	8.03	8.65	9.19
9	1/12/2550	7.81	8.48	8.47	9.34
10	15/1/2550	7.9	8.68	8.48	9.32
11	17/1/2550	6.97	8.45	8.49	9.35
12	19/1/2550	7.23	8.48	8.63	9.48
13	22/1/2550	7.15	8.56	8.59	9.45
14	24/1/2550	7.8	8.47	8.47	9.48
15	26/1/2550	7.27	7.45	7.39	9.48
16	29/1/2550	7.82	8.07	7.79	9.39
17	31/1/2550	8.15	8.82	8.85	9.32
	เฉลี่ย	7.48	8.33	8.32	9.42

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าไออาร์พี (mV) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินกลัด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	5.3	3.9	3.3	-157.1
2	27/12/2549	-48.1	-56.1	-63.9	-124.1
3	29/12/2549	-36.3	-37.1	-36.9	-116.7
4	1/1/2550	5.8	-23.3	-29.3	-84.4
5	1/3/2550	-35.9	-35.9	-37.9	-113.1
6	1/5/2550	11.6	-37.1	-41.3	-99.7
7	1/8/2550	16.1	-39.3	-41.1	-97.6
8	1/10/2550	46.8	-11	-43.1	-88.1
9	1/12/2550	11.6	-37.3	-36.3	-95.1
10	15/1/2550	-8.3	-46.1	-38.1	-93.9
11	17/1/2550	44.1	-36.7	-39.9	-95.7
12	19/1/2550	19.1	-39.1	-40.7	-100.8
13	22/1/2550	31	-36.1	-37.5	-100.1
14	24/1/2550	12.1	-36.1	-36.1	-100.9
15	26/1/2550	20.7	11.1	18	-100.9
16	29/1/2550	11.9	3.1	2.9	-97.7
17	31/1/2550	-23.1	-54.3	-59.3	-94.1
	เฉลี่ย	16.54	-26.87	-27.51	-98.60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินกลิ้ง	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	3	1	4	1
2	27/12/2549	3	1	3	1
3	29/12/2549	7	7	8	1
4	1/1/2550	2	2	1	1
5	1/3/2550	3	3	1	1
6	1/5/2550	6	3	3	2
7	1/8/2550	6	3	2	1
8	1/10/2550	2	3	5	1
9	1/12/2550	5	2	4	2
10	15/1/2550	7	2	3	1
11	17/1/2550	4	2	2	1
12	19/1/2550	3	1	2	1
13	22/1/2550	5	2	2	1
14	24/1/2550	5	3	3	2
15	26/1/2550	3	2	3	1
16	29/1/2550	4	3	3	1
17	31/1/2550	3	2	2	1
	เฉลี่ย	3.86	2.14	2.43	1.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าซีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินกลัด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	48.67	37.44	26.21	48.67
2	27/12/2549	24.24	7.27	16.97	24.24
3	29/12/2549	28.57	35.71	11.90	35.71
4	1/1/2550	26.79	14.29	8.93	8.93
5	1/3/2550	28.57	42.86	28.57	28.57
6	1/5/2550	18.47	12.31	18.47	7.696
7	1/8/2550	18.47	7.696	12.31	7.696
8	1/10/2550	7.696	7.696	12.31	7.696
9	1/12/2550	35.71	28.57	48.67	26.79
10	15/1/2550	28.57	8.93	12.31	7.696
11	17/1/2550	18.47	14.29	18.47	12.31
12	19/1/2550	14.29	12.31	14.29	8.93
13	22/1/2550	14.29	11.90	12.31	8.83
14	24/1/2550	18.47	14.29	11.90	7.27
15	26/1/2550	18.47	14.29	12.31	8.93
16	29/1/2550	14.29	11.90	12.31	8.93
17	31/1/2550	14.29	12.31	11.90	7.27
	เฉลี่ย	16.08	13.04	13.36	8.92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 แสดงค่าบีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	5.4	5.6	7.6	5.3
2	1/8/2550	4.8	2.8	7.3	4.2
3	22/1/2550	6.4	6.3	7	6.5
4	31/1/2550	6.3	5.4	7.3	5.3
	เฉลี่ย	6.35	5.85	7.15	5.90

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าทีเคเอ็น (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบล็อก
1	25/12/2549	0.55	0.80	0.91	0.85
2	1/8/2550	1.13	0.78	0.80	0.89
3	22/1/2550	1.22	0.82	0.95	0.83
4	5/2/2550	0.91	0.63	0.86	0.80
	เฉลี่ย	1.06	0.73	0.90	0.82

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 แสดงค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินกลิ้ง	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบด
1	25/12/2549	0.73	0.32	0.60	0.24
2	27/12/2549	1.10	0.36	0.64	0.23
3	29/12/2549	0.50	0.23	0.52	0.23
4	1/1/2550	1.46	0.45	0.51	0.34
5	1/3/2550	1.52	0.40	0.60	0.25
6	1/5/2550	1.52	0.36	0.52	0.24
7	1/8/2550	1.66	0.36	0.51	0.23
8	1/10/2550	1.80	0.33	0.40	0.24
9	1/12/2550	1.34	0.33	0.44	0.31
10	15/1/2550	0.93	0.38	0.45	0.31
11	17/1/2550	1.35	0.35	0.37	0.24
12	19/1/2550	1.17	0.30	0.43	0.23
13	22/1/2550	1.25	0.32	0.38	0.24
14	24/1/2550	1.26	0.35	0.39	0.30
15	26/1/2550	1.00	0.33	0.38	0.30
16	29/1/2550	1.02	0.35	0.44	0.32
17	31/1/2550	1.02	0.32	0.36	0.31
	เฉลี่ย	1.15	0.33	0.39	0.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 แสดงค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.) ของระบบในระยะเวลาที่ 1

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		หินเกล็ด	อิฐแดง	เปลือกหอย	อิฐบด
1	25/12/2549	0.74	0.53	0.69	0.84
2	27/12/2549	1.13	0.51	0.80	0.84
3	29/12/2549	1.47	0.40	0.79	0.32
4	1/1/2550	1.72	0.90	1.19	0.37
5	1/3/2550	1.79	0.53	0.90	0.48
6	1/5/2550	1.79	0.53	0.91	0.48
7	1/8/2550	1.79	0.56	0.91	0.37
8	1/10/2550	1.39	0.49	0.52	0.39
9	1/12/2550	1.53	0.53	0.78	0.40
10	15/1/2550	1.63	0.47	0.77	0.36
11	17/1/2550	1.85	0.52	0.94	0.35
12	19/1/2550	1.50	0.43	0.85	0.35
13	22/1/2550	1.48	0.42	0.54	0.37
14	24/1/2550	1.54	0.54	0.84	0.46
15	26/1/2550	1.10	0.43	0.83	0.40
16	29/1/2550	1.21	0.55	0.78	0.40
17	31/1/2550	1.21	0.43	0.46	0.42
	เฉลี่ย	1.41	0.47	0.75	0.40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 แสดงค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	27.3	27.0	27.3	27.3
2	12/5/2550	27.3	27.0	27.5	27.5
3	12/7/2550	27.0	26.5	27.0	27.1
4	12/10/2550	27.0	26.8	27.5	27.5
5	12/12/2550	28.5	28.5	28.7	28.7
6	14/12/2550	28.0	27.9	28.0	28.0
7	17/12/2550	28.2	28.0	28.5	28.5
8	19/12/2550	28.5	28.5	28.7	28.9
9	21/12/2550	29.7	29.5	29.7	29.9
10	24/12/2550	28.0	27.9	28.0	28.0
11	26/12/2550	28.0	28.0	28.0	28.0
12	28/12/2550	28.0	27.9	28.0	28.1
13	31/12/2550	25.0	25.0	25.0	25.0
14	1/2/2551	24.0	24.0	24.0	24.0
15	1/4/2551	24.5	24.5	24.5	24.5
16	1/7/2551	26.0	25.8	26.0	26.0
17	1/9/2551	28.0	27.8	27.9	28.0
18	1/11/2551	27.5	27.5	27.5	27.7
19	14/1/2551	27.0	27.0	27.1	27.1
20	16/1/2551	25.5	25.5	26.0	26.0
21	18/1/2551	26.0	26.0	26.0	26.0
22	21/1/2551	28.1	28.0	28.1	28.1
23	23/1/2551	26.0	25.8	26.0	26.0
24	25/1/2551	27.1	27.0	27.2	27.2
25	28/1/2551	29.0	28.9	29.0	29.0
26	30/1/2551	28.0	27.9	28.0	28.0
27	2/1/2551	28.0	28.0	28.0	28.0
	เฉลี่ย	26.98	26.90	27.02	27.05

ตารางที่ ก.11 แสดงค่าพีเอชของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		จุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	จุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	12.26	12.76	8.27	8.20
2	12/5/2550	12.39	12.88	8.18	7.74
3	12/7/2550	12.34	12.76	7.13	7.67
4	12/10/2550	12.21	12.72	7.26	7.56
5	12/12/2550	12.24	12.65	7.65	7.64
6	14/12/2550	12.18	12.56	7.65	7.59
7	17/12/2550	12.10	12.50	7.72	7.57
8	19/12/2550	12.04	12.52	7.53	7.49
9	21/12/2550	12.01	12.50	7.57	7.43
10	24/12/2550	11.75	12.33	7.43	7.42
11	26/12/2550	11.75	12.33	7.29	7.28
12	28/12/2550	11.55	12.25	7.70	7.44
13	31/12/2550	11.43	12.10	7.50	7.36
14	1/2/2551	11.41	12.12	7.41	7.38
15	1/4/2551	11.20	12.00	7.28	7.33
16	1/7/2551	11.07	12.00	7.26	7.61
17	1/9/2551	11.09	11.91	7.22	7.69
18	1/11/2551	11.01	11.83	7.29	7.63
19	14/1/2551	11.01	11.82	7.34	7.52
20	16/1/2551	10.93	11.90	7.37	7.62
21	18/1/2551	10.90	11.82	7.27	7.51
22	21/1/2551	10.85	11.83	6.96	7.46
23	23/1/2551	10.62	11.71	7.02	7.84
24	25/1/2551	10.50	11.71	7.45	7.69
25	28/1/2551	9.75	11.50	7.15	7.46
26	30/1/2551	9.60	11.14	7.34	7.56
27	2/1/2551	9.47	11.14	7.25	7.25
	เฉลี่ย	10.62	11.72	7.25	7.55

ตารางที่ ก.12 แสดงค่าไออาร์พี (mV) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	-7.6	-34.6	206.1	210.3
2	12/5/2550	-14.7	-41.8	211.0	224.2
3	12/7/2550	-12.1	-35.3	267.0	237.8
4	12/10/2550	-7.3	-34.3	260.3	243.9
5	12/12/2550	-8.0	-30.3	239.3	239.8
6	14/12/2550	-6.1	-26.5	239.4	242.2
7	17/12/2550	-3.8	-23.9	236.0	243.7
8	19/12/2550	0.3	-25.0	246.1	247.8
9	21/12/2550	2.4	-23.4	243.7	250.7
10	24/12/2550	14.5	-15.6	251.3	251.2
11	26/12/2550	15.6	-16.1	258.9	259.2
12	28/12/2550	26.5	-12.1	238.2	250.6
13	31/12/2550	30.7	-6.4	246.9	254.4
14	1/2/2551	32.3	-7.1	251.9	253.1
15	1/4/2551	42.6	-2.1	258.6	256.0
16	1/7/2551	47.5	-3.0	261.1	240.3
17	1/9/2551	45.9	-0.2	261.4	235.2
18	1/11/2551	45.8	8.9	255.3	237.4
19	14/1/2551	58.3	4.3	252.6	242.7
20	16/1/2551	59.7	8.3	251.2	237.6
21	18/1/2551	59.8	11.0	255.7	243.7
22	21/1/2551	61.1	15.0	273.1	245.8
23	23/1/2551	61.5	40.7	268.7	246.5
24	25/1/2551	60.5	40.9	248.3	235.7
25	28/1/2551	60.4	45.0	263.7	247.3
26	30/1/2551	60.9	45.3	253.7	241.9
27	2/1/2551	65.3	47.9	258.1	257.3
	เฉลี่ย	-88.68	-125.19	23.58	8.65

ตารางที่ ก.13 แสดงค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	14	11	21	26
2	12/5/2550	14	7	25	18
3	12/7/2550	19	7	21	12
4	12/10/2550	22	3	33	14
5	12/12/2550	7	6	9	6
6	14/12/2550	8	4	18	8
7	17/12/2550	11	9	23	24
8	19/12/2550	8	5	11	13
9	21/12/2550	5	2	8	10
10	24/12/2550	9	7	10	12
11	26/12/2550	4	1	7	11
12	28/12/2550	5	4	6	10
13	31/12/2550	2	1	5	6
14	1/2/2551	5	3	7	14
15	1/4/2551	4	2	9	8
16	1/7/2551	3	1	8	5
17	1/9/2551	4	2	8	5
18	1/11/2551	5	1	6	4
19	14/1/2551	5	3	9	8
20	16/1/2551	4	2	9	5
21	18/1/2551	3	3	6	5
22	21/1/2551	3	2	9	7
23	23/1/2551	2	1	5	3
24	25/1/2551	5	3	6	6
25	28/1/2551	5	4	7	6
26	30/1/2551	3	3	5	5
27	2/1/2551	4	1	5	5
	เฉลี่ย	3.85	2.15	7.08	5.54

ตารางที่ ก.14 แสดงค่าซีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะเวลาที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	26.67	21.33	42.67	32.00
2	12/5/2550	42.67	32.00	48.00	42.67
3	12/7/2550	32.00	21.33	42.67	42.67
4	12/10/2550	10.67	5.33	26.67	16.00
5	12/12/2550	10.67	5.33	21.33	16.00
6	14/12/2550	10.67	5.33	16.00	21.33
7	17/12/2550	32.00	16.00	42.67	37.33
8	19/12/2550	32.00	10.67	26.67	21.33
9	21/12/2550	37.33	21.33	53.33	37.33
10	24/12/2550	21.33	16.00	42.67	26.67
11	26/12/2550	16.00	10.67	42.67	32.00
12	28/12/2550	16.00	5.33	42.67	26.67
13	31/12/2550	21.33	10.67	37.33	32.00
14	1/2/2551	10.67	5.33	32.00	26.67
15	1/4/2551	16.00	10.67	32.00	21.33
16	1/7/2551	16.00	10.67	26.67	21.33
17	1/9/2551	16.00	10.67	26.67	21.33
18	1/11/2551	16.00	10.67	37.33	21.33
19	14/1/2551	16.00	5.33	32.00	26.67
20	16/1/2551	10.67	5.33	32.00	16.00
21	18/1/2551	10.67	5.33	16.00	10.67
22	21/1/2551	10.67	5.33	16.00	10.67
23	23/1/2551	5.33	5.33	16.00	10.67
24	25/1/2551	5.33	0.00	5.33	5.33
25	28/1/2551	5.33	0.00	10.67	5.33
26	30/1/2551	5.33	5.33	16.00	10.67
27	2/1/2551	5.33	5.33	16.00	10.67
	เฉลี่ย	10.67	6.15	21.74	14.77

ตารางที่ ก.15 แสดงค่าบีไอดี (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบด	อิฐบด	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	1.30	1.20	1.90	1.80
2	17/12/2550	1.10	1.10	1.80	1.30
3	31/12/2550	1.10	1.10	1.80	1.30
4	14/1/2551	1.10	0.60	1.90	1.30
5	28/1/2551	0.60	0.60	1.30	1.10
	เฉลี่ย	0.85	0.60	1.60	1.20

ตารางที่ ก.16 แสดงค่าทีเคเอ็น (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบด	อิฐบด	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	6.63	4.39	3.83	2.43
2	17/12/2550	6.91	4.67	3.27	2.15
3	31/12/2550	1.87	1.87	1.12	1.12
4	14/1/2551	0.75	0.65	1.12	0.93
5	28/1/2551	0.75	0.65	1.87	0.93
	เฉลี่ย	0.75	0.65	1.50	0.93

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.17 แสดงค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		จุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	จุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	0.30	0.30	0.47	0.48
2	12/5/2550	0.31	0.30	0.56	0.61
3	12/7/2550	0.30	0.30	0.60	0.64
4	12/10/2550	0.31	0.30	0.64	0.72
5	12/12/2550	0.30	0.30	0.65	0.66
6	14/12/2550	0.31	0.30	0.64	0.73
7	17/12/2550	0.30	0.30	0.57	0.69
8	19/12/2550	0.33	0.30	0.60	0.76
9	21/12/2550	0.31	0.30	0.80	0.72
10	24/12/2550	0.31	0.31	0.63	0.65
11	26/12/2550	0.30	0.29	0.74	0.71
12	28/12/2550	0.30	0.29	0.76	0.69
13	31/12/2550	0.31	0.30	0.76	0.71
14	1/2/2551	0.31	0.30	0.76	0.67
15	1/4/2551	0.31	0.31	0.77	0.63
16	1/7/2551	0.32	0.30	0.78	0.63
17	1/9/2551	0.31	0.29	0.77	0.62
18	1/11/2551	0.29	0.28	0.78	0.63
19	14/1/2551	0.31	0.30	0.95	0.57
20	16/1/2551	0.31	0.30	0.89	0.62
21	18/1/2551	0.30	0.29	0.88	0.60
22	21/1/2551	0.30	0.30	0.90	0.59
23	23/1/2551	0.30	0.30	0.84	0.61
24	25/1/2551	0.30	0.30	0.84	0.61
25	28/1/2551	0.30	0.30	0.84	0.61
26	30/1/2551	0.30	0.29	0.86	0.60
27	2/1/2551	0.30	0.29	0.88	0.60
	เฉลี่ย	0.31	0.30	0.84	0.61

ตารางที่ ก.18 แสดงค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.) ของระบบในระยะที่ 2

ครั้งที่เก็บ	วันที่	ระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด			
		ชุดควบคุมอิฐบล็อก	อิฐบล็อก	ชุดควบคุมอิฐแดง	อิฐแดง
1	12/3/2550	0.55	0.49	0.69	0.67
2	12/5/2550	0.53	0.50	0.81	1.12
3	12/7/2550	0.53	0.49	0.78	1.11
4	12/10/2550	0.51	0.50	0.81	0.89
5	12/12/2550	0.63	0.50	0.84	0.89
6	14/12/2550	0.58	0.52	0.78	0.91
7	17/12/2550	0.56	0.52	0.64	0.89
8	19/12/2550	0.49	0.49	0.84	0.94
9	21/12/2550	0.52	0.48	0.90	0.96
10	24/12/2550	0.49	0.48	0.66	0.70
11	26/12/2550	0.54	0.52	0.75	0.76
12	28/12/2550	0.57	0.54	1.00	0.91
13	31/12/2550	0.53	0.52	0.94	0.88
14	1/2/2551	0.53	0.50	0.87	0.90
15	1/4/2551	0.63	0.55	1.06	0.91
16	1/7/2551	0.57	0.55	1.06	0.89
17	1/9/2551	0.55	0.54	0.99	0.79
18	1/11/2551	0.58	0.55	0.97	0.79
19	14/1/2551	0.55	0.50	0.97	0.77
20	16/1/2551	0.55	0.51	1.00	0.80
21	18/1/2551	0.58	0.53	1.06	0.88
22	21/1/2551	0.55	0.51	1.02	0.80
23	23/1/2551	0.63	0.56	1.07	0.83
24	25/1/2551	0.63	0.55	1.07	0.83
25	28/1/2551	0.63	0.55	1.07	0.83
26	30/1/2551	0.56	0.55	1.03	0.80
27	2/1/2551	0.56	0.55	1.02	0.80
	เฉลี่ย	0.58	0.54	1.03	0.82



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การคำนวณเวลาเก็บกักของระบบบึงประดิษฐ์บึงประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด

ในการทดลองค่าที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาเก็บกักของระบบได้แก่

- อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 เซนติเมตรต่อวัน (0.05 เมตรต่อวัน)
- ระบบมีขนาดกว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.6 เมตร สูง 0.65 เมตร
- อัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 12 ลิตรต่อวัน
- ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของทรายละเอียดเท่ากับ 0.49, หิน 2 เท่ากับ 0.52, หินเกล็ดเท่ากับ 0.55, อีฐแดง 0.65, เปลือกหอย 0.63 และอิฐบล็อกเท่ากับ 0.60

1. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้หินเกล็ด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นกระจายน้ำเสีย} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{หิน 2}} \\ &= 0.4 \times 0.6 \times 0.05 \times 0.52 = 0.00624 \text{ m}^3 = 6.24 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นทราย} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{ทรายละเอียด}} \\ &= 0.4 \times 0.6 \times 0.15 \times 0.49 = 0.01764 \text{ m}^3 = 17.64 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นหินเกล็ด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{หินเกล็ด}} \\ &= 0.4 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.55 = 0.0396 \text{ m}^3 = 39.6 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นระบายน้ำเสีย} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{หิน 2}} \\ &= 0.4 \times 0.6 \times 0.15 \times 0.52 = 0.01872 \text{ m}^3 = 18.72 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{รวมปริมาตรทั้งระบบ} = 6.24 + 17.64 + 39.6 + 18.72 = 82.2 \text{ ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{เวลาเก็บกักของระบบ} &= \text{ปริมาตรทั้งระบบ} / \text{อัตราการไหล} \\ &= 82.2 / 12 \\ &= 6.85 \text{ วัน} \end{aligned}$$

2. ระบบบึงประดิษฐ์ใช้อีฐแดง

$$\text{ปริมาตรของชั้นกระจายน้ำเสีย} = 6.24 \text{ ลิตร}$$

$$\text{ปริมาตรของชั้นทราย} = 17.64 \text{ ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นอิฐแดง} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{อิฐแดง}} \\ &= 0.4 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.65 = 0.0468 \text{ m}^3 = 46.8 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของชั้นระบายน้ำเสีย} &= 18.72 \text{ ลิตร} \\
 \text{รวมปริมาตรทั้งระบบ} &= 6.24 + 17.64 + 46.8 + 18.72 = 89.4 \text{ ลิตร} \\
 \text{เวลาเก็บกักของระบบ} &= \text{ปริมาตรทั้งระบบ} / \text{อัตราการไหล} \\
 &= 89.4 / 12 \\
 &= 7.45 \text{ วัน}
 \end{aligned}$$

3. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้เปลือกหอย

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของชั้นกระจายน้ำเสีย} &= 6.24 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นทราย} &= 17.64 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นเปลือกหอย} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{เปลือกหอย}} \\
 &= 0.4 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.63 = 0.04536 \text{ m}^3 = 45.36 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นระบายน้ำเสีย} &= 18.72 \text{ ลิตร} \\
 \text{รวมปริมาตรทั้งระบบ} &= 6.24 + 17.64 + 45.36 + 18.72 = 87.96 \text{ ลิตร} \\
 \text{เวลาเก็บกักของระบบ} &= \text{ปริมาตรทั้งระบบ} / \text{อัตราการไหล} \\
 &= 87.96 / 12 \\
 &= 7.33 \text{ วัน}
 \end{aligned}$$

4. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐบล็อก

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของชั้นกระจายน้ำเสีย} &= 6.24 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นทราย} &= 17.64 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นอิฐบล็อก} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \times \text{Void ratio}_{\text{อิฐบล็อก}} \\
 &= 0.4 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.60 = 0.0432 \text{ m}^3 = 43.2 \text{ ลิตร} \\
 \text{ปริมาตรของชั้นระบายน้ำเสีย} &= 18.72 \text{ ลิตร} \\
 \text{รวมปริมาตรทั้งระบบ} &= 6.24 + 17.64 + 43.2 + 18.72 = 85.8 \text{ ลิตร} \\
 \text{เวลาเก็บกักของระบบ} &= \text{ปริมาตรทั้งระบบ} / \text{อัตราการไหล} \\
 &= 85.8 / 12 \\
 &= 7.15 \text{ วัน}
 \end{aligned}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การหาการกระจายขนาดของตัวกลาง (Particle size distribution)

ก.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

จากการวิเคราะห์ห้ขนาดของเม็ดดิน นำมาเขียนจุด (Plot) ค่าเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงในแกนตั้งต่อขนาดช่องลอดตะแกรงในแกนนอนในสเกล Log ตามมาตรฐานอังกฤษนิยมจัดสเกลขนาดใหญ่อู่ทางขวามือ ส่วนมาตรฐานอเมริกันจัดสเกลขนาดใหญ่อู่ทางซ้ายมือ จุดที่เขียนไว้ลากต่อด้วยเส้นโค้งเรียบ (Smooth Curve) หรือต่อด้วยเส้นตรง การเขียนโค้งการกระจายขนาดของเม็ดดินนี้ ทำให้วิศวกรสามารถเห็นลักษณะการกระจายของเม็ดดินได้ทันทีดีกว่ารายงานผลในรูปตาราง

ในทางวิศวกรรม วัสดุเม็ดหยาบที่จะนำไปใช้งาน คุณสมบัติของเม็ดดินต้องมีขนาดเม็ดคละกัันดี (Well Graded) ความคละของเม็ดดินสามารถดูได้จากโค้งผลการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) เมื่อเปรียบเทียบกันคั้งที่ยาวตลอดขนาดสเกลแสดงลักษณะดินที่มีขนาดเม็ดคละกัันดี ในทางตรงกันข้าม ถ้าคั้งมีลักษณะเป็นตัว S (หรือ S กลับทาง) สั้น เกือบตั้งตรง ลักษณะเม็ดดินจะเป็นดินที่มีความสม่ำเสมอ (Poory Graded) ส่วนโค้งที่มีลักษณะเป็นชันๆ จะเป็นดินที่เรียกว่าดินขาดช่วง (Gap Graded)

เพื่อที่จะให้หลักพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดดินเป็นมาตรฐาน จึงได้กำหนดสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการกระจายขนาดของเม็ดดิน ดังนี้คือ

1. สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient)

$$UC = D_{60}/D_{10}$$

2. สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature)

$$C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$$

ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์จากลักษณะของโค้งเมื่อ D_{10} , D_{30} , D_{60} เป็นขนาดของเม็ดดิน (มม.) ที่เปอร์เซ็นต์ลอดผ่านตะแกรงที่ 10, 30 และ 60 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์ UC เป็นการประเมินการกระจายของเม็ดดินที่เปอร์เซ็นต์ลอดผ่านตะแกรง 2 จุดคือ ที่ 10 เปอร์เซ็นต์และ 60 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับ โถงของดินชนิดขาดช่วง (Gap graded) อาจจะไม่สามารถแยกความแตกต่างจากการคำนวณได้ จึงกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ UC ขึ้นมา

จากการคำนวณสามารถจำแนกการกระจายของเม็ดดินได้ดังนี้

กรวดมีการกละกัณฑ์ (Well Graded Gravel)	:	UC > 4
		$C_u = 1-3$
ทรายมีการกละกัณฑ์ (Well Graded Sand)	:	UC > 6
		$C_u = 1-3$
ดินที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Poorly Graded)	:	UC ~ 1 (ใกล้ 1.0)

นำค่าขนาดของรูเปิด และเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะสมของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดมาเขียนบนกราฟ Probability โดยให้ขนาดของรูเปิดอยู่บนสเกล Log และเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะสมของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดอยู่บนสเกล Probability

โดยที่ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) นั้นหมายถึงขนาดของทรายที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของทรายทั้งหมดจะมีขนาดเล็กกว่านี้: D_{10} ส่วนสัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอจะมีค่าเท่ากับ D_{60}/D_{10}

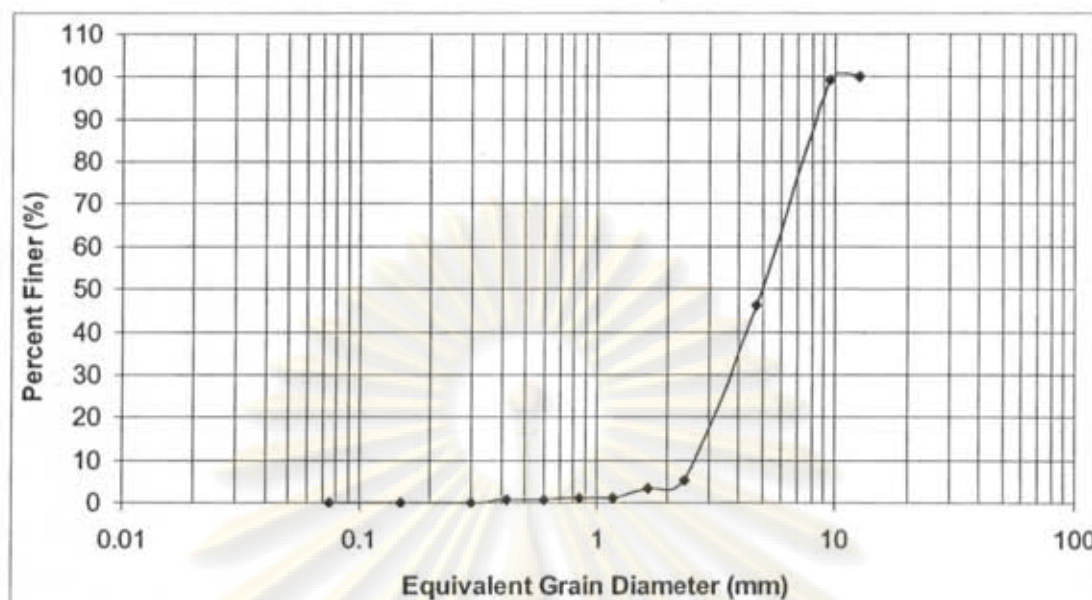
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 การกระจายขนาดของหินเกล็ด

ทำการสุ่มตัวอย่างหินเกล็ดที่ใช้ในการทดลอง แล้วนำมาทำ Sieve Analysis โดยนำตัวอย่างหินเกล็ดมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดต่างๆ เสร็จแล้วจดบันทึกน้ำหนักของหินเกล็ดที่ติดค้างอยู่บนตะแกรงขนาดต่างๆ จากนั้นจึงคำนวณหาน้ำหนักสะสมของหินเกล็ดที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิด แล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะสมของหินเกล็ดที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิด ดังตารางที่ ก. 1

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของหินเกล็ด

ขนาด ตะแกรง	ขนาดรูเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก ทรายรวม กับน้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง (ก.)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่มี ขนาดเล็ก กว่ารูเปิด
1/2"	12.5	508.7	508.7	0	0.00	100.00
3/8"	9.5	494.3	509.9	15.6	0.78	99.22
4	4.750	461.40	1516.10	1054.7	53.60	46.40
8	2.360	428.70	1248.20	819.5	94.64	5.36
10	1.650	427.10	465.50	38.4	96.57	3.43
16	1.180	398.20	440.30	42.1	98.68	1.32
20	0.850	336.90	343.80	6.9	99.02	0.98
30	0.600	351.60	355.10	3.5	99.20	0.80
40	0.420	337.10	338.40	1.3	99.26	0.74
50	0.300	330.50	345.20	14.7	100.00	0.00
100	0.150	313.10	313.10	0	100.00	0.00
200	0.075	305.00	305.00	0	100.00	0.00



รูปที่ ก.1 กราฟการกระจายขนาดของหินเกล็ด (Particle Size Distribution Curve)

จากรูปที่ ก.1 ค่า $D_{10} = 2.6$ mm.

$D_{30} = 3.7$ mm.

$D_{60} = 5.7$ mm.

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) = 2.19

ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) = 0.92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

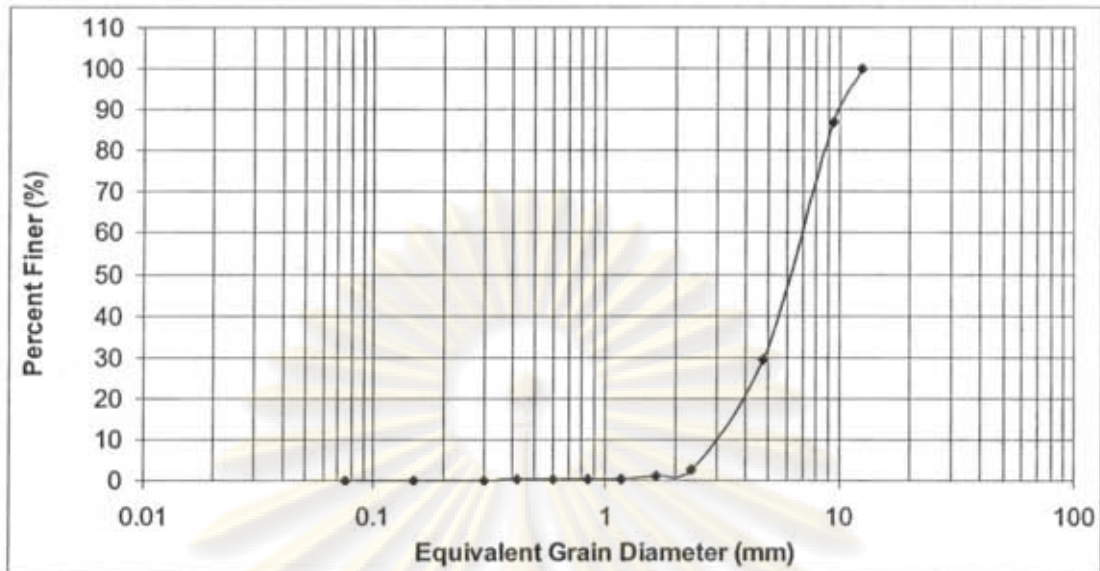
ก.3 การกระจายขนาดของอิฐแดง

กระทำเช่นเดียวกับหัวข้อ ก.2

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของอิฐแดง

ขนาด ตะแกรง	ขนาดรูเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก ทรายรวม กับน้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง (ก.)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่มี ขนาดเล็ก กว่ารูเปิด
1/2"	12.5	508.7	508.7	0	0.00	100.00
3/8"	9.5	494.3	622.9	128.6	12.86	87.14
4	4.750	461.40	1037.40	576	70.44	29.56
8	2.360	428.70	698.60	269.9	97.42	2.58
10	1.650	427.10	443.12	16.02	99.02	0.98
16	1.180	398.20	404.10	5.9	99.61	0.39
20	0.850	356.90	357.40	0.5	99.66	0.34
30	0.600	351.60	352.00	0.4	99.70	0.30
40	0.420	337.10	337.40	0.3	99.73	0.27
50	0.300	330.50	333.18	2.68	100.00	0.00
100	0.150	313.10	313.10	0	100.00	0.00
200	0.075	305.00	305.00	0	100.00	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.2 กราฟการกระจายขนาดของอิฐแดง (Particle Size Distribution Curve)

จากรูปที่ ค.2 ค่า $D_{10} = 3.0$ mm.

$D_{30} = 4.9$ mm.

$D_{60} = 7.0$ mm.

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) = 2.33

ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) = 1.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

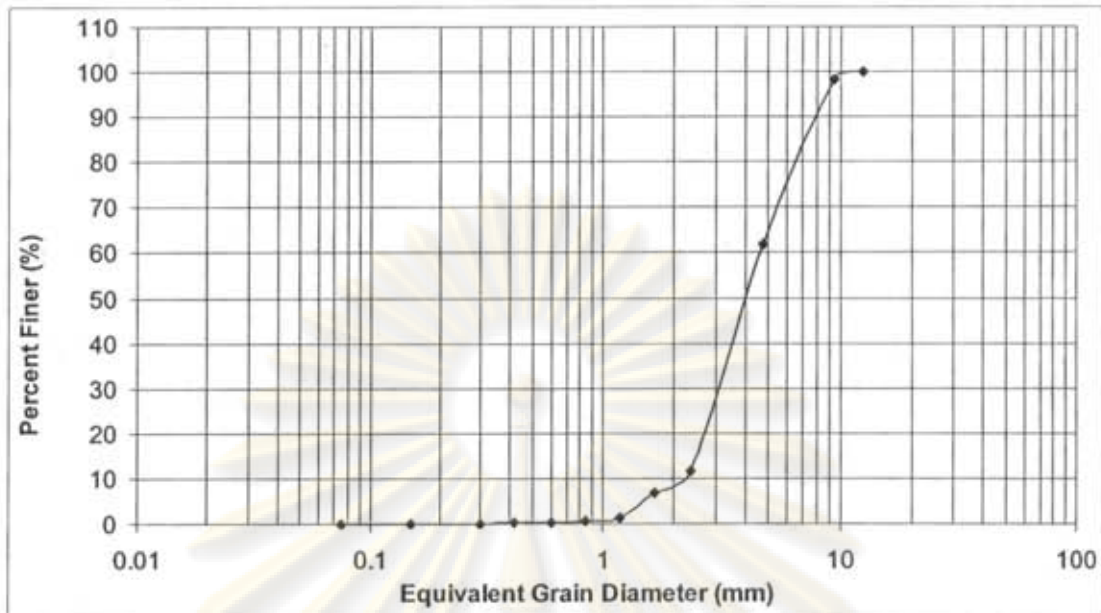
ค.4 การกระจายขนาดของเปลือกหอย

กระทำเช่นเดียวกับหัวข้อ ค.2

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของเปลือกหอย

ขนาด ตะแกรง	ขนาดรูเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก ทรายรวม กับน้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง (ก.)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่มี ขนาดเล็ก กว่ารูเปิด
1/2"	12.5	508.7	508.7	0	0.00	100.00
3/8"	9.5	494.3	512.7	18.4	1.84	98.16
4	4.750	461.40	825.20	363.8	38.21	61.79
8	2.360	428.70	928.60	499.9	88.18	11.82
10	1.650	427.10	475.20	48.1	92.99	7.01
16	1.180	398.20	455.20	57	98.69	1.31
20	0.850	336.90	342.80	5.9	99.28	0.72
30	0.600	351.60	353.80	2.2	99.50	0.50
40	0.420	337.10	338.20	1.1	99.61	0.39
50	0.300	330.50	333.20	2.7	99.88	0.12
100	0.150	313.10	314.30	1.2	100.00	0.00
200	0.075	305.00	305.00	0	100.00	0.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.3 กราฟการกระจายขนาดของเปลือกหอย (Particle Size Distribution Curve)

จากรูปที่ ก.2 ค่า $D_{10} = 1.3$ mm.

$D_{30} = 3.0$ mm.

$D_{60} = 4.7$ mm.

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) = 3.61

ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) = 1.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

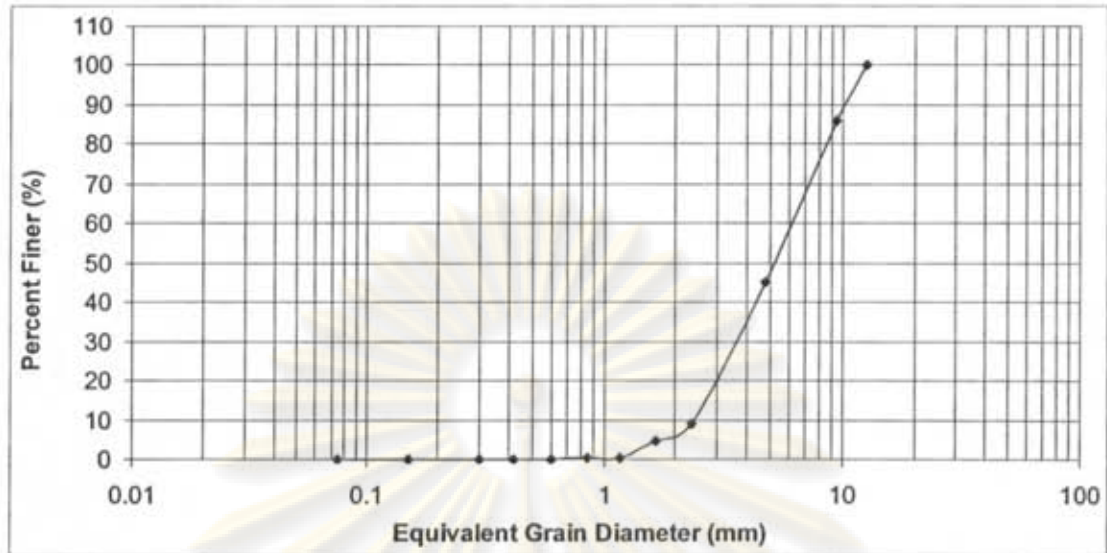
ก.5 การกระจายขนาดของอิฐบล็อก

กระทำเช่นเดียวกับหัวข้อ ก.2

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทำ Sieve Analysis ของเศษอิฐบล็อก

ขนาด ตะแกรง	ขนาดรูเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก ทรายรวม กับน้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง (ก.)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่ค้าง บนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก สะสมของ ทรายที่มี ขนาดเล็ก กว่ารูเปิด
1/2"	12.5	508.7	508.7	0	0.00	100.00
3/8"	9.5	494.3	633	138.7	13.87	86.13
4	4.750	461.40	871.50	410.1	54.86	45.14
8	2.360	428.70	789.50	360.8	90.93	9.07
10	1.650	427.10	471.40	44.3	95.36	4.64
16	1.180	398.20	439.90	41.7	99.53	0.47
20	0.850	336.90	339.50	2.6	99.79	0.21
30	0.600	351.60	352.30	0.7	99.86	0.14
40	0.420	337.10	337.50	0.4	99.90	0.10
50	0.300	330.50	331.50	1	100.00	0.00
100	0.150	313.10	313.10	0	100.00	0.00
200	0.075	305.00	305.00	0	100.00	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.4 กราฟการกระจายขนาดของอิฐบดอัด (Particle Size Distribution Curve)

จากรูปที่ ก.2 ค่า $D_{10} = 2.5$ mm.

$D_{30} = 3.6$ mm.

$D_{60} = 6.0$ mm.

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) = 2.4

ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) = 0.86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

การตรวจสอบการรั่วของระบบ

วิธีการตรวจสอบ

1. ขั้นตอนการทำงาน

1.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Tracer (น้ำ + NaCl) ที่ค่าต่างๆ กับค่าสภาพการนำไฟฟ้า

1.2 วัดสภาพการนำไฟฟ้าของระบบโดยใช้น้ำประปา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.2.1 เติมน้ำประปาจนเต็มระบบ (กำหนดให้มีอัตราการไหล = 0.93 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีเวลาเก็บกัก = 180 นาที)

1.2.2 วัดสภาพการนำไฟฟ้าของระบบทุก 5 นาที

1.2.3 เฉลี่ยค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ได้ ถือเป็นค่าเริ่มต้นเมื่อยังไม่ได้ฉีด Tracer

1.3 วัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของระบบเมื่อทำการฉีด Tracer

1.3.1 เตรียม Tracer ที่ค่าความเข้มข้น 10 ก./ล. โดยมีปริมาตร 1 ลิตร

1.3.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำประปาที่เข้าสู่ระบบ (กำหนดให้มีอัตราการไหล = 0.93 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีเวลาเก็บกัก = 180 นาที)

1.3.3 ฉีด Tracer ที่เตรียมในขั้นตอน 1.3.1 (รู้ความเข้มข้นและปริมาตรของ Tracer) เข้าสู่ระบบพร้อมกับการบันทึกเวลา

1.3.4 ทำการเก็บน้ำที่ท้ายระบบ (ปลายกระบะ) พร้อมกับวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าทุก 5 นาที

1.4 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของ Tracer = ค่าความนำไฟฟ้าจากข้อ 1.3.4 – ค่าความนำไฟฟ้าจากข้อ 1.2.3

1.5 ทำการวิเคราะห์หาค่าเวลาเก็บกักเฉลี่ยของ Tracer ในระบบโดยนำไปสร้างกราฟต่างๆ ดังแสดงในผลการทดลอง

1.5.1 พล็อตกราฟและหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับเวลา (เรียกว่า C Curve)

1.5.2 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E(t)$ กับ เวลา (เรียก $E(t)$ curve)

2. ผลการทดลอง

2.1 กำหนดให้ Tracer มีระยะเวลาเก็บกักในระบบ 180 (มีอัตราการไหล = 0.93 ลิตรต่อนาที)

2.2 Tracer ที่ใช้คือ NaCl 10 ก./ล. มีปริมาตร 1 ลิตร โดยค่าความนำไฟฟ้าของอิฐแดง = 19.12 ms และค่าความนำไฟฟ้าของอิฐบล็อก = 15.15 ms

2.3 ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของระบบเมื่อยังไม่ได้ฉีด Tracer 0.27 ms

2.4 ผลการทดลองได้ค่าดังตาราง โดยเวลาเก็บกักของอิฐแดง = 297.24 นาที และเวลาเก็บกักของอิฐบล็อก = 249.89 นาที

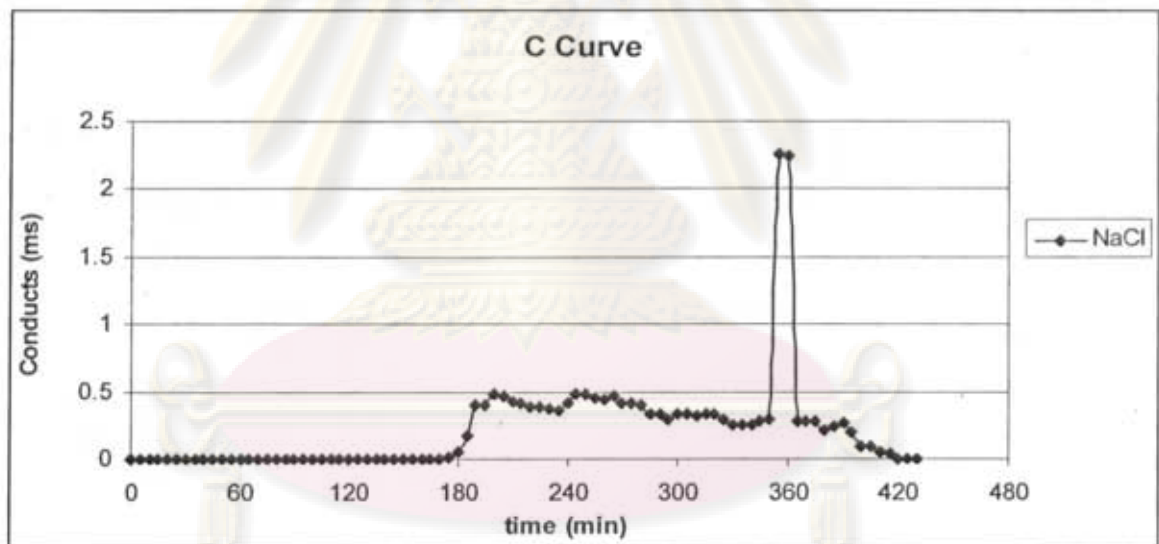
ตารางที่ ง. 1 ผลการทดลองการทำ Tracer ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้อิฐแดง

T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-tm	(t-tm) ²	(t-tm) ² *E(t)
0	0	0	0	-297.24	88351.62	0
5	0	0	0	-292.24	85404.22	0
10	0	0	0	-287.24	82506.82	0
15	0	0	0	-282.24	79659.42	0
20	0	0	0	-277.24	76862.02	0
25	0	0	0	-272.24	74114.62	0
30	0	0	0	-267.24	71417.22	0
35	0	0	0	-262.24	68769.82	0
40	0	0	0	-257.24	66172.42	0
45	0	0	0	-252.24	63625.02	0
50	0	0	0	-247.24	61127.62	0
55	0	0	0	-242.24	58680.22	0
60	0	0	0	-237.24	56282.82	0
65	0	0	0	-232.24	53935.42	0
70	0	0	0	-227.24	51638.02	0
75	0	0	0	-222.24	49390.62	0
80	0	0	0	-217.24	47193.22	0
85	0	0	0	-212.24	45045.82	0
90	0	0	0	-207.24	42948.42	0

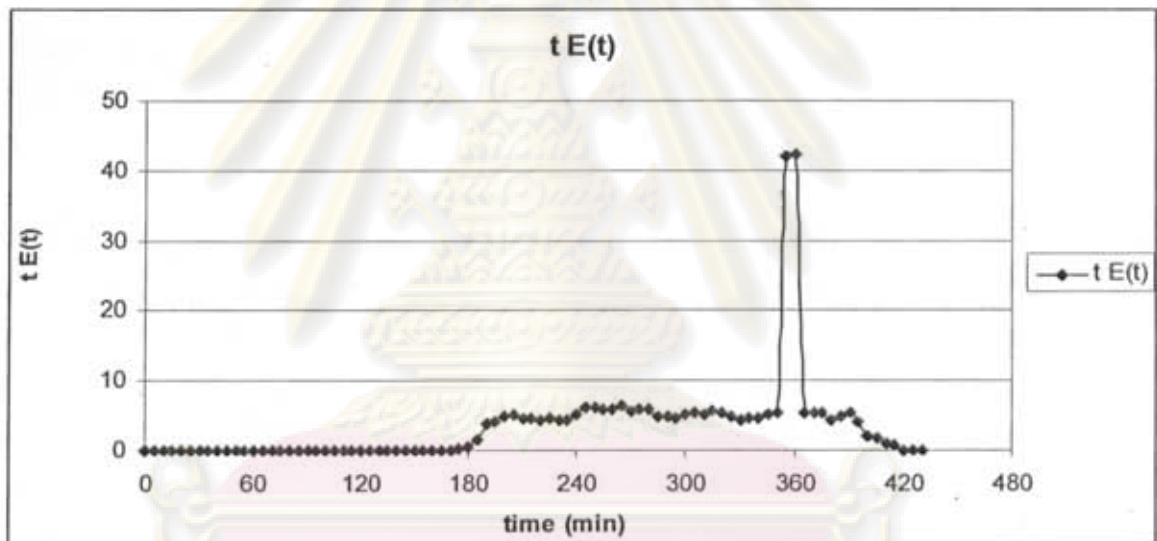
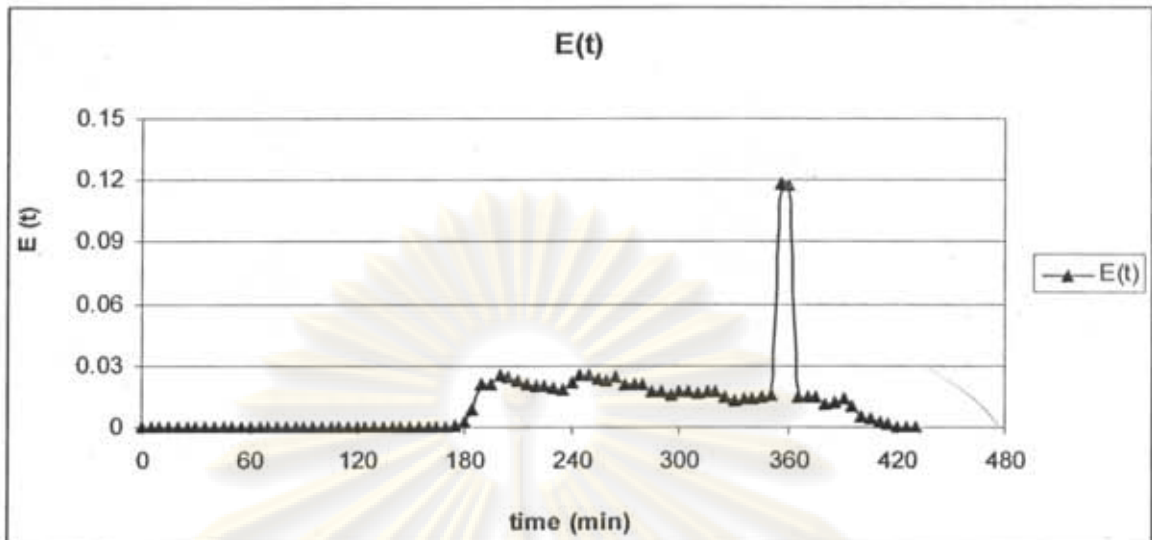
T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-t _m	(t-t _m) ²	(t-t _m) ² *E(t)
95	0	0	0	-202.24	40901.02	0
100	0	0	0	-197.24	38903.62	0
105	0	0	0	-192.24	36956.22	0
110	0	0	0	-187.24	35058.82	0
115	0	0	0	-182.24	33211.42	0
120	0	0	0	-177.24	31414.02	0
125	0	0	0	-172.24	29666.62	0
130	0	0	0	-167.24	27969.22	0
135	0	0	0	-162.24	26321.82	0
140	0	0	0	-157.24	24724.42	0
145	0	0	0	-152.24	23177.02	0
150	0	0	0	-147.24	21679.62	0
155	0	0	0	-142.24	20232.22	0
160	0	0	0	-137.24	18834.82	0
165	0	0	0	-132.24	17487.42	0
170	0	0	0	-127.24	16190.02	0
175	0.02	0.001046	0.183054	-122.24	14942.62	15.63035
180	0.05	0.002615	0.470711	-117.24	13745.22	35.94461
185	0.17	0.008891	1.644874	-112.24	12597.82	112.0099
190	0.4	0.020921	3.974895	-107.24	11500.42	240.5945
195	0.4	0.020921	4.079498	-102.24	10453.02	218.6824
200	0.48	0.025105	5.020921	-97.24	9455.618	237.3795
205	0.47	0.024582	5.039226	-92.24	8508.218	209.1455
210	0.43	0.02249	4.722803	-87.24	7610.818	171.1638
215	0.41	0.021444	4.610356	-82.24	6763.418	145.0314
220	0.39	0.020397	4.487448	-77.24	5966.018	121.6918
225	0.39	0.020397	4.589435	-72.24	5218.618	106.4467
230	0.37	0.019351	4.450837	-67.24	4521.218	87.49218
235	0.36	0.018828	4.424686	-62.24	3873.818	72.93799
240	0.42	0.021967	5.271967	-57.24	3276.418	71.97152

T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-t _m	(t-t _m) ²	(t-t _m) ² *E(t)
245	0.48	0.025105	6.150628	-52.24	2729.018	68.5109
250	0.48	0.025105	6.276151	-47.24	2231.618	56.02387
255	0.45	0.023536	6.001569	-42.24	1784.218	41.99257
260	0.44	0.023013	5.983264	-37.24	1386.818	31.91421
265	0.47	0.024582	6.514121	-32.24	1039.418	25.55054
270	0.41	0.021444	5.789749	-27.24	742.0176	15.91147
275	0.41	0.021444	5.896967	-22.24	494.6176	10.60634
280	0.4	0.020921	5.857741	-17.24	297.2176	6.217941
285	0.33	0.017259	4.918933	-12.24	149.8176	2.585764
290	0.33	0.017259	5.00523	-7.24	52.4176	0.904697
295	0.3	0.01569	4.628661	-2.24	5.0176	0.078728
300	0.33	0.017259	5.177824	2.76	7.6176	0.131475
305	0.34	0.017782	5.42364	7.76	60.2176	1.070815
310	0.32	0.016736	5.188285	12.76	162.8176	2.724981
315	0.34	0.017782	5.601464	17.76	315.4176	5.60889
320	0.33	0.017259	5.523013	22.76	518.0176	8.94068
325	0.29	0.015167	4.929393	27.76	770.6176	11.68824
330	0.25	0.013075	4.314854	32.76	1073.218	14.03266
335	0.26	0.013598	4.555439	37.76	1425.818	19.38873
340	0.26	0.013598	4.623431	42.76	1828.418	24.86342
345	0.28	0.014644	5.052301	47.76	2281.018	33.40402
350	0.3	0.01569	5.491632	52.76	2783.618	43.67601
355	2.26	0.118201	41.9613	57.76	3336.218	394.3437
360	2.25	0.117678	42.36402	62.76	3938.818	463.5115
365	0.28	0.014644	5.345188	67.76	4591.418	67.23833
370	0.28	0.014644	5.41841	72.76	5294.018	77.52745
375	0.28	0.014644	5.491632	77.76	6046.618	88.54879
380	0.22	0.011506	4.372385	82.76	6849.218	78.80899
385	0.24	0.012552	4.832636	87.76	7701.818	96.67553
390	0.27	0.014121	5.507322	92.76	8604.418	121.5059

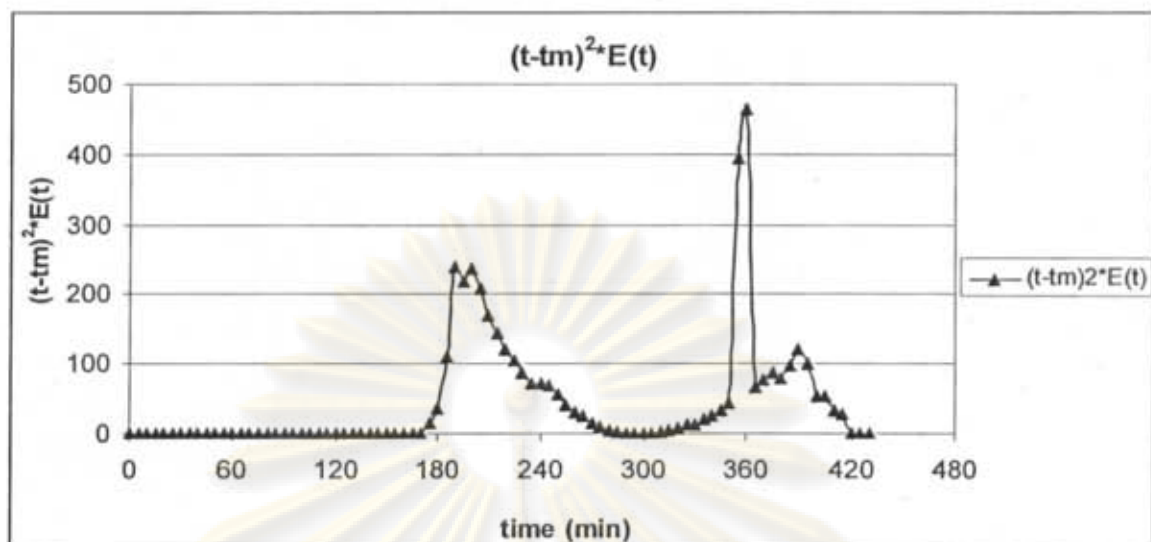
T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-tm	(t-tm) ²	(t-tm) ² *E(t)
395	0.2	0.01046	4.131799	97.76	9557.018	99.9688
400	0.1	0.00523	2.09205	102.76	10559.62	55.22813
405	0.09	0.004707	1.906381	107.76	11612.22	54.66002
410	0.05	0.002615	1.072176	112.76	12714.82	33.25005
415	0.04	0.002092	0.868201	117.76	13867.42	29.01133
420	0	0	0	122.76	15070.02	0
425	0	0	0	127.76	16322.62	0
430	0	0	0	132.76	17625.22	0
รวม	19.12	-	297.24	-	-	3932.23



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



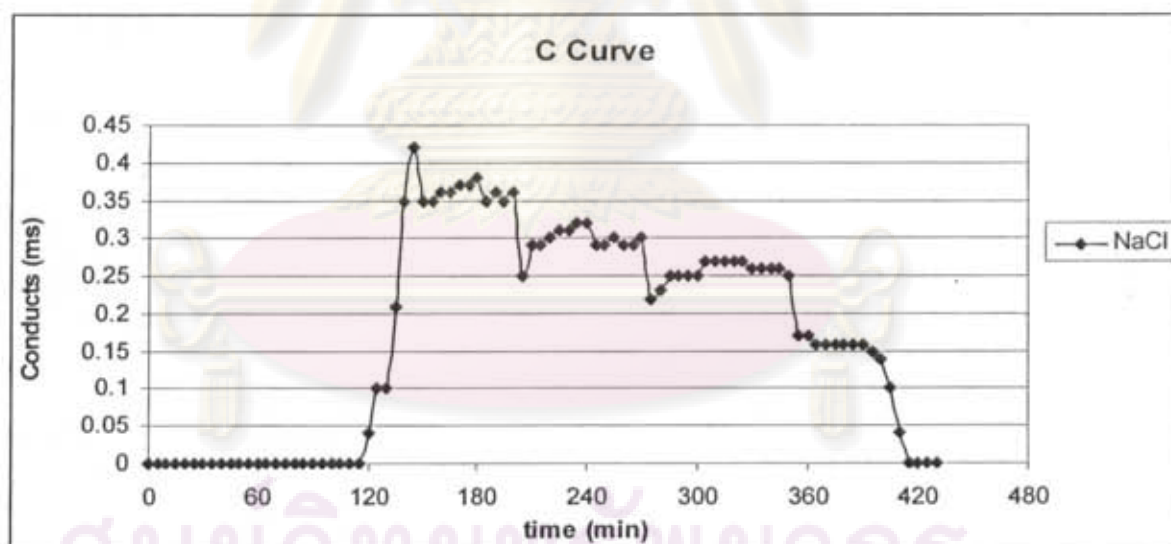
ตารางที่ ง. 2 ผลการทดลองการทำ Tracer ของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้รูปบล็อก

T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-tm	(t-tm) ²	(t-tm) ² *E(t)
0	0	0	0	-249.89	62445.01	0
5	0	0	0	-244.89	59971.11	0
10	0	0	0	-239.89	57547.21	0
15	0	0	0	-234.89	55173.31	0
20	0	0	0	-229.89	52849.41	0
25	0	0	0	-224.89	50575.51	0
30	0	0	0	-219.89	48351.61	0
35	0	0	0	-214.89	46177.71	0
40	0	0	0	-209.89	44053.81	0
45	0	0	0	-204.89	41979.91	0
50	0	0	0	-199.89	39956.01	0
55	0	0	0	-194.89	37982.11	0
60	0	0	0	-189.89	36058.21	0
65	0	0	0	-184.89	34184.31	0
70	0	0	0	-179.89	32360.41	0
75	0	0	0	-174.89	30586.51	0
80	0	0	0	-169.89	28862.61	0

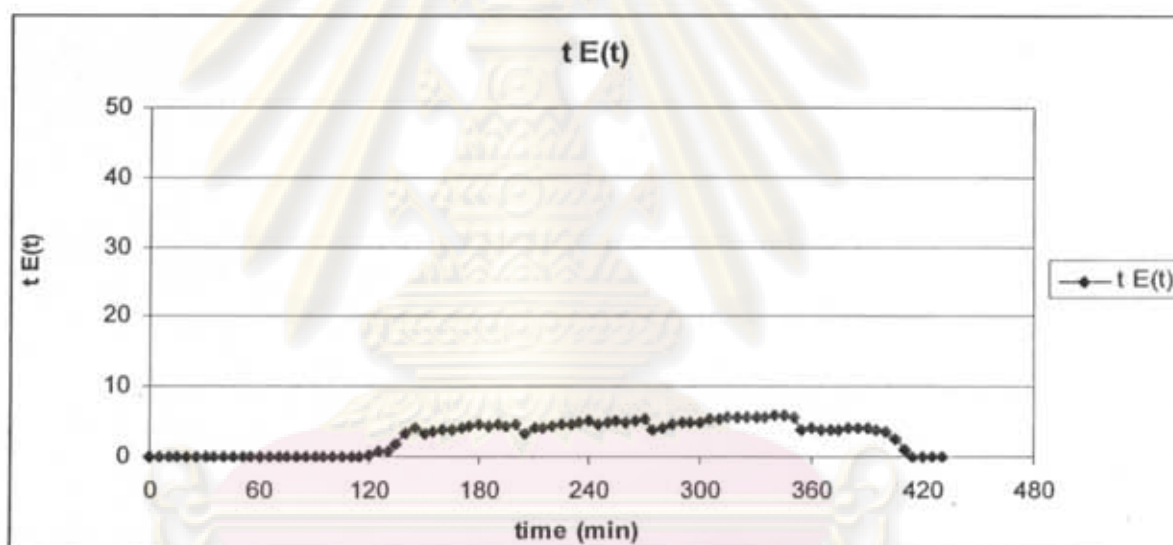
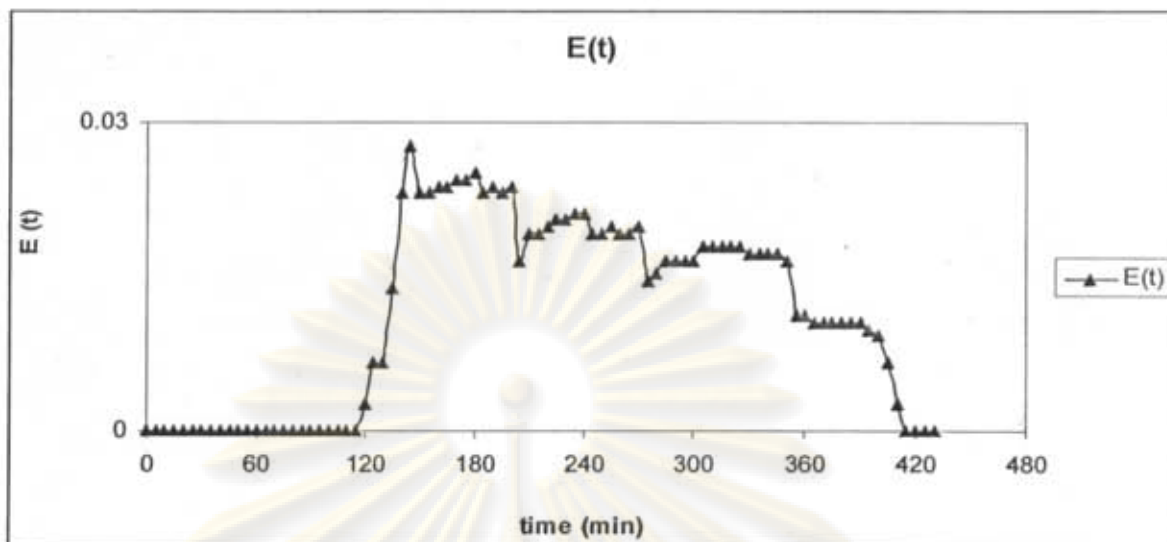
T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-t _m	(t-t _m) ²	(t-t _m) ² *E(t)
85	0	0	0	-164.89	27188.71	0
90	0	0	0	-159.89	25564.81	0
95	0	0	0	-154.89	23990.91	0
100	0	0	0	-149.89	22467.01	0
105	0	0	0	-144.89	20993.11	0
110	0	0	0	-139.89	19569.21	0
115	0	0	0	-134.89	18195.31	0
120	0.04	0.00264	0.316832	-129.89	16871.41	44.54498
125	0.1	0.006601	0.825083	-124.89	15597.51	102.9539
130	0.1	0.006601	0.858086	-119.89	14373.61	94.87533
135	0.21	0.013861	1.871287	-114.89	13199.71	182.9663
140	0.35	0.023102	3.234323	-109.89	12075.81	278.9792
145	0.42	0.027723	4.019802	-104.89	11001.91	305.0035
150	0.35	0.023102	3.465347	-99.89	9978.012	230.5151
155	0.35	0.023102	3.580858	-94.89	9004.112	208.0158
160	0.36	0.023762	3.80198	-89.89	8080.212	192.005
165	0.36	0.023762	3.920792	-84.89	7206.312	171.2391
170	0.37	0.024422	4.151815	-79.89	6382.412	155.8741
175	0.37	0.024422	4.273927	-74.89	5608.512	136.9736
180	0.38	0.025083	4.514851	-69.89	4884.612	122.5183
185	0.35	0.023102	4.273927	-64.89	4210.712	97.27718
190	0.36	0.023762	4.514851	-59.89	3586.812	85.23118
195	0.35	0.023102	4.50495	-54.89	3012.912	69.60523
200	0.36	0.023762	4.752475	-49.89	2489.012	59.14484
205	0.25	0.016502	3.382838	-44.89	2015.112	33.25267
210	0.29	0.019142	4.019802	-39.89	1591.212	30.45885
215	0.29	0.019142	4.115512	-34.89	1217.312	23.30168
220	0.3	0.019802	4.356436	-29.89	893.4121	17.69133
225	0.31	0.020462	4.60396	-24.89	619.5121	12.67649
230	0.31	0.020462	4.706271	-19.89	395.6121	8.095033

T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-t _m	(t-t _m) ²	(t-t _m) ² *E(t)
235	0.32	0.021122	4.963696	-14.89	221.7121	4.683028
240	0.32	0.021122	5.069307	-9.89	97.8121	2.065998
245	0.29	0.019142	4.689769	-4.89	23.9121	0.457723
250	0.29	0.019142	4.785479	0.11	0.0121	0.000232
255	0.3	0.019802	5.049505	5.11	26.1121	0.517071
260	0.29	0.019142	4.976898	10.11	102.2121	1.956535
265	0.29	0.019142	5.072607	15.11	228.3121	4.370331
270	0.3	0.019802	5.346535	20.11	404.4121	8.00816
275	0.22	0.014521	3.993399	25.11	630.5121	9.155951
280	0.23	0.015182	4.250825	30.11	906.6121	13.76375
285	0.25	0.016502	4.70297	35.11	1232.712	20.34178
290	0.25	0.016502	4.785479	40.11	1608.812	26.54805
295	0.25	0.016502	4.867987	45.11	2034.912	33.57941
300	0.25	0.016502	4.950495	50.11	2511.012	41.43584
305	0.27	0.017822	5.435644	55.11	3037.112	54.12675
310	0.27	0.017822	5.524752	60.11	3613.212	64.39388
315	0.27	0.017822	5.613861	65.11	4239.312	75.5521
320	0.27	0.017822	5.70297	70.11	4915.412	87.6014
325	0.27	0.017822	5.792079	75.11	5641.512	100.5418
330	0.26	0.017162	5.663366	80.11	6417.612	110.1372
335	0.26	0.017162	5.749175	85.11	7243.712	124.3145
340	0.26	0.017162	5.834983	90.11	8119.812	139.3499
345	0.26	0.017162	5.920792	95.11	9045.912	155.2434
350	0.25	0.016502	5.775578	100.11	10022.01	165.3797
355	0.17	0.011221	3.983498	105.11	11048.11	123.9722
360	0.17	0.011221	4.039604	110.11	12124.21	136.0473
365	0.16	0.010561	3.854785	115.11	13250.31	139.9373
370	0.16	0.010561	3.907591	120.11	14426.41	152.3581
375	0.16	0.010561	3.960396	125.11	15652.51	165.3071
380	0.16	0.010561	4.013201	130.11	16928.61	178.784

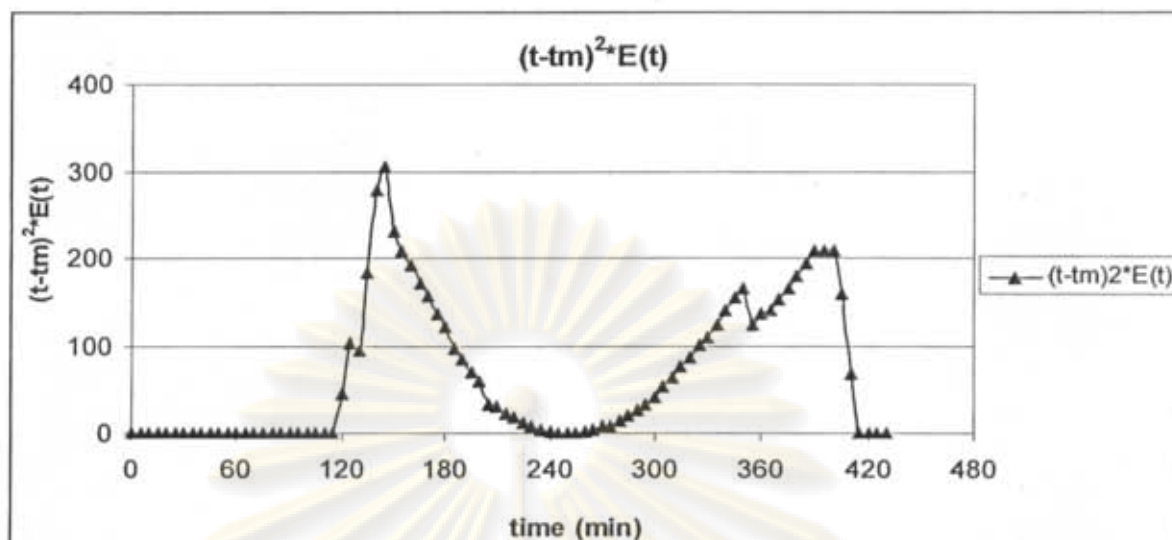
T(min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-tm	(t-tm) ²	(t-tm) ² *E(t)
385	0.16	0.010561	4.066007	135.11	18254.71	192.789
390	0.16	0.010561	4.118812	140.11	19630.81	207.3221
395	0.15	0.009901	3.910891	145.11	21056.91	208.4843
400	0.14	0.009241	3.69637	150.11	22533.01	208.2259
405	0.1	0.006601	2.673267	155.11	24059.11	158.806
410	0.04	0.00264	1.082508	160.11	25635.21	67.68373
415	0	0	0	165.11	27261.31	0
420	0	0	0	170.11	28937.41	0
425	0	0	0	175.11	30663.51	0
430	0	0	0	180.11	32439.61	0
รวม	15.15	-	249.89	-	-	5846.44



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพสิฐ กาญจนสุนทร เกิดวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2520 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดนาค อำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย