

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
ในน้ำทิ้งชุมชนโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวกินแนวตั้ง

REMOVAL EFFICIENCY OF ORGANIC CARBON, NITROGEN
AND PHOSPHORUS IN DOMESTIC WASTEWATER
SUBSURFACE VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND

ประกายธรรม สุขสลิษฐ์
PRAKAYTHAM SUKSATIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
ในน้ำทิ้งชุมชนโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

REMOVAL EFFICIENCY OF ORGANIC CARBON, NITROGEN
AND PHOSPHORUS IN DOMESTIC WASTEWATER
SUBSURFACE VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND



ประกายธรรม สุขสทิพย์
PRAKAYTHAM SUKSATIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

**REMOVAL EFFICIENCY OF ORGANIC CARBON, NITROGEN
AND PHOSPHORUS IN DOMESTIC WASTEWATER
SUBSURFACE VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND**

PRAKAYTHAM SUKSATIT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชนโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหล ได้ผิวดินแนวคิง
นักศึกษา	ประกายธรรม สุขสถิตย์
รหัสประจำตัว	47064009
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชนด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวคิง โดยใช้พืช 2 ชนิด คือ ต้นคล้าน้ำ และต้นกุ่ม ตัวยี่ที่ศึกษา คือ ชนิดของพืช ค่าซีโอดีน้ำเสียสังเคราะห์ และระดับความลึกของชั้นตัวกลาง โดยควบคุมระยะเวลาพักเก็บที่ 5 วัน จากการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 150 มก.ซีโอดี/ล. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และ ฟอสฟอรัสของระบบที่ปลูกต้นคล้าน้ำ และต้นกุ่มมีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 87, 87 - 91 และ 82 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 300 และ 500 มก.ซีโอดี/ล. พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบที่ปลูกต้นคล้าน้ำมากกว่าระบบที่ปลูกต้นกุ่ม เนื่องจากต้นคล้าน้ำมีรากยาว ทำให้ออกซิเจนสามารถแทรกผ่านไปในชั้นตัวกลางได้ดี ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีดอก ซึ่งใช้ฟอสฟอรัสในการออกดอก การศึกษาผลของความลึกต่อประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และฟอสฟอรัส ส่วนใหญ่เกิดที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 ซม. ซึ่งเป็นระดับที่ไม่อ้อมตัวด้วยน้ำ โดยพบว่าระบบที่ปลูกต้นคล้าน้ำ และระบบที่ปลูกต้นกุ่ม มีค่าการกำจัดร้อยละ 86, 88 และ 83 ตามลำดับ ผลการบำบัดน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิพบว่าระบบที่ปลูกต้นคล้าน้ำ และระบบที่ปลูกต้นกุ่ม สามารถบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน และในโตรเจนได้ใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 94 และ 99 ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบที่ปลูกต้นคล้าน้ำ บำบัดได้สูงกว่าระบบที่ปลูกต้นกุ่ม คือ ร้อยละ 90 และ 82 ตามลำดับ

คำสำคัญ : กุ่ม, คล้าน้ำ, ทีเคเอ็น, น้ำเสียชุมชน, ฟอสฟอรัส, ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหล ได้ผิวดินแนวคิง, สารอินทรีย์คาร์บอน

Thesis Title Removal Efficiency of Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Domestic Wastewater using Subsurface Vertical Flow Constructed Wetland

Student Miss Prakaytham Suksatit

Student ID. 47064009

Degree Master of Science

Programme Environmental Chemistry

Year 2007

Thesis Advisor Dr. Suwannee Junyapoon

Thesis Co-Advisor Dr. Chalor Jarusutthirak

ABSTRACT

This research studied removal efficiency of organic carbon, nitrogen, and phosphorus containing in domestic wastewater using subsurface vertical flow constructed wetland. Two different plants, including, Water Canna (*Thalia geniculata* L.) and Umbrella Sedage (*Cyperus involcratus* Rottb.) were used in the system. Factors affecting system' performance included types of plants, COD concentration of synthetic wastewater, and depth of media. With COD of 150 mg/L, the removal efficiencies for organic carbon, nitrogen, and phosphorus in both systems were similar to that without plantation, i.e. 87%, 87 - 91%, 82%, respectively. As COD increased from 150 to 500 mg/L, efficiencies in removal of organic carbon, nitrogen, and phosphorus, of the system with Water Canna were found to be higher than that with Umbrella Sedage. It could be explained that longer roots and bigger thalli of Water Canna, than those of Umbrella Sedage, could enhance diffusion of oxygen through the media, thus promote biodegradability of aerobic microorganisms. Besides, Water Canna is a flowering plant that is able to consume high amount of phosphorus during its blooming period. The study of system' performance at various depths exhibited that organic carbon, nitrogen, and phosphorus were mainly removed at a depth of 30 cms, which was defined as unsaturation zone (86%, 88% and 83%, respectively). Treatment of domestic wastewater from Suvarnabhumi Airport using the wetland systems was investigated. Both system exhibited similar performance in removal of organic carbon and nitrogen, i.e. 94% and 95% respectively. However the system with Water Canna showed better performance in removal of phosphorus than (90%) that with Umbrella Sedge (40%).

Keywords: Umbrella Sedage, Water Canna, TKN, Domestic wastewater, Phosphorus, Vertical flow constructed wetland, Organic carbon

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ และ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา ของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยใหม่ที่เอื้อเฟื้อ โดยให้เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ที่เอื้อเฟื้อทุน สนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้อำนวยการฝ่ายสุขภาพิบาล ท่าอากาศยานสนามบินสุวรรณภูมิที่เอื้อเฟื้อ น้ำเสียที่ใช้ในการทำการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นางสาวประกายธรรม สุขสถิตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XIV
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสีย.....	4
2.1.1 น้ำเสียชุมชน.....	4
2.1.2 น้ำเสียอุตสาหกรรม.....	7
2.2 ระบบบึงประดิษฐ์.....	7
2.2.1 องค์ประกอบของระบบบึงประดิษฐ์.....	8
2.2.1.1 ชั้นตัวกลาง.....	8
2.2.1.2 จุลินทรีย์.....	10
2.2.2 ประเภทของระบบบึงประดิษฐ์ที่แบ่งตามลักษณะการไหลของน้ำเสีย.....	11
2.2.2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน.....	11
2.2.2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน.....	12
2.2.3 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3.1 การไหลเป็นช่วง.....	15
2.2.3.2 การเติมน้ำเสียแบบเป็นขั้น.....	15
2.2.3.3 การหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ.....	15
2.2.4 พืชในระบบบึงประดิษฐ์.....	16
2.2.4.1 หน้าที่ของพืชในระบบบึงประดิษฐ์.....	16
2.2.4.2 ชนิดและลักษณะของพืชในระบบบึงประดิษฐ์.....	17
2.2.4.3 ปัจจัยในการพิจารณาเลือกพืชในบึงระบบประดิษฐ์.....	20
2.2.4.4 พืชที่ใช้ในการศึกษา.....	21
2.2.5 กลไกการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์.....	23
2.2.5.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอย.....	23
2.2.5.2 การกำจัดสารอินทรีย์.....	23
2.2.5.3 การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด.....	26
2.2.5.4 การกำจัดฟอสฟอรัส.....	28
2.2.5.5 การกำจัดโลหะหนัก.....	29
2.2.5.6 การกำจัดเชื้อโรค.....	29
2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัว และการเคลื่อนที่ของสารในระบบโดยใช้ Tracers	29
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	35
3.1.1 สารเคมี.....	35
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	35
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.2.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	36
3.2.2 พืชที่ใช้ในการศึกษา.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การศึกษาการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง	37
3.2.3.1 การสร้างและติดตั้งระบบ.....	37
3.2.3.2 การศึกษาความพรุนของตัวกลาง.....	39
3.2.3.3 การศึกษาการกระจายตัวของสารภายในระบบ.....	39
3.2.3.4 การปรับสภาพของระบบ.....	40
3.2.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์.....	40
3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชนท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	44
4.1 ผลการศึกษาการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง.....	44
4.1.1 ความพรุนของตัวกลาง (Total porosity, E).....	44
4.1.2 การกระจายตัวของสารภายในระบบ.....	45
4.1.3 อัตราการระเหยและอัตราการใช้น้ำของพืชภายในระบบบึงประดิษฐ์.....	45
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบบึงประดิษฐ์ แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง.....	47
4.2.1 ชนิดของพืชในระบบบึงประดิษฐ์.....	47
4.2.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	49
4.2.3 ระดับความลึกของระบบบึงประดิษฐ์.....	55
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.	67
ก-1 วิเคราะห์หาความหนาแน่นรวม (bulk density, ρ_b).....	68
ก-2 วิเคราะห์หาความหนาแน่นของอนุภาค (particle density, ρ_s).....	69
ภาคผนวก ข.	70
ภาคผนวก ค.	78
ภาคผนวก ง.	81
ภาคผนวก จ.	92
ภาคผนวก ฉ.	107
ภาคผนวก ช.	110
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน.....	4
2.2 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่าง ๆ	5
2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชนทั่วไป.....	6
2.4 หน้าที่ของพีชโพลีเอทิลีนในระบบบึงประดิษฐ์.....	19
2.5 ค่าการกระจายตัวในแนวแกนของระบบที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย.....	31
3.1 ส่วนประกอบและความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	37
3.2 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ.....	42
3.3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่ก่อนเข้าระบบและออกจากระบบ	42
4.1 ร้อยละความพรุนของตัวกลางในระบบที่ 1, 2 และ 3.....	44
4.2 อัตราการไหลของระบบบึงประดิษฐ์ที่ 1, 2 และ 3	45
4.3 อัตราการระเหยและอัตราการใช้ น้ำของพีชและระดับที่น้ำอ้อมตัวภายในระบบ.....	47
4.4 การเจริญเติบโตของพีชที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.5 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้ง.....	52
4.6 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้ง.....	53
4.7 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้ง.....	54
4.8 อัตราการบรรเทาทุกสารอินทรีย์ และอัตราการไหลของระบบที่ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน...	60
4.9 ลักษณะของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้ง.....	61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1 ความหนาแน่นรวม (ρ_b) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์.....	71
ข-2 ความหนาแน่นอนุภาค (ρ_s) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์.....	71
ข-3 สักส่วนช่องว่าง (c) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์.....	71
ข-4 ร้อยละความพรุนของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์.....	71
ข-5 อัตราการไหลที่ได้จากการทดลองของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง	72
ข-6 ค่าจากการคำนวณหาการสะสมตัวของสารในระบบบึงประดิษฐ์.....	73
ข-7 ตัวเลขการกระจายตัว (Dispersion number, d) ของสารในระบบบึงประดิษฐ์.....	74
ข-8 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 1 (ควบคุม).....	75
ข-9 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 2 (คล้าน้ำ).....	75
ข-10 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 3 (กรรุ่ม).....	76
ข-11 ระดับที่น้ำอ้อมตัวภายในระบบของบึงประดิษฐ์.....	77
ค-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่างชนิดกัน.....	79
ค-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่างชนิดกัน.....	79
ค-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตรของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่างชนิดกัน....	80
ค-4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่าง ชนิดกัน.....	80
ง-1 ผลของปริมาณซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร.....	82
ง-2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม).....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ).....	83
ง-4 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรุ่ม).....	84
ง-5 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม).....	84
ง-6 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ).....	85
ง-7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรุ่ม).....	85
ง-8 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม).....	86
ง-9 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ).....	86
ง-10 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรุ่ม).....	87
ง-11 ผลของลักษณะของน้ำที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวคั้งที่ ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร.....	88
ง-12 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม).....	89
ง-13 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ).....	90
ง-14 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรุ่ม).....	91
จ-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	93
จ-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ-16 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	100
จ-17 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (คล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	101
จ-18 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	101
จ-19 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	102
จ-20 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	102
จ-21 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	103
จ-22 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	103
จ-23 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	104
จ-24 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร.....	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ-25 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (คววม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	105
จ-26 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	105
จ-27 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรวม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร.....	106
ฉ-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	108
ฉ-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	108
ฉ-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ	109
ฉ-4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียชุมชนท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ	109
ช-1 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนของระบบที่ 1 (คววม) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรวม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร	111
ช-2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรวม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร.....	112
ช-3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของระบบที่ 1 (คววม) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรวม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร.....	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชั้นตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์.....	10
2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน.....	12
2.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวนอน.....	13
2.4 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้ง.....	14
2.5 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์.....	16
2.6 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์.....	17
2.7 ลักษณะของพืชลอยน้ำ.....	18
2.8 ลักษณะของพืชใต้อ่างน้ำ.....	19
2.9 ลักษณะของพืชใต้น้ำ.....	20
2.10 ดินค้ำน้ำ.....	22
2.11 ดินกร่ม.....	22
2.12 กลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบึงประดิษฐ์ (ก) สภาวะที่มีอากาศ (ออกซิเจนจาก บรรยากาศ) (ข) สภาวะที่มีอากาศ (ออกซิเจนจากรากพืช) (ค) สภาวะไม่มีอากาศ.....	24
2.13 กลไกการกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์.....	27
3.1 ภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้ง (ก) โครงสร้างภายในระบบบึงประดิษฐ์ (ข) ท่อทางออกของน้ำ.....	38
3.2 การเก็บตัวอย่างแบบไม่ทำลายโครงสร้าง (undisturbed sample).....	39
4.1 เปรียบเทียบการกระจายตัว และการสะสมตัวของสารในระบบที่เวลาต่างๆ (ก) ระบบที่ 1 ควบคุม (ข) ระบบที่ 2 ค้ำน้ำ (ค) ระบบ 3 กร่ม.....	46
4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์คาร์บอน ทีเคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมด ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้งด้วยพืชต่างชนิดกัน.....	48
4.3 การเปรียบเทียบภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 ควบคุม (ข) ระบบที่ 2 ค้ำน้ำ (ค) ระบบ 3 กร่ม.....	51
4.4 การเปรียบเทียบปริมาณซีโอดีที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้น เริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 ควบคุม (ข) ระบบที่ 2 ค้ำน้ำ (ค) ระบบที่ 3 กร่ม.....	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.5 การเปรียบเทียบปริมาณทีเคเอ็นที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตรที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 ควบคุม (ข) ระบบที่ 2 คล้ำน้ำ (ค) ระบบที่ 3 გრამ.....	58
4.6 การเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตรที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 ควบคุม (ข) ระบบที่ 2 คล้ำน้ำ (ค) ระบบที่ 3 გრამ.....	59
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ทีเคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมดด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวลิ่งในน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	60

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
COD	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้สารเคมี
TOC	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
TKN	ผลรวมของเจลดาคาร์บอนในโตรเจน
TP	ฟอสเฟตทั้งหมด
DO	ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
FWS	ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน
HF	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวราบ
HRT	ระยะเวลาการกักเก็บน้ำต่อหน่วยพื้นที่
SF	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน
VF	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก.ซีโอดี/ล.	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ชม.	เซนติเมตร
ml	มิลลิลิตร
°C	องศาเซลเซียส
กก./ตรม.	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
กก./วัน.ลบม.	กิโลกรัมต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร
ล./วัน	ลิตรต่อวัน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค และบริโภคในบ้านเรือน การผลิตทางอุตสาหกรรม และเกษตรกรรมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ถ้าน้ำเสียเหล่านี้ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดอย่างถูกต้อง อาจทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำได้ อัตราการเกิดน้ำเสียจากสถิติการใช้น้ำประปาโดยเฉลี่ยเพื่อการอุปโภค และบริโภค โดยอัตราการเกิดน้ำเสียจะมีค่าประมาณร้อยละ 70 - 80 ของปริมาณน้ำใช้ ซึ่งน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ จะมีลักษณะแตกต่างกัน นอกจากจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ต่างๆ แล้วยังมีการปนเปื้อนของสารเคมีมากกว่า 80,000 ชนิด (เกรียงศักดิ์, 2539) โดยส่วนใหญ่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล และอาคารขนาดใหญ่ ต้องผ่านกระบวนการบำบัดสารปนเปื้อนต่างๆ ให้มีค่าอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ (คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2538) แต่น้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากที่พักอาศัย และอาคารขนาดเล็กต่างๆ ในเขตชุมชน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการใช้น้ำในกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ เช่น น้ำเสียจากห้องสุขา การอาบน้ำ กิจกรรมในครัวเรือน การซักผ้า และทำความสะอาดยังขาดการจัดการที่ดี ในอดีตน้ำทิ้งจากบ้านเรือนมักถูกมองข้ามเนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะเจือจาง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติส่งผลให้ไม่เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำทิ้งชุมชนนี้ไม่สามารถถูกบำบัดโดยกระบวนการทางธรรมชาติได้ทันเวลาทำให้เกิดปัญหาน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีตกตะกอน โดยใช้สารเคมี ได้แก่ การใช้สารส้ม หรือการบำบัดทางกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ วิธีการเติมอากาศ (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor) วิธีนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากมีการใช้พลังงานในการดำเนินการสูง (เกรียงศักดิ์, 2539) รวมทั้งยังมีทัศนียภาพที่ไม่ชวนมอง นอกจากนี้ ยังเกิดกากตะกอนที่ต้องถูกบำบัดต่อไปเป็นจำนวนมาก ดังนั้น ระบบกำจัดน้ำเสียที่ไม่ต้องใช้สารเคมีและพลังงานในการบำบัดจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากน้ำทิ้งจากชุมชนส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ และมีความเข้มข้นไม่สูง ทำให้สามารถบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ ระบบบึงประดิษฐ์เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทางธรรมชาติในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์ ซึ่งการบำบัดโดยระบบบึงประดิษฐ์ ส่วนใหญ่ใช้พืชจำพวกที่อาศัยอยู่ในน้ำช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบ โดยรากพืชเป็นตัวยึดเกาะของ

จุลินทรีย์ และเป็นตัวพาออกซิเจนให้แทรกผ่านลงไปดินทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตในชั้นดินที่ลึกลงไปได้ พืชที่นิยมใช้ คือ ต้นอ้อ (*Phragmites australis*) ต้นรูปฤาษี (*Typha* sp.) ต้นกกกลม (*Scirpus* sp.)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง (Subsurface Vertical-Flow Constructed Wetland) โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของพืช ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และระดับความลึกของตัวกลางในระบบ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง ทำให้ได้ระบบบำบัดที่ไม่ใช้สารเคมี สะดวกไม่ซับซ้อน และใช้พลังงานในการดำเนินการเพียงเล็กน้อย เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ และไม่ต้องกำจัดกากตะกอน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงแรม หรือสถานประกอบการ โดยสามารถสร้างระบบบำบัดนี้ ในพื้นที่ของสวนหย่อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง ได้แก่ ชนิดของพืช ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และระดับความลึกต่างๆ ของระบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง (pilot scale) ที่ประกอบจากแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.6 เมตร สูง 0.8 เมตร ภายในบรรจุกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่มีความสูง 0.1 เมตร จากก้นถึงต่อด้วยทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 -1.0 มิลลิเมตร สูง 0.6 เมตร ใช้กระดาษสีดำปิดรอบถัง เพื่อจำลองสภาพภายใต้ชั้นดินที่ไม่ได้รับแสง ท่อน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์มี 4 ระดับความลึก คือ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพืชที่ใช้ในการศึกษา คือ กกร่ม (*Cyperus involcratus* Rottb.) และ คล้าน้ำ (*Thalla geniculata* L.)

1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งที่ปลูกพืช คือ ต้นกล้วยน้ำ และต้นกรรรม

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ที่ความเข้มข้นของซีโอไซด์ต่างๆ ได้แก่ 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอไซด์ต่อลิตร พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ซีโอไซด์ ทีโอไซด์ ทีเคเอ็น ฟอสเฟตทั้งหมด ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ดีไอ พีเอช โดยระยะเวลาในการกักเก็บของระบบ (HRT) 5 วัน

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง ที่ระดับความลึกของชั้นตัวกลาง ที่ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งในการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน

1.4.2 สามารถบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากบ้านเรือน และชุมชน และสร้างทัศนียภาพให้ ความสวยงาม โดยใช้ระบบที่ไม่ซับซ้อน สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

1.4.3 ลดการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย (Wastewater)

น้ำที่ผ่านการใช้งานในกิจกรรมต่างๆ และมีการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อน (contaminants) หรือสารมลพิษ (pollutants) ในปริมาณมากจนไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำนั้นได้ สารปนเปื้อนอาจเป็นสารอินทรีย์ และหรือสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย หรือไม่ละลาย ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดของน้ำเสียดังนี้

2.1.1 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) เป็นน้ำเสียที่เกิดจากบ้านเรือน สถานประกอบการ เช่น ภัตตาคาร ศูนย์การค้า โรงแรม สำนักงาน เป็นต้น ลักษณะของน้ำเสียชุมชนจะมีค่าพีเอชเป็นกลาง มีทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่เป็นของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ โดยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก อาจมีเชื้อโรคปะปนอยู่ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ซึ่งปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือน อาคาร มีประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้หรืออาจประเมินได้จากจำนวนประชากรหรือพื้นที่อาคาร เนื่องจากจำนวนประชากรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณน้ำเสียเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะแสดงในรูปอัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยปริมาณน้ำเสียขึ้นอยู่กับประเภทของกิจกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.2 (<http://www.pcd.go.th>)

ตารางที่ 2.1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน (<http://www.pcd.go.th>)

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน/วัน)					
	พ.ศ.2535	พ.ศ.2540	พ.ศ.2545	พ.ศ.2550	พ.ศ.2555	พ.ศ.2560
กลาง	160 - 214	165 - 242	170 - 288	176 - 342	183 - 406	189 - 482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออก เฉียงเหนือ	200 - 253	216 - 263	239 - 277	264 - 291	291 - 306	318 - 322
ใต้	171	195	204	226	249	275

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ (<http://www.pcd.go.th>)

ประเภทอาคาร	หน่วย	ลิตรต่อวันต่อหน่วย
อาคารชุด/บ้านพัก	ยูนิต	500
โรงแรม	ห้อง	1,000
หอพัก	ห้อง	80
สถานบริการ	ห้อง	400
หมู่บ้านจัดสรร	คน	180
โรงพยาบาล	เตียง	800
ภัตตาคาร	ตารางเมตร	25
ตลาด	ตารางเมตร	70
ห้างสรรพสินค้า	ตารางเมตร	5.0
สำนักงาน	ตารางเมตร	3.0

องค์ประกอบน้ำเสียชุมชนประกอบด้วย

1) สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันที่เกิดจากการประกอบอาหาร สามารถถูกย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลดลง ส่งผลให้น้ำเกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำ นิยมวัดในรูปค่าบีโอดี (BOD) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก

2) สารอินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต เป็นต้น

3) โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ หรืออนินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น พรอท โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากการเกษตรกรรมสำหรับในเขตชุมชนอาจมีการปนเปื้อนของสารมลพิษนี้จากอุตสาหกรรมขนาดเล็กบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

4) ไขมันและสารแขวนลอยต่าง ๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงของพืชสีเขียวในน้ำ และกีดขวางการละลายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสภาพขุ่นมอง

5) ของแข็ง เมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

6) สารก่อให้เกิดฟอง/สารซักฟอก ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ ฟองจะกีดกันการละลายของออกซิเจนในอากาศสู่น้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

7) จุลินทรีย์ ในน้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือโรงงานอาหารกระป๋อง จะมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก จุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต จึงทำให้ออกซิเจนละลายน้ำลดลง ส่งผลให้เกิดน้ำเสียสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้ จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น จุลินทรีย์ในน้ำทิ้งจากโรงพยาบาล

8) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae boom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงมากโดยเฉพาะในช่วงกลางคืน อีกทั้งยังทำให้วัชพืชในน้ำ เจริญเติบโตได้ดี ทำให้เกิดปัญหาเกิดขวางการสัญจรทางน้ำ

9) กลิ่น เกิดจากสารที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกลิ่นอื่น ๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิต เช่น โรงงานทำปลาป่น โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น (<http://www.pcd.go.th>)

ลักษณะของน้ำเสียชุมชนแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ สกปรกมาก ปานกลาง และน้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งในประเทศไทยน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่จะจัดอยู่ในระดับน้ำเสียที่มีความสกปรกน้อยถึงปานกลาง

ตารางที่ 2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชนทั่วไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
1. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)		350	720	1,200
- ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved solids)	มก./ล	250	500	850
- ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids)		100	220	350
2. ปริมาณตะกอนหนัก (Settable solids)	มล./ล	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand; BOD)	มก./ล.	110	220	400
4. ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand; COD)	มก./ล.	250	500	1,000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)		20	40	85
- อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen)		8	15	35
- แอมโมเนีย (Free ammonia)	มก./ล.	12	25	50
- ไนไตรท์ (Nitrites)		0	0	0
- ไนเตรท (Nitrates)		0	0	0

ตารางที่ 2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชนทั่วไป (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)		4	8	15
- สารอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic phosphorus)	มก./ล.	1	3	5
- สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัส (Inorganic phosphorus)		3	5	10
7. คลอไรด์ (Chloride) ⁽¹⁾	มก./ล.	30	50	100
8. ซัลเฟต (Sulfate) ⁽¹⁾	มก./ล.	20	30	50
9. สภาพด่าง (Alkalinity : CaCO ₃)	มก./ล.	50	100	200
10. ไขมัน (Grease)	มก./ล.	50	100	150
11. โคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coli form)	MPN/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

หมายเหตุ : (1) เป็นค่าที่เพิ่มจากค่าที่ตรวจพบในน้ำใช้ปกติ

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน นิยมใช้วิธีตกตะกอนโดยใช้สารเคมี ได้แก่ การใช้สารส้ม หรือการบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) วิธีเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากการใช้พลังงานในการดำเนินการสูง (เกรียงศักดิ์, 2539)

2.1.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มีค่าความสกปรกสูงกว่าน้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักสามารถบำบัดได้ง่าย ส่วนน้ำเสียโลหะหนัก หรือสารเคมีปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เช่น โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ชุบโลหะ แบตเตอรี่ ปิโตรเคมี เป็นต้น จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีสารปนเปื้อนก่อนข้างสูง โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์จึงจำเป็นต้องผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นก่อน (pretreatment)

2.2 ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland System)

ระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์โดยธรรมชาติ ที่เรียกว่า ระบบบึงธรรมชาติ แต่มีการออกแบบมาเพื่อลดข้อด้อยของระบบบึงตามธรรมชาติ โดยมีการปรับปรุงชนิดพืช รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ ของระบบ ระบบสามารถสร้างได้จากดินที่มีน้ำท่วมขัง ซึ่งมีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ หรืออาจใช้ตัวกลางอื่นๆ ได้แก่ หินบด ทราย กรวด

ดิน พืชโดยส่วนใหญ่ที่นิยมใช้เป็นพืชน้ำ ได้แก่ ต้นอ้อ (*Phragmites australis*) ต้นธูปฤาษี (*Typha sp.*) ต้นกกกลม (*Scirpus sp.*)

โดยทั่วไป ระบบที่บำบัดด้วยวิธีทางธรรมชาติจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบที่ใช้เทคโนโลยี อย่างไรก็ตามระบบบึงประดิษฐ์มีข้อจำกัดของการบำบัดน้ำเสีย คือ มีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย(HRT) ที่สั้น ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำออก เมื่อน้ำเสียมีค่าการระสารถีสูง ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์จึงจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย ทำให้ต้องใช้พื้นที่มากกว่าระบบอื่นๆ (Polprasert, 1998)

2.2.1 องค์ประกอบของระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland Component)

สำหรับบำบัดน้ำเสีย และสิ่งปฏิกูลมีดังต่อไปนี้

2.2.1.1 ชั้นตัวกลาง (Substrata)

ชั้นตัวกลางที่เลือกนำมาใช้ในระบบบึงประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ ได้แก่ กรวด หิน ดิน ทราช โดยจะใช้ชนิดเดียว หรือใช้หลายชนิดรวมกันก็ได้ ช่องว่างในชั้นตัวกลางนี้จะใช้เป็นช่องของการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งถ้าชั้นตัวกลางมีช่องว่างระหว่างอนุภาค (Void) มาก จะทำให้อากาศสามารถผ่านช่องว่างลงสู่ด้านล่างของระบบได้ดี ซึ่งความพรุนของชั้นตัวกลาง (Total porosity, E) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ 2.1 และ 2.2 (Dane, 2002)

$$E = \frac{100e}{1+e} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_b} - 1 \quad (2.2)$$

เมื่อ

e = อัตราส่วนของช่องว่าง

E = ร้อยละของความพรุนของตัวกลาง

โดยความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_b) และปริมาตรรวม (V_b) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_b} \quad (2.3)$$

เมื่อ

m_s = มวลแห้งของตัวกลาง (กรัม)

V_b = ปริมาตรรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$V_b = \pi r^2 h \quad (2.4)$$

เมื่อ

r = รัศมีของ Core (เซนติเมตร)

h = ความสูงของ Core (เซนติเมตร)

และความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density, ρ_s) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ 2.5

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (2.5)$$

m_1 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตร (กรัม)

m_2 = น้ำหนักตัวกลางกับขวดวัดปริมาตร (กรัม)

m_3 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรที่บรรจุตัวกลางและปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ไล่อากาศแล้ว (กรัม)

m_4 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรที่ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ไล่อากาศ (กรัม)

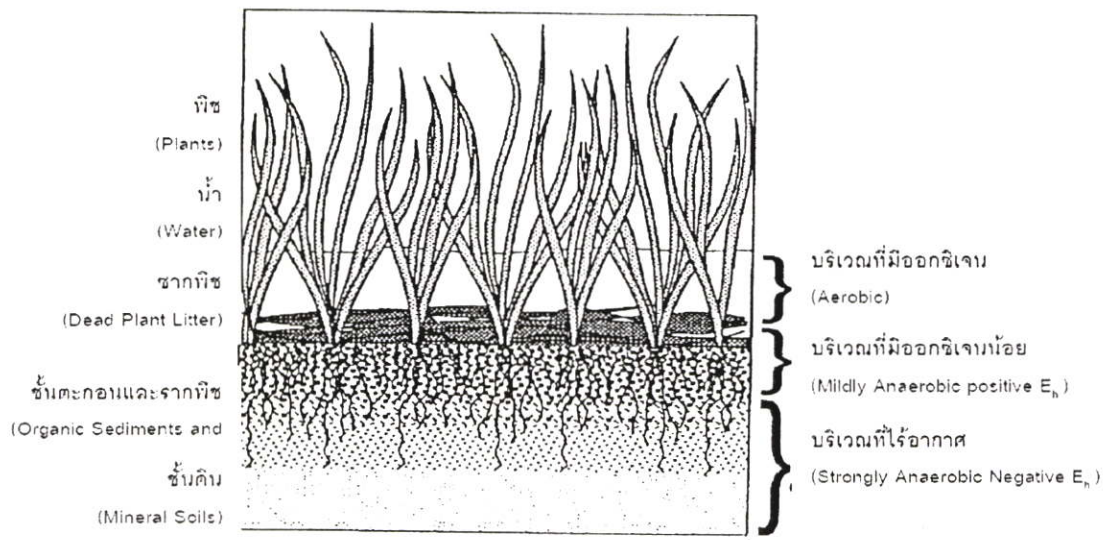
นอกจากชั้นตัวกลางจะเป็นที่อยู่ของพืช และที่ยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์แล้ว ชั้นตัวกลางยังเป็นพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ ลักษณะทางกายภาพของชั้นตัวกลางมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย ตัวอย่างเช่น ชั้นตัวกลางที่เป็นทราย หรือกรวด นิยมใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย เพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบ และพืชสามารถยึดเกาะได้ง่าย

ชั้นตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับแยกตามปริมาณของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้แก่ (www.pcd.go.th)

1) บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบบึงประดิษฐ์ บริเวณนี้น้ำเสียจะสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้

2) บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Mildly anaerobic Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน (Aerobic Zone) ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตาม ระบบรากของพืชที่ยึดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ชั้นตัวกลางได้บางส่วน

3) บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly anaerobic Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นล่างสุดของชั้นตัวกลาง ในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้อากาศ



รูปที่ 2.1 ชั้นตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์ (www.pcd.go.th)

2.2.1.2 จุลินทรีย์ (Microbial Organisms)

จุลินทรีย์ที่พบในระบบบึงประดิษฐ์ มีมากมายหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโปรโตซัว ซึ่งจุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียประมาณ 95% (คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2538)

จุลินทรีย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) แบคทีเรียชนิดแขวนลอย คือ แบคทีเรียที่เจริญเติบโต และอาศัยอยู่ในบริเวณผิวน้ำของระบบบึงประดิษฐ์ เป็นแบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพ
- 2) แบคทีเรียชนิดเกาะติด คือ แบคทีเรียที่เจริญเติบโต และอาศัยอยู่ในส่วนที่จมอยู่ในน้ำของพืช (ราก, ลำต้น) ในดิน ทราช หรือเกาะบนตัวกลางโดยตรงสำหรับระบบบึงประดิษฐ์ แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน นอกจากนี้จุลินทรีย์ต่างๆ ยังสะสมอยู่ในชั้นตะกอนบริเวณด้านล่างของระบบบึงประดิษฐ์ด้วย

โดยทั่วไปจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหารและพลังงานสำหรับการดำรงชีพ ซึ่งแหล่งพลังงานหลักของจุลินทรีย์ คือ สารอินทรีย์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์ชนิด heterotroph จะใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ส่วนจุลินทรีย์ชนิด autotroph จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ในระบบบึงประดิษฐ์จะมีการจัดสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดของเสีย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบบึงประดิษฐ์ (คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2538)

1) สารอาหาร สารอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ โปรตีนคาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือแร่ วิตามิน และน้ำ สำหรับเกลือแร่ที่ใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ Mg, K, Mn, Fe, P, S, Na และ Ca เป็นต้น ส่วนธาตุที่ต้องการในปริมาณที่น้อย เช่น Co และ Mo เป็นต้น ธาตุคาร์บอนได้จากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย ธาตุไนโตรเจนได้จากโปรตีน และสารอนินทรีย์ที่มีอนุมูล NO_3^- , NO_2^- , NH_3^+ เป็นต้น

2) อุณหภูมิ แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่างกัน ได้แก่

- เจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Psychrophile) อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ $15 - 20^\circ\text{C}$

- เจริญได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophile) อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ $20 - 45^\circ\text{C}$

- เจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Thermophile) อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ $45 - 55^\circ\text{C}$

3) ปริมาณออกซิเจน แบคทีเรียต้องการออกซิเจนประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) แหล่งสารอาหาร เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ชนิด

autotroph

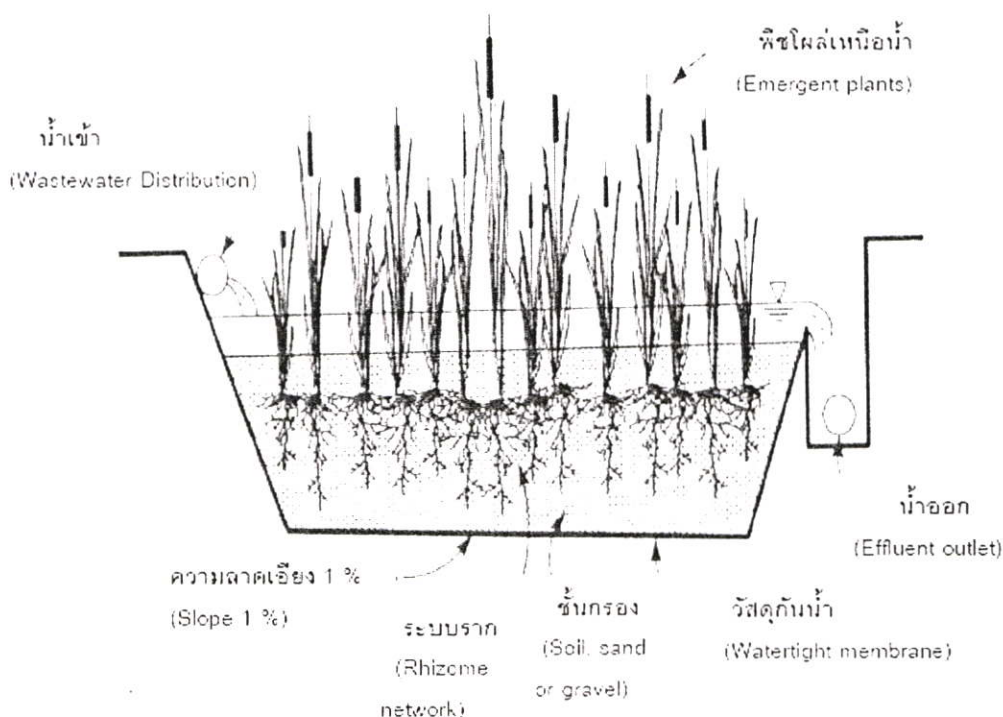
5) พีเอช แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 5 - 9

6) แสงแดด

2.2.2 ประเภทของระบบบึงประดิษฐ์ที่แบ่งตามลักษณะการไหลของน้ำเสีย

สามารถแบ่งประเภทของระบบบึงประดิษฐ์ตามลักษณะการไหลของน้ำเสียเป็น 2 ประเภท (Polprasert, 1998) คือ

2.2.2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System, FWS) เป็นระบบที่มีน้ำท่วมบนผิวดิน ประกอบด้วยบ่อที่น้ำไหลซึมได้น้อย อาจมีหนึ่งบ่อถึงหลายบ่อวางเรียงกัน แต่ละบ่อมีความลึกประมาณ 10-60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบควรปล่อยให้ไหลอย่างช้า ๆ ผ่านราก ลำต้น และใบพืช การเติมอากาศในระบบได้จากลมที่พัดและการสังเคราะห์แสงของพืช ระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีปานกลางคือ ไม่เกิน 6 กิโลกรัมของบีโอดี/(ตารางเมตร.วัน) เวลาพักเก็บควรอยู่ในช่วง 1-4 วัน และใช้ค่าการบำบัดทุกทางชลศาสตร์ 0.01-0.05 ลูกบาศก์เมตร/(ตารางเมตร.วัน) (เกรียงศักดิ์, 2539) การออกแบบมักสร้างเป็นบึงที่มีลักษณะแคบและยาว เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียเป็นไปในลักษณะไหลเป็นช่วง (Plug flow) ใช้พืชในกลุ่มที่มีรากในดินและมีส่วนโผล่พ้นน้ำ (Emergent plants) การกำจัดมลสารเกิดบริเวณส่วนรากของพืชบริเวณใต้น้ำและซากพืชบริเวณหน้าดินซึ่งจะเป็นที่ขีดย่อยของจุลินทรีย์ ควรปูพื้นบ่อด้วยวัสดุกันซึม เพื่อป้องกันมิให้น้ำเสียมีการรั่วซึมออกไปปนเปื้อนกับแหล่งน้ำอื่น ๆ



รูปที่ 2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (www.pcd.go.th)

ข้อดี

1. มีค่าก่อสร้างระบบน้อยกว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวนอนและระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวนวดิ่ง

2. ดูแลรักษาง่าย
3. ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย
4. ระบบไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป

ข้อเสีย

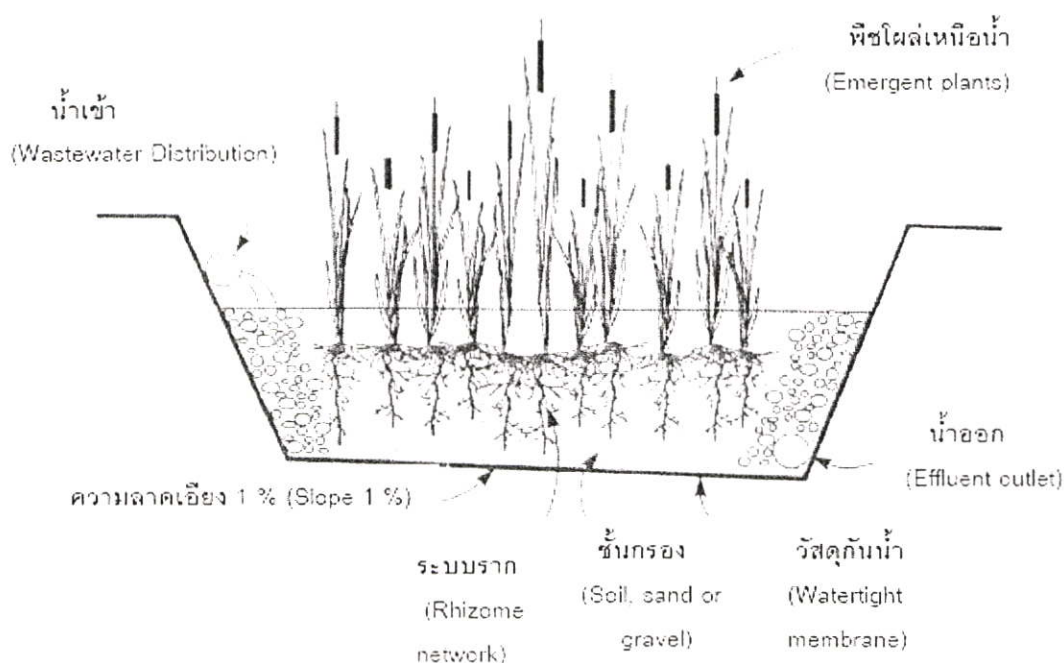
1. ที่ต้องใช้พื้นที่มาก
2. ต้องการระยะเวลาในการกักเก็บน้ำที่นาน เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณ

ไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัสสูง (www.pcd.go.th)

2.2.2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow System, SF) เป็นระบบที่ไม่มีน้ำท่วมขังบนผิวดิน ทำให้ไม่เกิดปัญหาการเน่าเหม็นของน้ำเสีย และแหล่งเพาะพันธุ์ยุงตัวกลางที่เหมาะสม ได้แก่ หินบด กรวด ทราย ดิน ปูพื้นบ่อด้วยวัสดุกันซึม เช่น แผ่นพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) หรือดินเหนียว เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำเสียออกจากบ่อ ปรับให้ก้นบ่อมีความลาดชันประมาณ 1 % เพื่อให้น้ำไหลไปยังทางน้ำออกได้สะดวก บริเวณทางน้ำออกมีท่อเจาะรูทำหน้าที่รวบรวมน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบ กลไกในการบำบัดจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางในสภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic conditions) และไหลผ่านรากพืช ระบบนี้อาศัย

การเติมอากาศโดยรากพืชเป็นหลัก ออกซิเจนที่แทรกผ่านตัวกลางตามรากพืชจะช่วยในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณดังกล่าว ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการบำบัดน้ำเสีย บึงประดิษฐ์แบบนี้สามารถแยกย่อยออกเป็น 2 ชนิด (Brix, 1994) คือ

1) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวนอน (Horizontal subsurface flow, HF) นิยมใช้พืชในกลุ่มไหลพื้นน้ำ การออกแบบทางน้ำเข้าและออกจะต้องให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางอย่างช้า ๆ ในแนวนอน โดยจะกระจายเข้าสู่ระบบตลอดความกว้างบ่อและวางท่อรวบรวมน้ำออกจากระบบตลอดความกว้างของบ่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวนอน (U.S.EPA, 2000(a))

ข้อดีของแบบน้ำไหลแนวนอน

- 1) เพิ่มระยะทางในการไหลของน้ำ (Volker *et al.*, 2001)
- 2) เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)
- 3) Life cycle ของระบบ มีระยะยาว
- 4) สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลบนผิวดิน

และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า (www.pcd.go.th)

ข้อเสียของแบบน้ำไหลแนวนอน

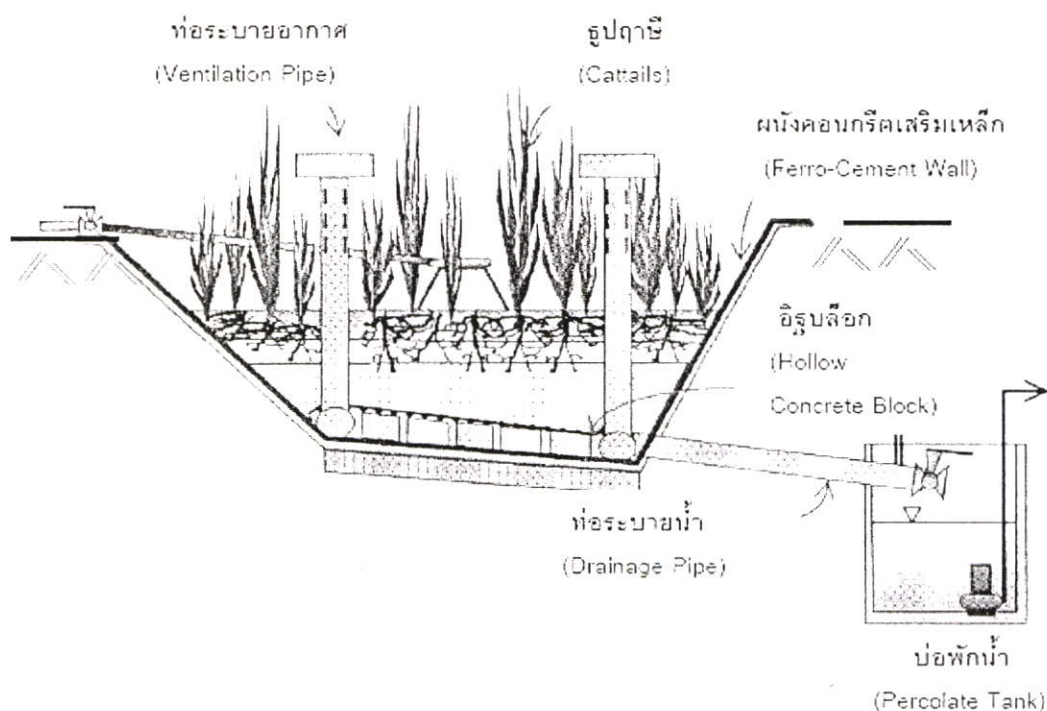
- 1) ต้องการพื้นที่มาก (Volker *et al.*, 2001)
- 2) ค่าก่อสร้างที่สูงกว่าบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลบนผิวดิน เพราะต้องคำนึงถึงชั้นกรอง

และระบบท่อที่จะใช้ภายในระบบ

3) เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงและยุง
 4) มีข้อจำกัดในการบำบัดไนโตรเจน เพราะ กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) จะเกิดขึ้นได้ยาก ถ้าระบบมีสภาพไร้ออกซิเจนในบางส่วน ดังนั้น ถ้าน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูง จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มเวลาในการเก็บกัก ซึ่งจะส่งผลให้ความต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างระบบ เพิ่มมากขึ้น (www.pcd.go.th)

2) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง (Vertical subsurface flow, VF)

นิยมใช้พืชในกลุ่มไหลพื้นน้ำ การออกแบบทางน้ำเข้าและออก จะต้องทำให้น้ำเสียเกิดการไหลผ่านตัวกลางอย่างช้า ๆ ในแนวดิ่ง โดยกระจายน้ำเข้าสู่ระบบเต็มพื้นที่ด้านบนของบ่อ และวางท่อรวบรวมน้ำและออกจากระบบกระจายเต็มพื้นที่ด้านล่างบ่อ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง (U.S.EPA, 2000 (b))

ข้อดีของแบบน้ำไหลแนวดิ่ง

- 1) ต้องการพื้นที่น้อย (Volker *et al.*, 2001)
- 2) เกิดไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)
- 3) มีการไหลของน้ำที่ไม่ซับซ้อน
- 4) มีความสามารถในการบำบัดได้ตั้งแต่ในขั้นแรก
- 5) ง่ายต่อการควบคุมดูแล และบำรุงรักษา

ข้อเสียของแบบน้ำไหลแนวดิ่ง

- 1) ระยะเวลาในการไหลของน้ำสั้น (Volker *et al.*, 2001)

2) การเหี่ยว และร่วงโรยของพืชในระยะเริ่มต้นของการเดินระบบ ในกรณีที่ใช้ระบบในการบำบัดสิ่งปฏิกูลซึ่งความเข้มข้นสูง (www.pcd.go.th)

2.2.3 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์สามารถออกแบบให้ใช้กับการไหลแบบใดแบบหนึ่ง หรือหลายแบบก็ได้แก่ การไหลเป็นช่วง (Plug Flow), การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้น (Step Feed) หรือการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ (Recirculation)

2.2.3.1 การไหลเป็นช่วง (Plug-Flow) (รูปที่ 2.5 ก) ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน การไหลแบบนี้ นิยมใช้กับระบบบึงประดิษฐ์ขนาดเล็กและมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไม่มากนัก

1) ข้อดีของการไหลเป็นช่วง คือ มีค่าก่อสร้างต่ำ ใช้พลังงานน้อย และต้องการการควบคุม ดูแลรักษาค่อนข้างต่ำ

2) ข้อจำกัดของการไหลเป็นช่วง คือ ไม่เหมาะที่จะใช้กับระบบบึงประดิษฐ์ที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และมีค่าความยาวต่อความกว้าง มากกว่า 10:1

2.2.3.2. การเติมน้ำเสียแบบเป็นขั้น (Step Feed) (รูปที่ 2.5 ข) จะมีผลในการกำจัดของแข็งได้ดี เมื่อเป็นระบบไหลตามแนวคิ่ง และรับน้ำออกบริเวณด้านล่างของบ่อ การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้นนี้สามารถทำควบคู่ไปกับการสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับเข้าสู่ระบบ (Recirculation) การเติมน้ำเสียแบบนี้ นิยมใช้กับระบบบึงประดิษฐ์ที่มีความยาวต่อความกว้าง มากกว่า 10:1

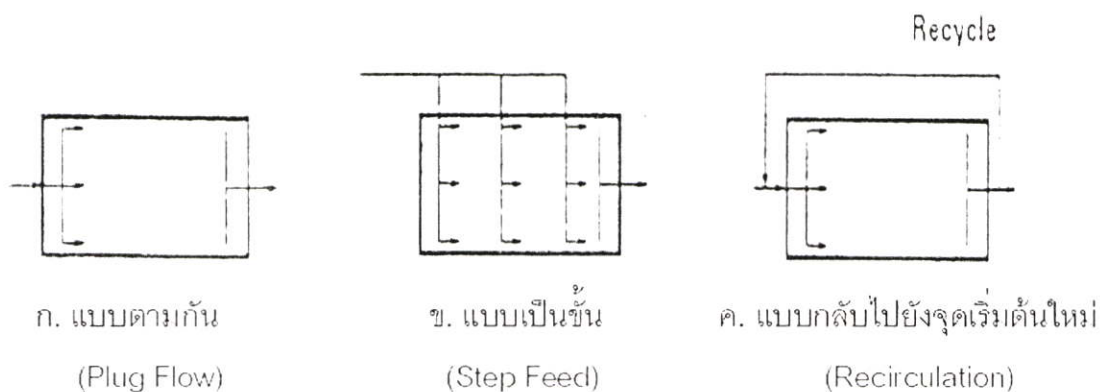
1) ข้อดีของการไหลแบบเป็นขั้น คือ น้ำเสียที่เข้าระบบมีการกระจายอย่างทั่วถึงบนระบบบึงประดิษฐ์ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการไหลเป็นช่วง

2) ข้อจำกัดของการไหลแบบเป็นขั้น คือ รูปแบบการไหลแบบนี้ต้องการงบประมาณในการก่อสร้างสูง เพราะต้องมีการติดตั้งระบบท่อ ระบบควบคุมการจ่ายน้ำมากกว่าการไหลเป็นช่วง (Plug-Flow)

2.2.3.3 การหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ (Recirculation) (รูปที่ 2.5 ค) กำลังได้รับความสนใจและมีแนวโน้มที่จะมีการลงทุนก่อสร้างมากขึ้น เป็นระบบที่มีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าสู่ระบบใหม่ ซึ่งจะช่วยเจือจางปริมาณสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยที่เข้ามาในระบบ และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

1) ข้อดีของการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ คือ สามารถช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และช่วยทำให้ระบบมีระยะเวลาเก็บน้ำมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Steiner and Freeman, 1989)

2) ข้อจำกัดของการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ คือ มีค่าใช้จ่ายสูงในการก่อสร้าง และการดูแลรักษาระบบ ตลอดจนต้องควบคุมปริมาณน้ำที่ต้องสูบกลับ เพื่อควบคุมปริมาณและระยะพักน้ำที่เข้าระบบ



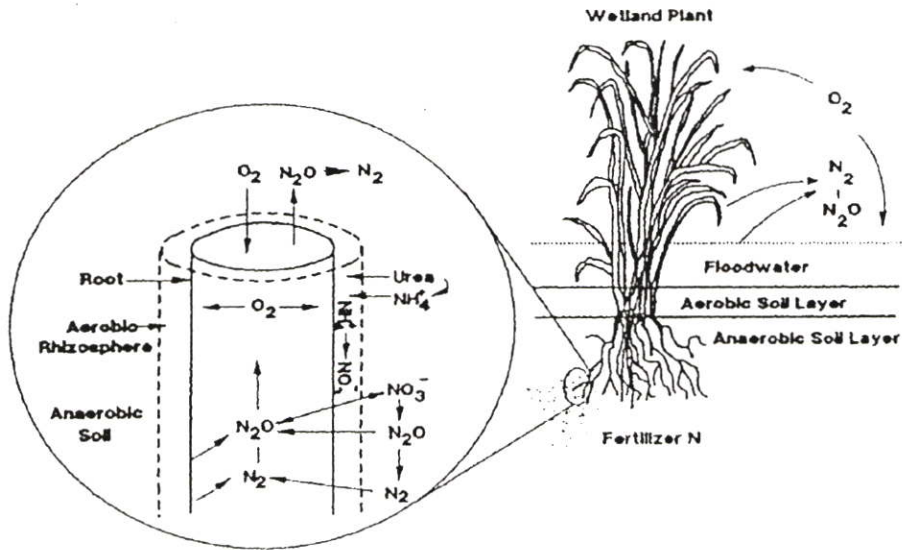
รูปที่ 2.5 รูปแบบการไหลของน้ำในบึงประดิษฐ์

2.2.4 พืชในระบบบึงประดิษฐ์

พืชในระบบทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ แลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศสู่รากพืช (Root-zone) ทั้งยังช่วยให้แสงแดดกระทบผิวน้ำน้อยลง ซึ่งถือเป็นการป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่าย (Algae) ในน้ำทางอ้อม เนื่องจากพืชสามารถนำสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียไปใช้ได้เพียงเล็กน้อยจึงไม่มีหน้าที่หลักในการย่อยสลาย และดูดซึมสารอินทรีย์คาร์บอน

2.2.4.1 หน้าที่ของพืชในระบบบึงประดิษฐ์ มีหน้าที่หลักในการลำเลียงออกซิเจน ระบบรากพืชในบึงประดิษฐ์จะเจริญเติบโตอยู่ในชั้นดินหรือแทรกตัวเข้าไปในชั้นกรองที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวน้ำประมาณ 50 – 150 ซม. โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบ และลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convection) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนไปยังตอนล่างของระบบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งหน้าที่ต่างๆ ของพืชในระบบบึงประดิษฐ์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การแพร่กระจายของออกซิเจน พืชน้ำจะปล่อยออกซิเจนจากรากออกสู่บริเวณรอบๆ ลำต้นใต้ดินโดยอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายออกซิเจนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำกว่า (รูปที่ 2.6) ซึ่งการซึมของออกซิเจนออกจากปลายรากทำให้เกิดการออกซิไดซ์ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษของสารพิษต่างๆ ได้ นอกจากนี้ ระบบรากของพืชบางชนิดยังสามารถปล่อยสารปฏิชีวนะซึ่งสามารถทำลายเชื้อโรคบางอย่างในน้ำเสีย หรือปล่อยสารบางอย่างที่สามารถยับยั้งการเติบโตของพืชชนิดอื่นได้ (ศุวศา, 2544)



รูปที่ 2.6 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์

2) เป็นที่ยึดเกาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยส่วนลำต้น และใบของพืชที่อยู่ใต้น้ำจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ เนื้อเยื่อของพืชจะมีสาหร่ายที่สังเคราะห์แสงได้เกาะอยู่หนาแน่น รวมทั้งจุลินทรีย์ และโปรโตซัว เช่นเดียวกับรากและลำต้นใต้ดิน นอกจากนี้ ยังมีไบโอฟิล์มที่เกาะกับซากพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในระบบบึงประดิษฐ์ (ศุวสา, 2544)

3) พืชในระบบจะช่วยลดความเร็วของกระแส น้ำ เพิ่มเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสีย และพืชให้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้นอีกด้วย

4) การดูดซับสารอาหาร พืชจะดูดซับสารอาหารจำนวนมากทางราก อย่างไรก็ตาม ลำต้นที่อยู่ใต้น้ำและที่โผล่พ้นน้ำก็สามารถดูดซับสารอาหารได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสารอาหารที่ถูกดูดซับเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปโดยการตัดและการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบ พืชสามารถกำจัดฟอสฟอรัสถึง 30 – 150 กก./เฮกแตร์.ปี หรือ 0.003 – 0.015 กก./ตร.ม.-ปี และไนโตรเจนประมาณ 200 – 2500 กก./เฮกแตร์.ปี หรือประมาณ 0.02 – 0.25 กก./ตร.ม.-ปี (Brix และ Schierup, 1989) อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณสารอาหารที่ถูกกำจัดจากการเก็บเกี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ แต่ถ้ระบบไม่มีการเก็บเกี่ยวพืชออกสารอาหารในพืชจะถูกปลดปล่อยออกมาสู่ระบบอีกครั้งด้วยกระบวนการย่อยสลาย (Decomposition) (ศุวสา, 2544)

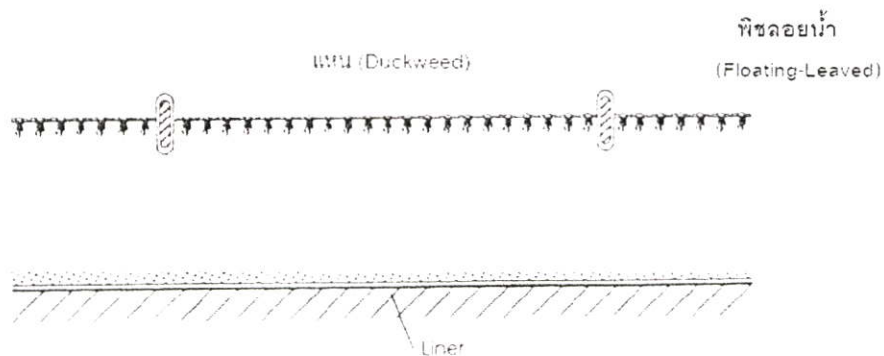
5) พืชที่อยู่ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการควบคุมการไหลของน้ำในแนวดิ่ง จะมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องทำให้มีการแผ่กระจายของรากและไรโซมไปทั่วชั้นกรองและทำให้เกิดช่องว่างขึ้นซึ่งจะช่วยป้องกันการอุดตันของชั้นกรองได้อีกทางหนึ่ง

2.2.4.2 ชนิด และลักษณะของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ พืชลอยน้ำ (Floating plant), พืชโผล่เหนือน้ำ (Emergent plant) และพืชใต้น้ำ (Submerged plant) ซึ่งพืชแต่ละ

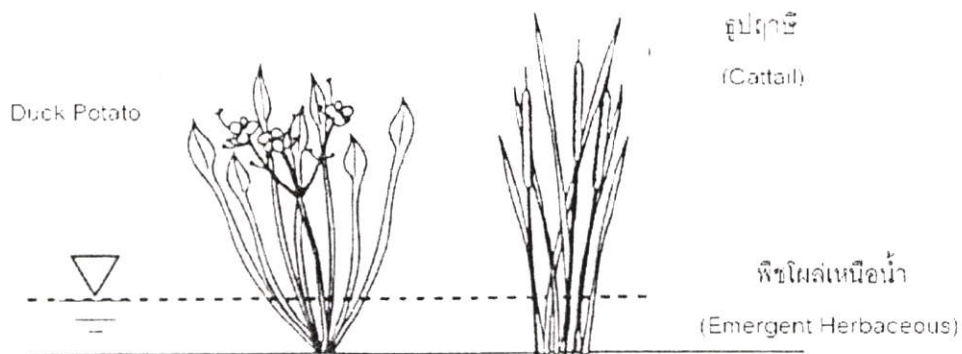
ประเภทจะมีคุณลักษณะและการเจริญเติบโตแตกต่างกันไป ในปัจจุบันนิยมเลือกใช้พืชพวกไหล่พื้นน้ำในระบบบึงประดิษฐ์มากกว่าพืชลอยน้ำ เนื่องจากพืชลอยน้ำไม่สามารถทนกับอากาศหนาวและศัตรูพืช ดังนั้นการเลือกชนิดของพืชสำหรับบึงประดิษฐ์ควรต้องคำนึงถึงลักษณะและความเหมาะสมของพืชแต่ละประเภท

1) พืชลอยน้ำ (Floating plant) เป็นไม้ที่สามารถปรับตัวให้เจริญเติบโตในน้ำและลอยอยู่ได้ หรือมีบางส่วนของต้นโผล่ขึ้นเหนือน้ำ ทั้งในน้ำตื้นๆ หรือลึกเป็นเมตรโดยลำต้นมีลักษณะโป่งพอง ภายในกลวง ใบแผ่แบน หรือมีรากที่เปลี่ยนเป็นนวมรอบๆต้น และมีรากฝอยละเอียดอยู่ในน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ ได้แก่ จอก แหน กระจับ ผักตบชวา ผักบุ้ง ผักแว่น จอกหูหนู เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะของพืชลอยน้ำ (Floating plant)

2) พืชโผล่เหนือน้ำ (Emergent plant) เป็นพืชน้ำที่มีรากเจริญอยู่ในดินใต้น้ำ ใบและดอกชูขึ้นเหนือน้ำ ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 ซึ่งแต่ละชนิดก็เติบโตได้ที่ระดับน้ำต่างๆ กัน ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ ได้แก่ บัวชนิดต่างๆ กกบางชนิด และกระจับญี่ปุ่น เป็นต้น พืชชนิดนี้เป็นพืชที่นิยมใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถปรับตัวและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดีและสามารถปลูกได้ทั้งในพื้นที่ชุ่มน้ำและพื้นที่น้ำท่วม คุณสมบัติพิเศษของพืชประเภทนี้ คือ ส่วนใบที่อยู่เหนือน้ำสามารถนำหรือลำเลียงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศไปยังส่วนรากพืชได้ ส่งผลทำให้ชั้นกรองในบริเวณที่รากพืชยึดเกาะไม่เกิดสภาพไร้อากาศ หน้าที่และบทบาทสำคัญ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของพืชประเภทนี้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.4

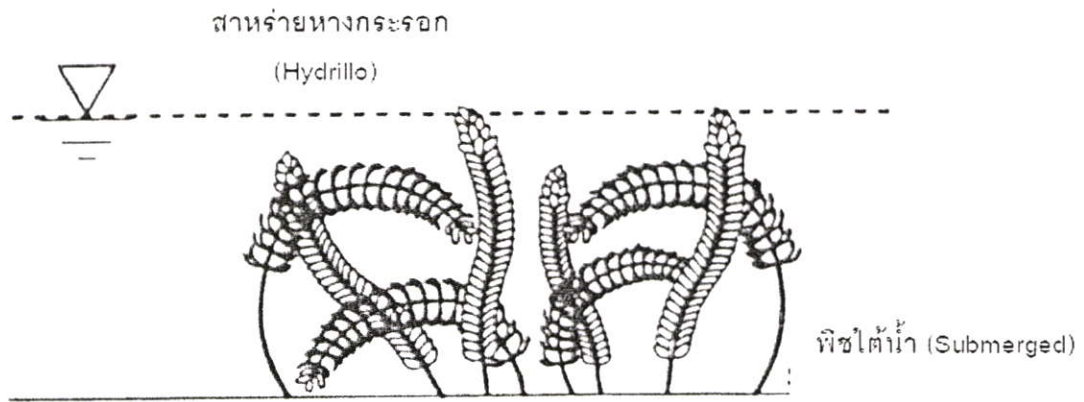


รูปที่ 2.8 ลักษณะของพืชโคล่เหนือน้ำ (Emergent plant)

ตารางที่ 2.4 หน้าที่ของพืชโคล่เหนือน้ำในระบบบึงประดิษฐ์ (ศุวสา, 2544)

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ลดความเข้มของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน - ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว - ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน - ช่วยให้ระบบดูสวยงาม - สะสมอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ลดความเร็วกระแส น้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ - กรองตะกอนขนาดใหญ่ - เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของไบโอฟิล์ม - ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน - ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำถูกกัดเซาะน้อย - ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบการไหลในแนวดิ่ง - ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลาย และการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน - ดูดซับสารอาหาร - ปล่อยสารปฏิชีวนะ (Antibiotic)

3) พืชใต้น้ำ (Submerged plant) เป็นพืชที่มีทุกส่วนของต้นอยู่ใต้น้ำ มีรากยึดเกาะกับดิน หรืออินทรีย์วัตถุใต้น้ำ หรือลอยอยู่ในน้ำเพื่อให้ต้นทรงตัวอยู่ได้ในระดับน้ำตั้งแต่ 20 ซม. จนถึง 2 เมตร ดังแสดงใน รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงชะโด ดิปลีน้ำ สันตะวาใบพาย เป็นต้น ถ้าระดับน้ำลึกมากๆ พืชประเภทนี้จะได้รับแสงน้อย และอาจไม่สามารถเจริญเติบโตได้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของพืชใต้น้ำ (Submerged plant)

ปัจจุบันพืชส่วนใหญ่ที่นิยมปลูกในระบบบึงประดิษฐ์มักจะเป็นพืชจำพวกธูปฤาษี, อ้อ, กก, แผลก และหญ้าทรงกระเทียม เพราะพืชเหล่านี้สามารถดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศได้ดี กล่าวคือ ประมาณ 5 - 45 กรัมออกซิเจน/ตารางเมตร-วัน ซึ่งความสามารถในการดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศของพืชจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและปริมาณออกซิเจนในดินหรือชั้นกรองด้วย (Reed *et al.*, 1988)

2.2.4.3 ปัจจัยในการพิจารณาเลือกพืชในระบบบึงประดิษฐ์

หน้าที่หลักของพืชในระบบบึงประดิษฐ์ คือ การควบคุมการไหลของน้ำเสีย เป็นที่ยึดเกาะ และเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ ดังนั้นการเลือกพืชที่จะใช้ในระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญปกติแล้วพันธุ์ของพืชที่จะปลูกในระบบบึงประดิษฐ์ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศ และพื้นที่ในบริเวณนั้นจึงสามารถเจริญเติบโตได้ดี อย่างไรก็ตาม ลักษณะของน้ำเสียที่จะใช้บำบัดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน พืชที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และสารอาหารสูงๆ เช่น สิ่งปฏิกูล หรือน้ำเสียจากการเกษตร คือ ธูปฤาษี, กก, อ้อ และหญ้าคมบาง

หลักการในการเลือกชนิดของพืชที่จะใช้ในระบบ (U.S. EPA, 2000(c))

- 1) พืชท้องถิ่น เลือกใช้พืชที่มีอยู่ในท้องถิ่นนั้นๆ เนื่องจากมีภูมิอากาศที่เหมาะสม และสามารถหาได้ง่าย พืชจึงสามารถเจริญเติบโตได้ดี ทั้งยังเป็นที่ยอมรับของประชาชนในแถบนั้น
- 2) พันธุ์พืชที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นพืชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย แต่เนื่องจากพืชส่วนใหญ่ที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเป็นพืชที่สามารถรุกรานโดยการทำลายพืชชนิดอื่นที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้พืชควรคำนึงถึงลักษณะของพืชด้วย
- 3) มีความทนทานต่อสารอินทรีย์สูงๆ ระบบบึงประดิษฐ์จะต้องรองรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงๆอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น พืชที่เลือกใช้ควรมีความทนทานต่อสารอินทรีย์ต่างๆได้
- 4) มีความทนทานต่อสภาพน้ำท่วมได้ พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์นี้อาจแตกต่างกันพืชในบึงธรรมชาติ เนื่องจากในบึงธรรมชาติมีช่วงที่เป็นฤดูแล้งไม่มีน้ำปกคลุมด้านบน แต่สำหรับระบบบึงประดิษฐ์ต้องรับน้ำเสียเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น พืชที่เลือกใช้ควรสามารถปรับตัวได้กับสภาพน้ำท่วม
- 5) ประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต พืชที่ใช้ควรเป็นพืชที่สามารถใช้เป็นที่อยู่อาหาร หรือทำประโยชน์ต่างๆ ให้กับสิ่งมีชีวิตได้
- 6) ความหนาแน่นของพืช การปลูกพืชชนิดเดียวเป็นการเสี่ยงต่อการทำลายของศัตรูพืชได้ การปลูกพืชหลายชนิดในระบบเป็นการแก้ปัญหาศัตรูพืชได้ เนื่องจากหากมีศัตรูพืชชนิดใดมาทำลายพืชชนิดอื่นยังสามารถทำงานต่อไปได้

2.2.4.4 พืชที่ใช้ในการศึกษา

- 1) ต้นคล้าน้ำ (รูปที่ 2.10) ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Thalia geniculata* L. ชื่อวงศ์ คือ Marantaceae และชื่อสามัญ คือ Water canna ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นพืชล้มลุกมีอายุหลายปี ชอบขึ้นบริเวณริมน้ำ และบริเวณดินเหนียวที่ชุ่มชื้น และมีอินทรีย์วัตถุสูง หรือบริเวณที่มีระดับน้ำลึกประมาณ 25-40 เซนติเมตร ลำต้นเป็นเหง้าใต้ดิน กอใบสูงประมาณ 2.0 เมตร และดอกเจริญเหนือน้ำ มีสีม่วงอ่อน ออกดอกเป็นช่อแบบช่อแยกแขนงจากกอ ก้านช่อดอกกลม เรียวยาว แข็ง ปลายก้านแตกแขนงย่อยหลายแขนงห้อยลง ช่อดอกยาว 20-25 เซนติเมตร โคนก้านช่อดอกมีใบประดับ ดอกย่อยไม่มีก้านดอก เกิดเป็นคู่ เรียงกันบนแขนงย่อย มีใบประดับ 2 ใบหุ้มดอกตอนอ่อน ดอกย่อยประกอบด้วยกลีบเลี้ยง 3 กลีบ กลีบดอก 3 กลีบ สามารถออกดอกได้ตลอดปี



รูปที่ 2.10 ต้นค้ำน้ำ

2) ต้นกร่ม (รูปที่ 2.11) ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Cyperus involucratus* Rottb. ชื่อวงศ์ คือ Cyperaceae และชื่อสามัญ คือ Umbrella plant, Umbrella sedge ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นไม้ล้มลุก มีเหง้าใต้ดิน ลำต้นอยู่เหนือดินเป็นเหลี่ยมเล็กน้อย เจริญเป็นกอแน่นสูงถึง 1 เมตร ใบลดรูปเป็นกาบอยู่ที่โคนลำต้น ดอก เป็นช่อกระจุกที่ปลายยอด ดอกย่อยเล็กสีเขียวปนสีน้ำตาล และมีจำนวนมาก มีกาบรองดอกรูปแถบ มีมากกว่า 15 อัน ยาว 15 – 20 เซนติเมตร กระจุกที่ปลาย ก้าน ฤดูออกดอก ตลอดปี สภาพปลูก ชอบดินเหนียวชุ่มชื้นและมีอินทรีย์วัตถุสูง หรือมีน้ำขังและที่ ระดับ 15 – 25 เซนติเมตร ต้องการแสงแดดครึ่งวัน – เต็มวัน ขยายพันธุ์ โดยแยกกอ



รูปที่ 2.11 ต้นกร่ม

2.2.5 กลไกการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์

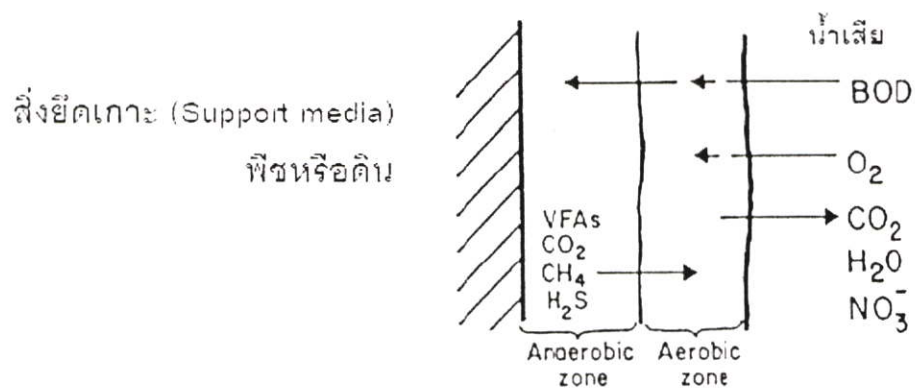
การกำจัดมลสารในบึงประดิษฐ์ประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ที่ทำงานสัมพันธ์กัน กลไกหลักที่พบได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Biochemical conversions) การตกตะกอน (Settling) และการกรอง (Filtration) การสะสมในดิน (Accretion) การระเหย (Volatilization) การดูดซับ (Adsorption) การระเหยทางใบ (Evapotranspiration) และการนำไปใช้โดยพืช (Plant uptake) การกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำที่ต้ออาศัยกลไกต่างๆ ประกอบกันดังนี้

2.2.5.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

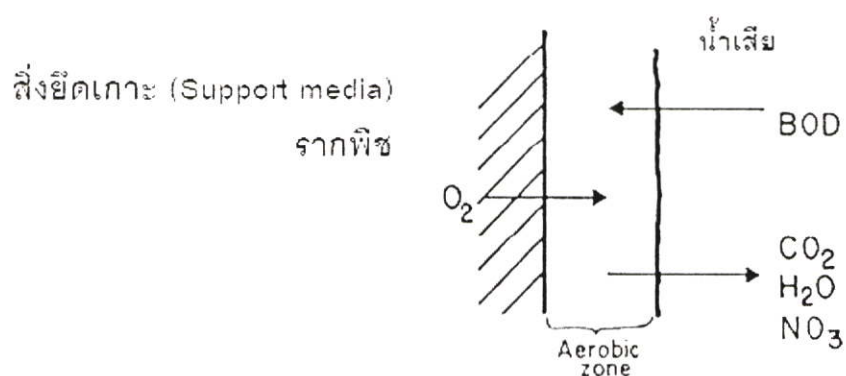
ของแข็งที่สามารถตกตะกอนได้ จะถูกกำจัดโดยกระบวนการตกตะกอนและการกรองภายในบริเวณไม่ไกลจากจุดที่ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบ โดยเฉพาะบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ ผิวดินตะกอนที่สะสมอยู่อาจทำให้ระบบอุดตันได้ (Vymazal, 1998) ดังนั้น จึงควรมีการกรองเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออกก่อนเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์ ของแข็งที่ไม่ตกตะกอนจะถูกกำจัดในบริเวณต่อมาด้วยการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และการดูดซับของแข็ง เช่น ส่วนของพืช ดิน ทราย รวมทั้งการรวมตัวของกลุ่มตะกอน (Stowell *et al.*, 1981)

2.2.5.2 การกำจัดสารอินทรีย์

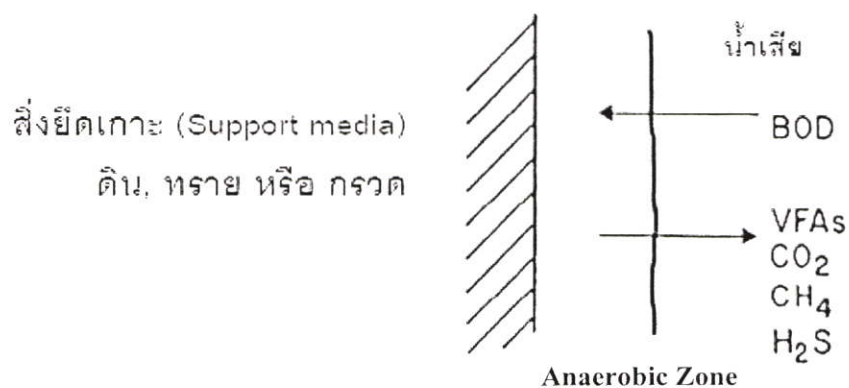
สารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วโดยกระบวนการตกตะกอน และการกรอง ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ จะถูกกำจัดโดยการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทั้งที่แขวนลอยในน้ำ และที่ยึดติดกับตัวกลางในระบบ กระบวนการย่อยสลายเป็นแบบใช้ออกซิเจน โดยออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มาจากการแพร่ผ่านจากบรรยากาศ และปริมาณออกซิเจนจะถูกลำเลียงผ่านไปยังส่วนรากของพืช รูปที่ 2.12 แสดงกลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบึงประดิษฐ์โดยรูปที่ 2.12 ก เป็นบริเวณใกล้ผิวน้ำซึ่งระบบมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับบรรยากาศ เกิดขึ้นที่ส่วนของลำต้นพืช หรือชั้นกรอง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยบีโอดีในน้ำเสียจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบริเวณรอบๆ ต้นพืชก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ต้นพืช และเกิดกระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนรูปที่ 2.12 ข แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณรากพืช เป็นบริเวณที่ใช้ออกซิเจนแบบใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่มาจากการแพร่กระจายจากบรรยากาศผ่านในต้นพืช และแพร่ออกทางรากของพืช และรูปที่ 2.12 ค แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณชั้นกรองที่อยู่ลึกลงไปจากรากพืช เป็นบริเวณที่ใช้ออกซิเจนแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสีย



(ก)



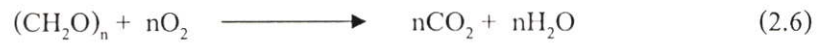
(ข)



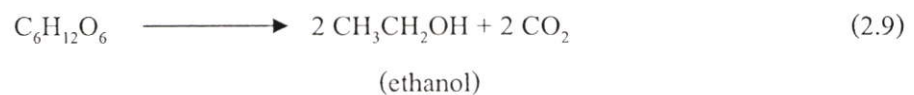
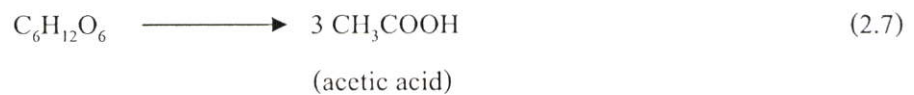
(ค)

รูปที่ 2.12 กลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบึงประดิษฐ์ (ก) สภาวะที่มีอากาศ (ออกซิเจนจากบรรยากาศ) (ข) สภาวะที่มีอากาศ (ออกซิเจนจากรากพืช) (ค) สภาวะไม่มีอากาศ (U.S. EPA, 1988)

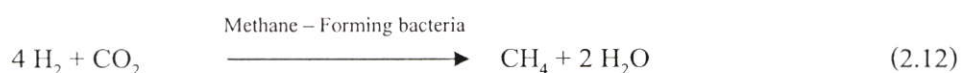
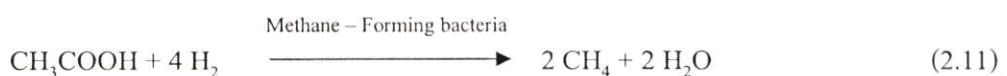
การกำจัดสารอินทรีย์โดยการนำไปใช้ของพืชนั้นนับเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Watson *et al.*, 1989 และ Cooper *et al.*, 1996) การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรป (Heterotrophic bacteria) และกลุ่มออโตโทรป (Autotrophic bacteria) ดังสมการที่ 2.6



ในสภาพที่มีออกซิเจนมากเพียงพอ จุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรปจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าจึงเป็นตัวละครสำคัญในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบ (Vymazal, 1998) การย่อยสลายแบบสารอินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลายขั้นตอนโดยแบคทีเรียกลุ่มแฟคัลตาทิฟ (Facultative bacteria) ในขั้นตอนแรกสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ กรดไขมัน เช่น กรดอะซิติก กรดแลคติก และแอลกอฮอล์ ดังสมการที่ 2.7 – 2.9 ตามลำดับ



ในขั้นต่อมา สารผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกจะถูกย่อยสลายโดย Sulfate - reducing bacteria ดังสมการที่ 2.10 และโดย Methane - forming bacteria ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12



ขั้นตอนการสร้างมีเทนช่วงพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.5 - 7.5 หากการย่อยสลายในขั้นแรกเกิดขึ้นเร็วจะทำให้พีเอชต่ำเกินไป แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะหยุดการทำงาน โดยสังเกตได้จากกลิ่นเหม็นเปรี้ยวที่เกิดขึ้น โดยทั่วไป การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้น

เร็วกว่า แต่ในสภาพที่มีสารอินทรีย์สูงและมีออกซิเจนจำกัด กระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีบทบาทมากกว่า (Cooper *et al.*, 1996)

2.2.5.3 การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด

การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดเกิดจากกระบวนการหลักที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน โดยไนตริฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในรูปแอมโมเนียไปเป็นไนโตรเจนทั้งหมดในรูปไนเตรทภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ดังสมการ 2.13 และ 2.14



ปัจจัยควบคุมกระบวนการไนตริฟิเคชันคือ อุณหภูมิ พีเอช ความเป็นด่างของน้ำ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดและออกซิเจนละลายน้ำ (Vymazal, 1998) โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25 - 40 องศาเซลเซียส ช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 6.8 - 7.5 และต้องการออกซิเจนละลายน้ำ 4.3 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิกรัมของการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดเป็นไนเตรทไนโตรเจนทั้งหมด (Cooper *et al.*, 1996)

ดีไนตริฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนไนโตรทไนโตรเจนทั้งหมดให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนทั้งหมด จะเกิดได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ ดังสมการ 2.15



การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดโดยทั้งสองกระบวนการนี้เกิดขึ้นในระบบที่มีออกซิเจนร่วมกับไม่มีออกซิเจน เช่น ดินที่มีน้ำท่วมขัง

การเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia volatilization) เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดไปเป็นแอมโมเนียไอออน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนกลับไปกลับมาขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอช 9.3 อัตราส่วนระหว่างแอมโมเนียกับแอมโมเนียไอออนจะเป็น 1:1 ทำให้สามารถกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้มาก กระบวนการนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของแอมโมเนียไอออนในน้ำแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วลม แสงแดด พืช และความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำ (Vymazal, 1998)

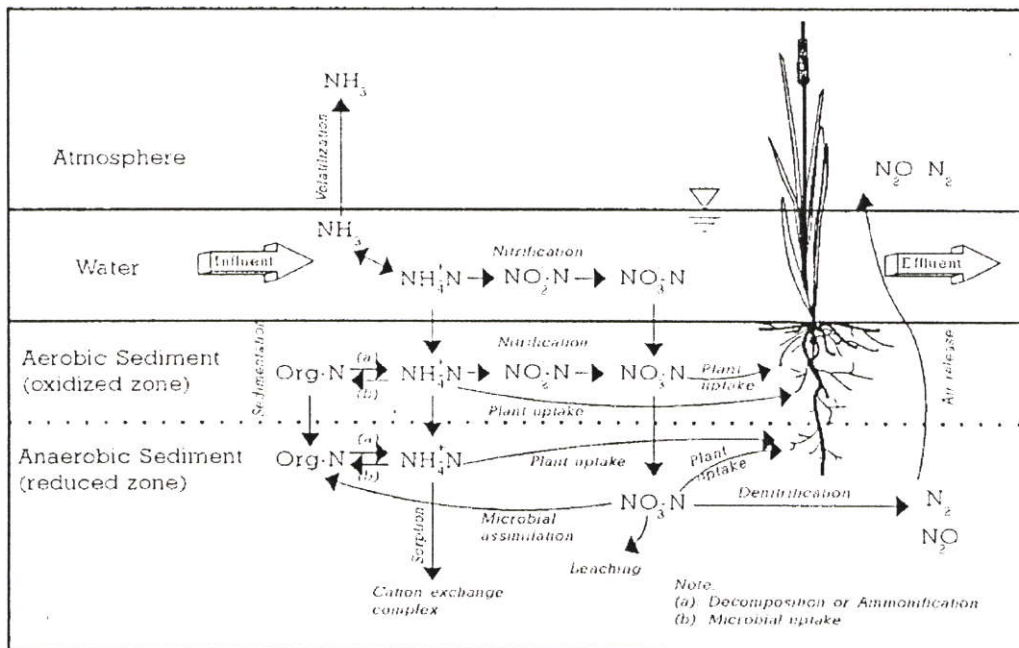
แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) เป็นการเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งหมดในสารอินทรีย์ซึ่งพบในรูปกรดอะมิโนให้เป็นแอมโมเนีย โดยจุลินทรีย์ และใช้พลังงานที่ได้จากการเกิดแอมโมนิฟิเคชันมาใช้ในการเจริญเติบโต ส่วนไนโตรเจนทั้งหมดในรูปยูเรีย และกรดยูริกจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นแอมโมเนีย ดังสมการ 2.16



อัตราการเกิดกระบวนการนี้จะลดลงตามปริมาณออกซิเจน และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 40 - 60 องศาเซลเซียส และพีเอชที่เหมาะสมคือ 6.5 - 8.5

การนำไปใช้โดยพืชเป็นการเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งหมดในรูปแอมโมเนีย และไนเตรทไปเป็นสารอินทรีย์ในเซลล์ของพืช อัตราการนำไปใช้ถูกจำกัดโดยอัตราการเจริญเติบโตของพืช และความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อพืช เมื่อพืชตายใน ไตรเจนทั้งหมดจะถูกปล่อยกลับสู่ระบบ ดังนั้น จึงควรมีการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบเป็นระยะๆ

การดูดซับเป็นการกำจัดแอมโมเนียมไอออน ซึ่งมีประจุบวกโดยดูดซับกับประจุลบของซากพืช สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนและตัวกลาง แต่เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนลดลงก็จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพื่อปรับให้ระบบสมดุล ในระบบที่มีการจ่ายน้ำเสียแบบต่อเนื่องจะเกิดปฏิกิริยากลับไปกลับมาทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนไม่ลดลง แต่ในระบบที่จ่ายน้ำเสียแบบไม่ต่อ เนื่องจากว่าในช่วงที่ไม่จ่ายน้ำเสียความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการถูกดูดซับ (Vymazal, 1998) ซึ่งแอมโมเนียมไอออนที่ถูกดูดซับจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทต่อไป ดังรูปที่ 2.13 (U.S EPA, 1988)



รูปที่ 2.13 กลไกการกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์ (U.S. EPA, 1988)

2.2.5.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่ปรากฏในน้ำเสียมักอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต พอลิฟอสเฟต และ ฟอสเฟตในรูปสารอินทรีย์ (Cooper *et al.*, 1996) ฟอสฟอรัสที่มีวาเลนซ์ +5 จะมีการเปลี่ยนรูป กลับไปมาระหว่างรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ (Richardson, 1985) กลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัส ในระบบบึงประดิษฐ์ ได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Biological oxidation) การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึมโดยพืช (Plant absorption) การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) และการตกตะกอนผลึก (Precipitation) (Watson *et al.*, 1989)

จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำ เป็นออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่จุลินทรีย์อีกกลุ่ม เช่น แบคทีเรีย (เช่น *Bacillus subtilis*, *Arthrobacter* sp.) แอกทิโนมัยซีต (เช่น *Streptomyces* sp.) และฟังไจ (เช่น *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp.) สามารถเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัสให้เป็นออร์โธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ (Bitton *et al.*, 1994) ออร์โธฟอสเฟตนี้จะถูกทั้งแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ใช้เป็นธาตุอาหารต่อไป สำหรับฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และสะสมอยู่ในตะกอนดินบริเวณก้นบึงจะถูก จุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายน้ำ ซึ่งพืชชั้นสูงสามารถ นำไปใช้ได้

กลไกการดูดซับ และระยะเวลาการกักเก็บฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์ ถูกควบคุมโดย Redox Potential พีเอช ปริมาณธาตุเหล็ก อลูมิเนียม แคลเซียม และธรรมชาติของตะกอนดิน (Faulkner and Richardson, 1989 และ Richardson and Vaithyanathan, 1995) ในดินที่เป็นกรด ฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับโดยสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม แล้วตกตะกอนผลึกเป็น เหล็กฟอสเฟต (Fe-P) และอลูมิเนียมฟอสเฟต (Al-P) แต่ที่พีเอชสูงกว่า 7 จะเกิดตะกอนผลึกของ แคลเซียมฟอสเฟต (Ca-P) มากกว่า (Qualls and Richardson, 1995) ความสามารถในการดูดซับ ฟอสฟอรัสของตะกอนดินสามารถประมาณได้จากปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนดิน (Richardson, 1985) ที่ Redox potential ต่ำกว่า 250 มิลลิโวลต์ จะทำให้ Fe^{3+} เปลี่ยนเป็น Fe^{2+} แล้วปล่อย ฟอสฟอรัสออกมา (Faulkner and Richardson, 1989) แต่กลับทำให้อลูมิเนียมและเหล็กอยู่ในรูป ผลึกที่ไม่ละลายน้ำและดูดติดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น (Patrick and Khalid, 1974; Cooper *et al.*, 1996) กลไกสำคัญก็คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand exchange reaction) (Faulkner and Richardson, 1989) โดยฟอสเฟตจะเข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ในสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก และอลูมิเนียม (Cooper *et al.*, 1996) แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า กลไกการตกตะกอนผลึก หรือการเปลี่ยนลิแกนด์เป็น กลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัส

พืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสผ่านทางรากแล้วลำเลียงไปใช้สร้างเนื้อเยื่อต่อไป แต่ยังคงมี ปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับการดูดซึมไนโตรเจนทั้งหมด สังเกตจากปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมใน

เนื้อเชื้อพืชต่ำกว่าไนโตรเจนทั้งหมด (Brix, 1994 และ Vymazal, 1998) ฟอสฟอรัสถูกปล่อยสู่ระบบเมื่อพืชตายลง ดังนั้นควรเก็บพืชที่ตายออกจากระบบ

2.2.5.5 การกำจัดโลหะหนัก

โลหะหนักพบในรูปสารละลายและองค์ประกอบของของแข็ง กลไกหลักในการกำจัดคือ การถูกดูดซับโดยตัวกลาง การตกตะกอนเคมีในรูปของเกลือซึ่งมักเกิดร่วมกับการกำจัดฟอสฟอรัสและการดูดซับของพืช (Watson, 1999) กลไกเหล่านี้เกิดได้ดีกับโลหะหนักที่สามารถตกตะกอนได้

2.2.5.6 การกำจัดเชื้อโรค

การกำจัดเชื้อโรคในระบบประกอบด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การตกตะกอน การกรอง และการถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิธีทางเคมี ได้แก่ ปฏิกริยาออกซิเดชัน การดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุ และสารพิษที่พืชบางชนิดปล่อยออกมา ส่วนวิธีทางชีวภาพประกอบด้วย การตายตามธรรมชาติ (Natural Die-off) การกินกันเอง (Predation) และสารปฏิชีวนะที่สิ่งมีชีวิตอื่นปล่อยออกมา

2.3 การวิเคราะห์กระจายตัว และการเคลื่อนที่ของสารในระบบโดยใช้ Tracers

วิธี Tracer Test สามารถประเมินรูปแบบการไหลในระบบบึงประดิษฐ์ โดยอธิบายการไหลแบบเป็นไปตามอุดมคติ และแบบไม่เป็นไปตามอุดมคติ กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของสารในระบบแบบตามอุดมคติ แบ่งออกเป็นระบบที่มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely mixed flow reactor, CMFR) มีการปั่นกวภายในระบบ และกระจายตัวของ Tracer แบบผสมกันเนื่องจากการปั่นกว ระบบชนิดไหลเป็นช่วง (Plug flow reactor, PFR) คือ มีลักษณะการไหลคล้ายการไหลในท่อ มีการปั่นกวนน้อย หรือแทบไม่มีการปั่นกวน ค่าที่ได้จากการคำนวณ Tracer สามารถประเมินถึงวงจรสั้นๆ ในการตกตะกอนในระบบทางชีวภาพได้ ประเมินเวลาการสัมผัสกันของคลอไรด์ กับแหล่งน้ำ ประเมินทางชลศาสตร์ที่เกี่ยวกับสภาวะในระบบ และประเมินรูปแบบการไหลในระบบบึงประดิษฐ์ และระบบบำบัดทางธรรมชาติแบบอื่น ซึ่งสามารถอธิบายเกี่ยวกับการไหลแบบตามอุดมคติ และแบบไม่เป็นไปตามอุดมคติ แต่การไหลแบบไม่เป็นไปตามอุดมคตินั้น บ่อยครั้งมักถูกมองข้าม เนื่องจากยังขาดความเข้าใจในทางชลศาสตร์ของระบบ

ปัจจัยที่นำไปสู่การไหลที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติในระบบ ได้แก่

1) อุณหภูมิที่ต่างกัน

ในระบบที่มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely mixed flow reactor, CMFR) และระบบชนิดไหลเป็นช่วง (Plug flow reactor, PFR) จะเกิดการไหลไม่เป็นไปตามอุดมคติ โดยความหนาแน่นของกระแส เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2) รูปแบบการหมุนเวียนของลม

ในระบบที่ลึกไม่มาก การหมุนเวียนของลมสามารถก่อตัวขึ้นโดยเคลื่อนที่ไปพร้อมกับ ส่วนของน้ำที่เข้ามาถึงทางออก ในสัดส่วนของเวลาจริงที่น้ำถูกขังไว้

3) การปั่นกววนไม่เพียงพอ

ถ้าไม่มีการปั่นกววนอย่างเพียงพอ น้ำเสียส่วนที่อยู่ในระบบอาจไม่ผสมกับน้ำเสียที่เข้า ระบบมาใหม่

4) การออกแบบที่ไม่ดี

การออกแบบของทางเข้า และออกของระบบต้องสัมพันธ์กับสัดส่วนของระบบ เพื่อไม่ให้เกิดมุมอับที่น้ำในระบบไม่สามารถผสมกันได้

5) การกระจายตัวตามแกนในระบบชนิดไหลเป็นช่วง (Plug flow reactor, PFR)

การวิเคราะห์สมรรถนะทางพลศาสตร์ของระบบโดยใช้ Tracers มีลักษณะ ดังนี้

- 1) ไม่ควรมีผลกระทบต่ออัตราการไหล
- 2) ต้องรักษาสมดุลมวลภายในระบบได้
- 3) จะต้องมีความต่อเนื่องตลอดเวลาในการทำศึกษา
- 4) ต้องวิเคราะห์ผลได้อย่างสะดวก
- 5) มีการกระจายตัวของสารที่ใช้ในการศึกษาค่ำ
- 6) สารที่ใช้ในการศึกษาต้องไม่ดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางภายในระบบ
- 7) สารที่ใช้ในการศึกษาต้องไม่ดูดซับกับอนุภาคในน้ำเสีย

ในระบบชนิดไหลเป็นช่วงมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของ Tracers เนื่องจากการเคลื่อนที่ ในแนวอนของตัวถูกละลาย หรืออนุภาคคอลลอยด์ กับกระแสความเร็วของการไหล และการ กระจายตัว ซึ่งจะถูกศึกษาในส่วนของแบบจำลองการไหลที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติในระบบชนิด ไหลเป็นช่วง (Plug flow reactor, PFR) เช่น ในท่อ และความเร็วในการกระจายตัวในท่อจะมีกราฟ เป็นรูปประจักษ์ว่า จากการนำค่าของความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทำ Tracers (มิลลิกรัมต่อลิตร) มาพลอตกับเวลา (นาที่หรือชั่วโมง) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.17 และ 2.18 ตัวเลขการ กระจายตัว (Dispersion Number) ที่ได้บอกถึงการกระจายตัวในแนวแกนของระบบที่ใช้ในการ บำบัดน้ำเสีย เพื่อประเมินทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวกับสภาวะในระบบ ดังแสดงในตาราง 2.5 สามารถ คำนวณได้จากสมการ 2.19 (Tchobanoglous, 2004)

ตารางที่ 2.5 ค่าการกระจายตัวในแนวแกนของระบบที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ตัวเลขการกระจายตัว (Dispersion number, d)	การกระจายตัว
0	ไม่มีการกระจายตัว (ideal plug flow)
น้อยกว่า 0.05	การกระจายตัวต่ำ
0.05 – 0.25	การกระจายตัวปานกลาง
มากกว่า 0.25	การกระจายตัวสูง
∞	การกระจายตัวสูง

$$E(t) = \frac{C}{\sum C \Delta t} \quad (2.17)$$

$$F = \sum tE(t)\Delta t \quad (2.18)$$

$$d = \frac{D}{uL} = \frac{Dt}{L^2} \quad (2.19)$$

เมื่อ

- E(t) = กระจายตัวของเวลาที่กักเก็บ (ต่อนาที)
- F = ผลรวมการกระจายตัวของเวลาที่กักเก็บ (ต่อนาที)
- C = ความเข้มข้นของสาร (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- Δt = ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน (นาที)
- d = ตัวเลขของการกระจายตัว
- D = สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน (ตารางเมตรต่อวินาที)
- u = อัตราเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)
- L = ความยาว (เมตร)
- t = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (วินาที)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชนิดา และ พัฒนา (2548) ได้ศึกษาถึงการใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Sub Surface Flow Constructed Wetland) ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่ไม่มีการปลูกพืช กับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้งและแนวนอนที่ปลูกพืช 3 ชนิด คือ ธรรมรักษา (*Heliconia stricta*) คาหลา (*Etilingera elatior*) และ ช่อนกลั่น (*Polianthes tuberosa*) ที่มีตัวกลางขนาดเดียวกัน เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 1, 2 และ 3 วัน หรือคิดเป็นอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 13.8, 6.9 และ 4.6 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ ป้อนน้ำเสียชุมชนที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัดเข้าสู่ชุดทดลอง ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาพักเก็บน้ำมากขึ้น ส่วนการปลูกพืชในระบบมีผลให้ ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนสูงขึ้น ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ได้แก่ ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้งที่ระยะเวลาพักเก็บ 2 วัน สามารถบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด ไนไตรต์ไนโตรเจน ไนเตรตไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด ได้ร้อยละ 86.36, 100, 98.06 และ 48.28 ตามลำดับ

พจิตร (2547) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรหมูโดยระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี และซีโอดี โดยใช้กกกลมอยู่ในช่วงร้อยละ 63.5 - 88.1 และ 66.3 - 87.0 ตามลำดับ รูปถ่ายอยู่ในช่วงร้อยละ 68.3 - 92.2 และ 67.1 - 91.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การกำจัดของแข็งแขวนลอย (TSS) ของกกกลม และรูปถ่ายมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 69.7-95.55, 77.0 - 97.4 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด TKN และ NO_3^- -N ของกกกลมน้อยกว่ารูปถ่าย

Klomjek *et al.* (2005) ได้ทำชุดการทดลองเพื่อหาความเป็นไปได้ของบึงประดิษฐ์ในการกำจัดมลพิษจากน้ำเค็มโดยใช้พืชไผ่พื้นน้ำ 8 ชนิด ได้แก่ ต้นรูปถ่าย (*Typha angustifolia*) หญ้าแห้วหมู หญ้าน้ำ หญ้าแพรกเอเชีย (*Digitaria bicornis*) หญ้าน้ำเค็ม หญ้า Kallar หญ้าแฝก (Vetiver) และต้นอเมซอน ปลูกในแปลงทดลองและให้น้ำเสียชุมชนซึ่งมีความเค็มของโซเดียมคลอไรด์เลียนแบบความเข้มข้นความเค็มของน้ำทะเลที่ประมาณ 14-16 mS/cm พืชที่ทนต่อปัจจัยได้แก่ ต้นอเมซอน และหญ้าแฝก การดูดซึมสารอาหารไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสของพืชที่ทนต่อความเค็ม อยู่ในช่วง 0.006-0.061 และ 0.0002-0.0024 $\text{g/m}^2\cdot\text{d}$ ตามลำดับ ความสามารถในการบำบัดของหน่วยบำบัด คือ BOD_5 เท่ากับร้อยละ 72.4-78.9 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS) เท่ากับร้อยละ 43.2-56.0 แอมโมเนียเท่ากับร้อยละ 67.4-76.5 และฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 28.9-44.9 พืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดี ทั้งรากและลำต้น และสามารถดูดซึมไนโตรเจนทั้งหมดได้มากคือต้นรูปถ่าย พืชที่สามารถบำบัดค่า BOD_5 ได้ดีคือ หญ้าแพรกเอเชีย และได้มีการนำพืชทั้ง 2 ชนิดไปใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบอัตราไหลต่อเนื่อง โดยรับน้ำเสียที่มีความเค็มที่เข้ากระบวนการ อัตราการกำจัดสูง

เกิดได้ดีเมื่อใช้ระยะเวลาานซึ่งสามารถลด BOD_5 ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด อยู่ในช่วงร้อยละ 44.4-67.9, 41.4-70.4, 18.0-65.3 และ 12.2-40.5 ตามลำดับ

Luederitz et al. (2000) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหาร และแหล่ง เศรษฐกิจของระบบบึงประดิษฐ์ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียของระบบบึง ประดิษฐ์แบบแนวตั้งและแนวนอน ประกอบด้วย 1) บึงประดิษฐ์แนวนอนขนาดเล็ก 2) ความชัน ของบึงประดิษฐ์แนวนอน 3) บึงประดิษฐ์แนวนอนขนาดใหญ่ 4) การเรียงชั้นของบึงประดิษฐ์ แนวตั้ง และ 5) การไม่เรียงชั้นของบึงประดิษฐ์แบบแนวตั้ง ผลที่ได้พบว่า ทั้ง 2 แบบสามารถกำจัด สารอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมด และ ฟอสฟอรัสทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 90 ถ้ามีชั้นตอนการทำ ความสะอาดเบื้องต้นที่มีประสิทธิภาพ และถ้าพื้นที่การบำบัดมีลักษณะใหญ่ (มากกว่า $50 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{day}$) บึง ประดิษฐ์แบบแนวนอนมีข้อดีคือใช้เวลานานในการกำจัดฟอสฟอรัสเพราะเกิดสารอินทรีย์ไน โตรเจนสูง และระบบบำบัดแบบธรรมชาติช่วยลดค่าวัสดุได้ร้อยละ 76 และพลังงานได้ร้อยละ 83

Polprasert (1998) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าระบบบึง ประดิษฐ์เกือบทั้งหมดจะใช้พืชจำพวกอาศัยในน้ำ (emerging macrophytes) ในการปรับปรุงคุณภาพ น้ำ พืชโดยที่นิยมใช้เป็นพืชน้ำ ได้แก่ ต้นกก ต้นอ้อ (*Phragmites australis*) ต้นธูปฤาษี (*Typha* sp.) ต้นกกกลม (*Scirpus* sp.)

Puetpaiboon (2003) ได้ทำการศึกษา การใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานในการ บำบัดน้ำเสียจากโรงอบ/รมยาง น้ำเสียจากการผลิตยางแผ่นรมควันมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูงโดย ทดลองบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์ที่อัตราการระบรทุกซีโอดี ต่างกัน คือ 750, 1,000, 1,250, และ 1,500 กิโลกรัมซีโอดี/(แอสแตร์·วัน) ระบบบึงประดิษฐ์แต่ละบ่อประกอบด้วย ระบบบึง ประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง และตามด้วยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน โดยปลูกต้น ฤาษี จากการทดลอง พบว่า มีเพียงบึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวตั้งที่อัตราการระบรทุก 750 และ 1,000 กิโลกรัมซีโอดี/(แอสแตร์·วัน) และบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินที่อัตราการระบรทุก 750 กิโลกรัมซีโอดี/(แอสแตร์·วัน) เท่านั้นที่น้ำเสียผ่านการบำบัดแล้วได้มาตรฐานน้ำทิ้ง อุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ทุกตัวแปร หากพิจารณา ในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดมลสาร พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด BOD_5 , COD, SS, TKN, และ NH_3-N สูงกว่า 90% สำหรับ TP ซัลเฟต และ TDS มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่า 50% นอกจากนี้ ยังพบว่า บึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวตั้งกำจัด BOD_5 , COD, SS ซัลเฟต และ TDS ได้ดี ส่วนบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน กำจัด TKN, NH_3-N และ TP ได้ดีกว่า ในการประเมินราคา โดยเปรียบเทียบกันระหว่างระบบบำบัดแบบสระเดิมอากาศและบึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวตั้งที่ อัตราการระบรทุก 1,000 กิโลกรัมซีโอดี/(แอสแตร์·วัน) พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ใช้ค่าก่อสร้างและ

พื้นที่มากกว่าสระเติมอากาศโดยส่วนใหญ่จะเป็นค่าวัสดุตัวกลางที่ใช้ในบึงประดิษฐ์ แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในระยะยาว ในแง่ของค่าใช้จ่ายรายเดือน การเดินระบบที่ง่ายกว่า การลดปัญหาการเรือกคลื่น และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ระบบบึงประดิษฐ์ก็คุ้มค่าแก่การพิจารณาลงทุน

Steiner and Freeman (1989) ศึกษาวิจัยการบำบัดน้ำเสียโดยใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็ก ในประเทศฝรั่งเศส พบว่า สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ถึง 40% ที่ระยะเวลาสัมผัส 6 - 8 วัน อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีทิศทางไหลของน้ำในแนวดิ่ง โดยใช้ทรายเป็นวัสดุกรองที่อัตราการระบิโอดีเท่ากับ 3.8 กรัม บีโอดี/ตารางเมตร-วัน พบว่า สามารถกำจัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ถึง 74 % ในกรณีที่ต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้น การใช้ส่วนผสมระหว่างชั้นกรองที่มีเหล็กและอลูมิเนียมจะได้รับความนิยมค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม ชั้นกรองที่จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีต้องเป็นชั้นกรองที่มีเนื้อละเอียด โดยอาจจะมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำการไหล ดังนั้น การเติมเหล็กหรืออลูมิเนียมเข้าไปในชั้นกรองหรือน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น

Volker et al. (2001) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน และผลทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลแนวดิ่ง กับน้ำไหลในแนวราบ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลแนวดิ่ง คือ ร้อยละ 93.80 และ 96.80 ตามลำดับ ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลแนวนอน คือ ร้อยละ 69.70 และ 95.50 ตามลำดับ ซึ่งระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลแนวดิ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีกว่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. น้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$)
2. กลูตามิก ($C_5H_9NO_4$)
3. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
4. เฟอรัรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
5. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
6. แอมโมเนียมวานาเดต (NH_4VO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
7. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
8. โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
9. ซัลฟานิลามาซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
10. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท J.T. Baker Co., Ltd.
11. เมอร์คิวริกออกไซด์ (HgO_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท J.T. Baker Co., Ltd.
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท J.T. Baker Co., Ltd.
13. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
14. โซเดียมเตตระโบเรต ($Na_2B_4O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
15. กรดบอริก (H_3BO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
16. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
17. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
18. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
19. สารละลายเอธิลแอลกอฮอล์ (CH_3CH_2OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถังทรงสี่เหลี่ยมขนาดจุ 126 ลิตร ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร

2. ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.45 เซนติเมตร (4 หุน)
3. เครื่องกลั่น (Distillation Unit) บริษัท BUSHI รุ่น B223 ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 215 ประเทศ อังกฤษ
5. ชุดย่อยสลาย (Distillation Unit) บริษัท BUSHI รุ่น 426 ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
6. เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) บริษัท Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH ประเทศเยอรมัน
7. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์รวม (Total organic carbon, TOC) รุ่น TOC-V_{CSH} บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-Vis รุ่น Helios α (double beam) บริษัท Thermo electron corporation
9. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatograph) บริษัท Metrohm รุ่น DX 600 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
10. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) บริษัท Jenway รุ่น 9200 ประเทศอังกฤษ
11. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance) บริษัท Denver Instrument Company รุ่น TC-254 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) น้ำเสียสังเคราะห์ถูกเตรียมขึ้น โดยใช้ น้ำตาลซูโครส และกรดกลูตามิกเป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่จุลินทรีย์ การศึกษานี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นตัวแทนน้ำเสียจากชุมชนที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยควบคุมค่า COD:N:P เท่ากับ 125 : 10 : 2 (www.pcd.go.th) ซึ่งสารอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1 (Rusch และคณะ, 2005) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทำการเตรียมทุกวัน เพื่อป้องกันการถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์และกลิ่นเหม็น และวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียทุกครั้งที่เตรียม

2) น้ำเสียชุมชน ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง ทำอาภาศยานสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ โดยเก็บน้ำตัวอย่างบ่อรวบรวมน้ำเสีย (Equalization Tank) ก่อนเข้าสู่ระบบตะกอนเร่ง ระหว่างวันที่ 2 -13 เมษายน 2550

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (Rusch *et al.*, 2005)

สารประกอบ	น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม/50ลิตร)		
		150 มก.ซีไอดี/ล.	300 มก.ซีไอดี/ล.	500 มก.ซีไอดี/ล.
Sucrose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	342.0	2.97	5.94	9.90
Glutamic acid (C ₅ H ₉ NO ₄)	147.0	3.83	7.56	12.76
Ammonium chloride (NH ₄ Cl)	53.5	2.29	4.59	7.64
Disodium hydrogen phosphate (Na ₂ HPO ₄)	142.0	0.20	0.25	0.31
Potassium dihydrogen phosphate (KH ₂ PO ₄)	136.0	0.04	0.23	0.49

3.2.2 พืชที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้ต้นคล้าน้ำ (*Thalia geniculata* L.) และ ต้นกรั่ม (*Cyperus involucratus* Rottb.) ในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากต้นคล้าน้ำมีสายพันธุ์ใกล้เคียงกับต้นพุทธรักษา (www.Bloggang.com) ซึ่งเป็นพืชที่นิยมใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ ส่วนต้นกรั่มมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ดี (Iamchaturapatr, 2006) นอกจากนี้ ต้นคล้าน้ำ และต้นกรั่ม ยังนิยมใช้ในการจัดสวน เพื่อความสวยงาม

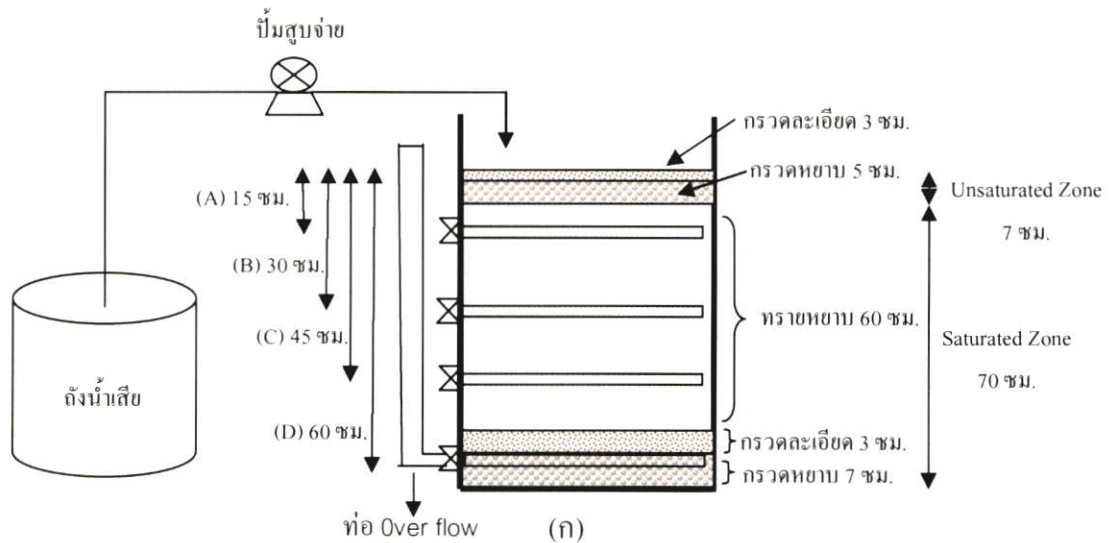
3.2.3 การศึกษาการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

3.2.3.1 การสร้างและติดตั้งระบบ

1) ระบบทำจากแผ่นอะคริลิกขนาดกว้าง 0.30 เมตร ยาว 0.60 เมตร สูง 0.80 เมตร ความจุน้ำเท่ากับ 126 ลิตร จำนวน 3 ถัง (รูปที่ 3.1 ก) ในแต่ละถังประกอบด้วยท่อทางน้ำออกที่มีวาล์วปิด-เปิด สูง 15 (จุดA), 30 (จุดB), 45 (จุดC) และ 60 (จุด D) เซนติเมตรจากด้านบนระบบ ตามลำดับ ภายในถังประกอบด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.45 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ต่อเข้ากับท่อทางน้ำออกที่ระดับต่างๆ ในแนวนอนเพื่อระบายน้ำโดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ตลอดความยาวท่อ ซึ่งรูที่เจาะนี้อยู่ด้านล่างเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตัน (รูปที่ 3.1 ข)

2) บรรจุกรวดหยาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร สูง 7 เซนติเมตร จากนั้นบรรจุกรวดละเอียดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร สูง 3 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้ทรายอุดตันทางน้ำออกแล้วรองด้วยแผ่นตาข่ายพลาสติกขนาดรู 1x1 มิลลิเมตร จากนั้นบรรจุทรายหยาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร สูง 60 เซนติเมตร และชั้นบนสุดบรรจุกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร และกรวดละเอียดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร สูง 3 เซนติเมตร เพื่อกรองเศษวัสดุที่มีขนาดใหญ่

3) เติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบทางด้านบนโดยใช้ปั๊มสูบน้ำจากถังจ่ายน้ำเสียรวม และทำการรวบรวมน้ำที่ออกจากระบบผ่านทางท่อที่ระดับต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 ก



(ข)

รูปที่ 3.1 ภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวดิ่ง
(ก) โครงสร้างภายในระบบบึงประดิษฐ์ (ข) ท่อทางออกของน้ำ

3.2.3.2 การศึกษาความพรุนของตัวกลาง (Total porosity, E)

เพื่อศึกษาอัตราการไหลของระบบโดยใช้วิธี core method (Dane, 2002) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 1) เก็บตัวอย่างแบบไม่ทำลายโครงสร้าง (undisturbed sampling) 2 จุดภายในระบบตามเส้นทแยงมุมที่ระดับความลึก 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตร ตามลำดับในชั้นทรายดังรูปที่ 3.2
- 2) วิเคราะห์หาความหนาแน่นรวม (bulk density, ρ_b) ตามรายละเอียดในภาคผนวก ก-1
- 3) วิเคราะห์หาความหนาแน่นของอนุภาค (particle density, ρ_s) ตามรายละเอียดในภาคผนวก ก-2
- 4) คำนวณหาความพรุนของตัวกลาง (Total porosity, E) ดังสมการที่ 2.1 ในบทที่ 2



รูปที่ 3.2 การเก็บตัวอย่างแบบไม่ทำลายโครงสร้าง (undisturbed sampling)

3.2.3.3 การศึกษาการกระจายตัวของสารภายในระบบ (Tracer Test)

การศึกษาการกระจายตัวในระบบบึงประดิษฐ์ทั้ง 3 ระบบ ใช้วิธี Tracer Test ซึ่งใช้โบรไมด์เป็นตัวทดสอบ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายโบรไมด์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำภายในระบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ภายหลังจากตัวกลางในระบบ

3) เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบที่จุด D ทุก ๆ 12 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นโบรไมด์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี

4) นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาพลอตกราฟระหว่างความเข้มข้นของโบรไมด์กับเวลาเพื่อคำนวณหาค่าการกระจายตัวภายในระบบโดยใช้สมการที่ 2.17 และ 2.19 ในบทที่ 2

3.2.3.4 การปรับสภาพของระบบ

ในการเริ่มต้นเดินระบบต้องทำการปรับสภาพระบบ เพื่อสร้างฟิล์มชีวภาพ (biofilm) และทำให้พืชคุ้นเคยกับน้ำเสียที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ปลูกต้นคล้าน้ำ และต้นกกร่ม ลงในระบบบึงประดิษฐ์ แบ่งพืชแต่ละชนิดออกเป็น 4 กอ เลือกให้แต่ละกอให้มีความยาวราก และความสูงลำต้นใกล้เคียงกัน โดยรากเริ่มต้นยาวประมาณ 20 ซม. และลำต้นเริ่มต้นสูงประมาณ 90 - 96 เซนติเมตร ปลูกในระบบให้มีการกระจายตัวเท่าๆ กัน ในการศึกษาประกอบด้วย 3 ระบบ ดังนี้

- (1) ระบบที่ 1 ชุดควบคุม ไม่มีการปลูกต้นไม้
- (2) ระบบที่ 2 ปลูกต้นคล้าน้ำ (*Thalia geniculata* L.)
- (3) ระบบที่ 3 ปลูกต้นกกร่ม (*Cyperus involucratus* Rottb.)

2) ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร โดยควบคุมระยะเวลาพักเก็บของแต่ละระบบที่ 5 วัน เป็นเวลาอย่างน้อย 1 เดือน เพื่อสร้างฟิล์มชีวภาพและปรับสภาพพืชให้คุ้นเคยกับน้ำเสีย

3) เก็บตัวอย่างน้ำที่จุดน้ำออก (D) มาวิเคราะห์ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) เพื่อหาระยะเวลาที่ระบบอยู่ในระยะคงตัว (Steady state)

3.2.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์ แสดงในตารางที่ 3.2 มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) เริ่มเดินระบบที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร โดยควบคุมระยะเวลาพักเก็บของระบบ เท่ากับ 5 วัน ด้วยอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณจากความพรุนของตัวกลาง และปริมาตรช่องว่างในระบบ ซึ่งจ่ายน้ำเข้าระบบ 2 รอบต่อวัน (ทุกๆ 12 ชั่วโมง) โดยตั้งเวลาอัตโนมัติ

2) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้าระบบ และออกจากระบบที่จุด D วิเคราะห์ค่าที่ไอซี เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจนกระทั่งระบบเข้าสู่ระยะ Steady State เมื่อค่าที่ไอซีคงที่ โดยการเก็บตัวอย่างน้ำออกจากระบบจะต้องปล่อยปริมาตรน้ำที่ค้างท่อ 100 มิลลิตรออกก่อนเสมอ

3) เก็บตัวอย่างน้ำ โดยการเก็บตัวอย่างน้ำออกจากระบบจุด (D) จะต้องปล่อย ปริมาณน้ำที่ค้างท่อ 100 มิลลิลิตรออกก่อนเสมอ วิเคราะห์หา พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด ดีโอ อุณหภูมิ พีเอช ความขุ่น และค่าการนำไฟฟ้า ดังแสดงใน ตารางที่ 3.3

4) เมื่อระบบเข้าสู่ระยะ Steady State เก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน วันละ 2 ครั้ง คือช่วงเวลา 05.00 น. และ 17.00 น. ที่จุด D (60 เซนติเมตรจากด้านบนระบบ) วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด ดีโอ ความขุ่น อุณหภูมิ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณน้ำฝน เพื่อ ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และฟอสฟอรัสดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.3

5) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก จุด A (15 ซม.), B (30 ซม.), C (45 ซม.) และ D (60 ซม.) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดในแต่ละระดับความลึก

6) บันทึกช่วงเวลาที่รับแสงแดด เพื่อบ่งชี้ช่วงเวลาที่พืชได้รับแสงแดดในแต่ละวัน

7) บันทึกระดับที่ระบบอ้อมตัวด้วยน้ำ โดยวัดความสูงของน้ำภายในระบบบริเวณท่อน้ำออก (over flow) ทุกวัน

8) บันทึกอัตราการใช้น้ำของระบบ โดยการวัดปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ (จุด D) 2 ครั้งต่อสัปดาห์ เพื่อศึกษาอัตราการระเหย และการอัตราการใช้น้ำของพืชภายในระบบ

9) บันทึกการเจริญเติบโตของพืชในระบบ โดยจดบันทึกความสูงลำต้น จำนวนหน่อ และดอก ก่อน และหลังเสร็จสิ้นสถานะการดำเนินงาน เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเจริญเติบโตของพืช

10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4 – 9 แต่เพิ่มค่าความเข้มข้นของซีโอดีเป็น 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษา	ปัจจัยควบคุม
ชนิดของพืช	- ต้นคล้าน้ำ (<i>Thalia geniculata</i> L.) - ต้นกรั่ม (<i>Cyperus involucratus</i> Rottb.)	- HRT เท่ากับ 5 วัน - พีเอช เท่ากับ 5.5- 6.8 - COD:N:P 125:10:2 - ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์	- 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร - 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร - 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร	- ชนิดของพืช - HRT เท่ากับ 5 วัน - พีเอช เท่ากับ 5.5- 6.8 - COD:N:P 125:10:2
ระดับความลึก	- ระดับผิวดิน - 15 เซนติเมตร - 30 เซนติเมตร - 45 เซนติเมตร - 60 เซนติเมตร	- HRT เท่ากับ 5 วัน - ชนิดของพืช - พีเอช เท่ากับ 5.5- 6.8 - COD:N:P 125:10:2 - ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่ก่อนเข้าระบบ และออกจากระบบ (APHA, AWWA and WEF, 1995)

ลำดับ	พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
1	ค่าสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	Total Organic Carbon Analyzer
2	ค่าซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Titrimetric Method
3	ทีเคเอ็น (TKN)	Kjeldahl Digestion
5	ฟอสเฟตทั้งหมด (TP)	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method
6	ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO Meter
7	อุณหภูมิ	Thermometer
8	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH Meter
9	ค่าความขุ่น	Turbid meter
10	ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	Conductivity meter

3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากน้ำเสียชุมชนท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้น้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิดำเนินการตามหัวข้อ 3.2.3.5 โดยทำการศึกษาเพียงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเพียงอย่างเดียว ไม่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระดับต่างๆ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งชุมชนจากท่าอากาศยานสนามบินสุวรรณภูมิโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง โดยการทดลองแบบครึ่ง ปีวิจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของพืช ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และระดับความลึกของระบบบึงประดิษฐ์

4.1 ผลการศึกษาการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

4.1.1 ความพรุนของตัวกลาง (Total porosity, E)

จากการศึกษาความพรุนของตัวกลาง เพื่อหาอัตราการไหลของระบบโดยใช้ core ในการเก็บตัวอย่างแบบไม่ทำลายโครงสร้างชั้นตัวกลาง โดยเก็บตัวอย่าง 2 จุดภายในระบบตามเส้นทแยงมุมที่ระดับความลึก 20, 40 และ 60 เซนติเมตรในชั้นทราย ผลของความพรุนของตัวกลาง แสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1- ข-4 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 ร้อยละความพรุนของตัวกลางในระบบที่ 1, 2 และ 3

ระดับความลึก (ซม.)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)
20	41.58 ± 0.95	44.97 ± 0.44	46.96 ± 1.88
40	41.25 ± 0.20	39.47 ± 0.21	41.69 ± 1.96
60	40.34 ± 0.43	42.42 ± 0.16	41.38 ± 0.32
ค่าเฉลี่ยทั้งระบบ	41.11 ± 0.53	42.29 ± 0.27	43.34 ± 1.39

จากการทดลองพบว่า ระบบที่ 1, 2 และ 3 มีร้อยละความพรุนเฉลี่ยในระบบ เท่ากับ 41.11 ± 0.53 , 42.29 ± 0.27 และ 43.34 ± 1.39 ตามลำดับ โดยในแต่ละระดับความลึกของระบบมีความพรุนใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ว่าการเรียงตัวของชั้นทรายของระบบทั้ง 3 ระบบนี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ chobanoglous (2004) ที่พบว่า ร้อยละความพรุนของทรายหยาบมีค่าประมาณ 40 โดยทั่วไประบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งมีระยะเวลาในการกักเก็บ 2 - 6 วัน (Kootatep *et al.*, 2002) ในการศึกษาที่ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บ 5 วัน ซึ่งต้องเติมน้ำเข้าระบบที่อัตราการไหล 0.007 ลิตรต่ออนาที ในระบบที่ 1, 2 และเติมน้ำเข้าระบบที่อัตราการไหล 0.008 ลิตรต่ออนาทีใน

ระบบที่ 3 ซึ่งจากการวัดอัตราไหลของน้ำเข้าระบบ พบว่า ระบบที่ 1, 2 และ 3 มีอัตราการไหล 0.0073 ± 0.0001 , 0.0073 ± 0.0001 และ 0.0076 ± 0.0001 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราดังกล่าวเป็นเวลา 10 นาที ทุก 12 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-5 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลของระบบบึงประดิษฐ์ที่ 1, 2 และ 3

ระบบที่	ปริมาตรถัง (ลิตร)	ความพรุน (%)	ระยะเวลาในการกักเก็บ(วัน)	อัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณ (ลิตร/นาที)	อัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง(ลิตร/นาที)
1 (ควบคุม)	126	41.11 ± 0.53	5	0.007	0.0073 ± 0.0001
2 (คล้าน้ำ)	126	42.29 ± 0.27	5	0.007	0.0073 ± 0.0001
3 (กรรุ่ม)	126	43.34 ± 1.39	5	0.008	0.0076 ± 0.0001

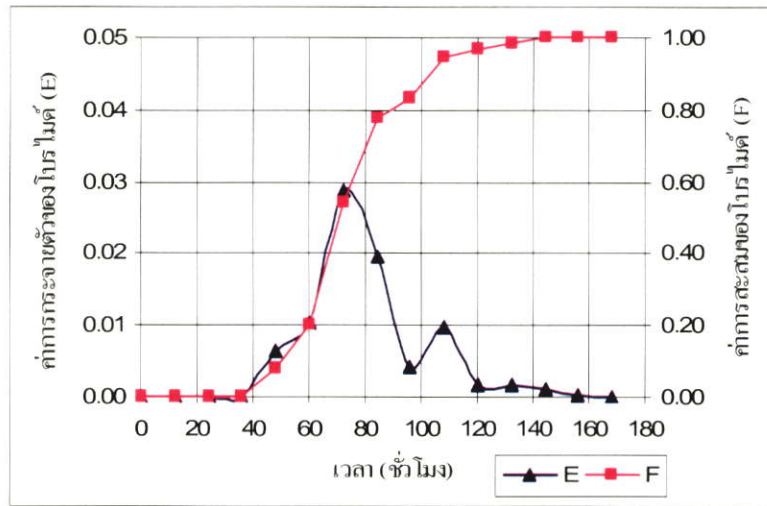
4.1.2 การกระจายตัวของสารภายในระบบบึงประดิษฐ์

ผลการกระจายตัวของสารในระบบบึงประดิษฐ์ พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ทั้ง 3 ระบบ มีค่าของตัวเลขในการกระจายตัว (d) ประมาณ 0.01 นั่นคือ ภายในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีการกระจายตัวของสาร โบรมิเด่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-6 และ ข-7 ภาคผนวก ข) โดยระยะเวลาที่ความเข้มข้นสารของโบรมิเด่ออกจากระบบสูงสุด คือ ประมาณ 72 ชั่วโมง (3 วัน) จากผลการศึกษา Tracer Test ของสาร โบรมิเด่ พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์เป็นแบบชนิดไหลเป็นช่วงไม่เป็นที่ไปตามอุดมคติ เนื่องจากมีค่าการกระจายตัวภายในระบบน้อยกว่า 0.05 (Tchobanoglous, 2004) โดยในแต่ละครั้ง (batch) จะมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำของระบบประมาณ 3 - 5 วัน

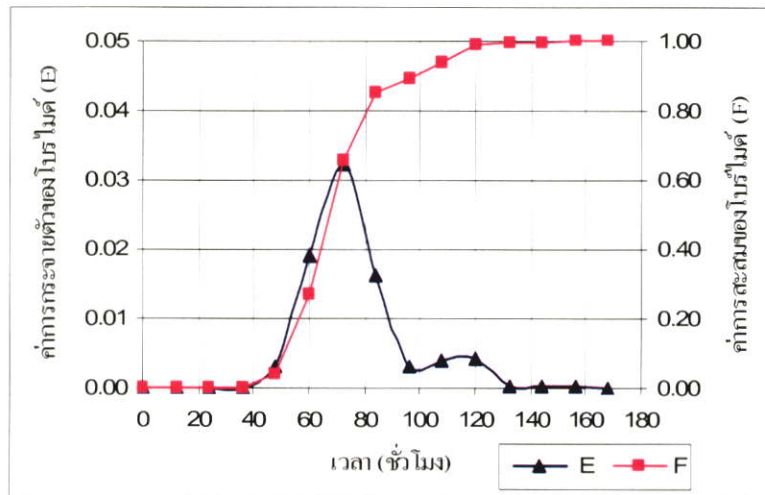
4.1.3 อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชภายในระบบบึงประดิษฐ์

จากการศึกษาอัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชภายในระบบ โดยการวัดปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ ที่เวลา 17.45 น. วัดระดับที่น้ำอ้อมตัวภายในระบบ (Saturation zone) ทุกวันที่เวลา 16.50 น. บันทึกช่วงเวลาที่ต้นพืชได้รับแสงแดดทุกวันตลอดการทดลอง และวัดปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการทดลอง (ระหว่างวันที่ 26 กุมภาพันธ์ ถึงวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2550) ผลการศึกษาอัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชแสดงในตารางที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-8 - ข-11 ภาคผนวก ข)

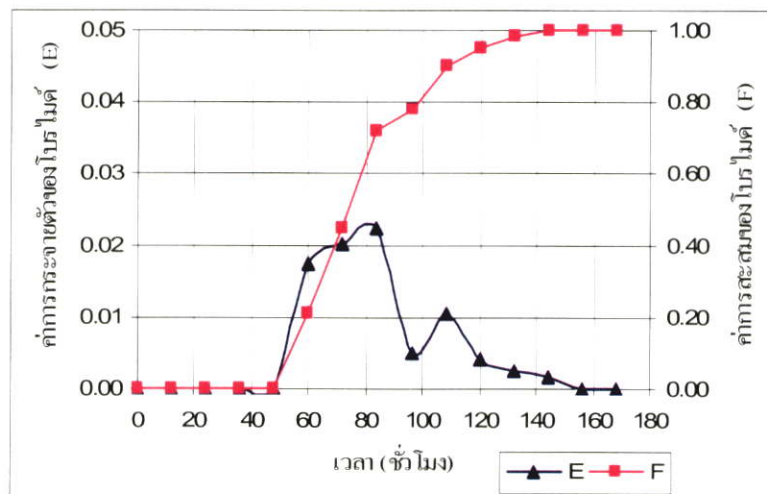
จากผลการศึกษาพบว่า พืชได้รับแสงแดดเฉพาะในช่วงเช้า คือ ระหว่างเวลา 7.30 น. ถึง 11.30 น. เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ในการทดลอง ถึงแม้ได้รับแสงแดดในช่วงเช้าเพียงช่วงเดียว แต่จากผลการทดลองพบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี เนื่องจากต้นคล้าน้ำ และต้นกรรุ่ม พืชที่ไม่ต้องการแสงแดดมาก ระบบที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราการระเหยของน้ำ 2.09 ± 0.06 ลิตรต่อวัน



(ก) ระบบที่ 1 (คววม)



(ข) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)



(ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการกระจายตัว และการสะสมตัวของสารในระบบที่เวลาต่างๆ
(ก) ระบบที่ 1 (คววม) (ข) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) (ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

ส่วนในระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) มีอัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืช เท่ากับ 2.44 ± 0.12 และ 2.31 ± 0.11 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่ 2 และ 3 มีการปลูกพืช จึงทำให้อัตราการลดลงของน้ำในระบบสูงกว่าระบบที่ 1 ที่ไม่มีการปลูกพืช เนื่องจากการควบแน่นไปใช้ของพืช

ตารางที่ 4.3 อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืช และระดับที่น้ำอ้อมตัวภายในระบบ

ระบบที่	ปริมาณน้ำเข้าระบบ (ลิตร)	ปริมาณน้ำออกจากระบบ (ลิตร)	ระดับที่น้ำอ้อมตัวภายในระบบ (ซม.)	อัตราการระเหยและอัตราการใช้น้ำของพืช (ลิตร/วัน)
1	5.20	3.11 ± 0.06	48.2 ± 4.62	$2.09 \pm 0.06^*$
2	5.30	2.86 ± 0.12	45.3 ± 5.32	2.44 ± 0.12
3	5.40	3.09 ± 0.11	46.0 ± 4.35	2.31 ± 0.11

* หมายถึง : มีแต่อัตราการระเหยเพียงอย่างเดียว

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในโตรเจน และฟอสฟอรัส ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวดิ่ง

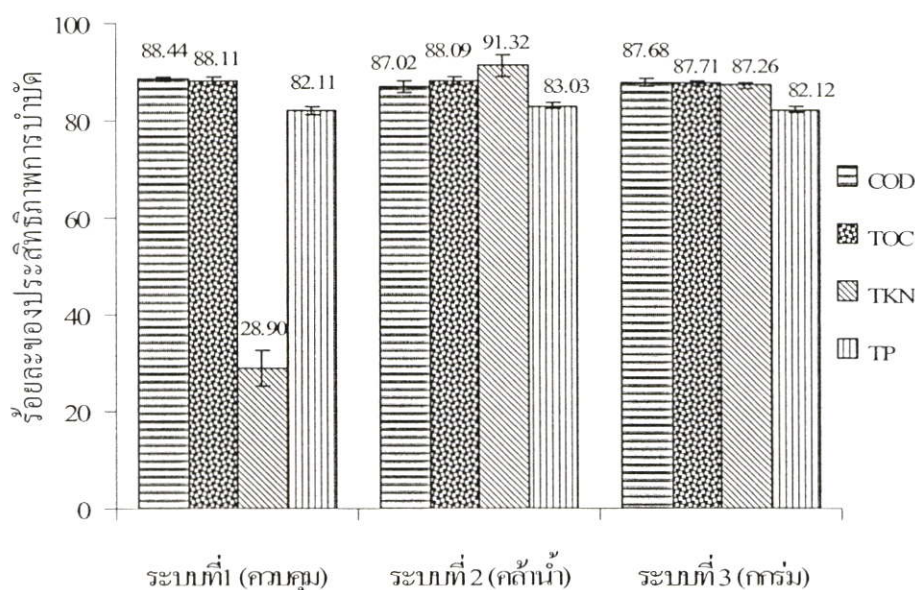
4.2.1 ชนิดของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

จากผลการทดลองที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยค่าซีโอดี และทีโอซีของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข) คือ มีร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 87 - 88 จากผลการทดลอง พบว่า พืชจะไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำได้ในระบบจะถูกกำจัดโดยกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรปที่ใช้ออกซิเจน กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่สารอินทรีย์คาร์บอนบางส่วนจะถูกดูดซับบนชั้นตัวกลาง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watson *et al.* (1989) และ Cooper *et al.* (1996) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-1 และ ก-2 ภาคผนวก ก)

ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยค่าทีเคเอ็นของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข) คือ ร้อยละการกำจัด 87 - 91 แต่สูงกว่าระบบที่ 1 (ควบคุม) มีร้อยละการกำจัด 28.90 เนื่องจากระบบที่ 2 และ 3 มีการปลูกพืช ดังนั้น รากพืชจะช่วยในการแทรกผ่าน

ของออกซิเจนในชั้นตัวกลาง นอกจากนี้ ออกซิเจนยังสามารถแพร่จากบรรยากาศผ่านเข้าสู่ต้นของพืช และออกสู่ราก (U.S EPA, 1998) ทำให้มีปริมาณออกซิเจนในบริเวณที่มีรากพืชที่ระดับความลึกลงไปของระบบ ในสถานะที่มีออกซิเจนในโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในรูปแอมโมเนียถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรดในโตรเจน โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งพืชสามารถนำไปในการเจริญเติบโต รวมทั้งพืชสามารถดึงไอออนแอมโมเนียในโตรเจนไปใช้ได้ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในระบบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Drizo (1997) ที่พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ไม่มีปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนต่ำกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่มีพืช ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3 ภาคผนวก ค)

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งวิเคราะห์ด้วยค่าฟอสเฟตทั้งหมดของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คลื่นน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตารางที่ ช-3 ภาคผนวก ช) คือ มีร้อยละการกำจัดฟอสฟอรัส 82 - 83 ซึ่งฟอสฟอรัสจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (biological oxidation) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-4 ภาคผนวก ค) จากการทดลองไม่พบความแตกต่างระหว่างระบบที่ปลูกพืช และระบบควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบมีค่าความเข้มข้นต่ำ (4.81 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสอาจเกิดจากการดูดซับบนชั้นตัวกลาง และการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบเท่านั้น



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมดของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้งด้วยพืชต่างชนิดกัน

4.2.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรุ่ม) เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข และ ค (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 และ ง-3 - ง-4 ภาคผนวก ง) ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งถูกย่อยสลายได้ง่ายจุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และพืชช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ระบบทำให้มีสถานะเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ ทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ 1 (คววม) จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์จาก 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เป็น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนของระบบที่ 1 (คววม) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 88.44 เป็น 93.91 เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้จุลินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้น ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียเป็น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนลดลง (ร้อยละ 81.48) เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียอาจมีค่าเกินขีดความสามารถที่จุลินทรีย์จะย่อยสลายได้ทัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนอาจไม่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-2 ภาคผนวก ง)

ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรุ่ม) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข และ ค (ภาคผนวก ง-6 - ง-7 ภาคผนวก ง) เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ยกเว้นประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าลดลงเล็กน้อย การกำจัดไนโตรเจนในระบบอาจเกิด เนื่องจากกระบวนการต่างๆ ในระบบ ได้แก่ 1) กระบวนการดูดซับ เนื่องจากไนโตรเจนอยู่ในรูปแอมโมเนียมคลอไรด์ เมื่อเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบแอมโมเนียมไอออนจะจับกับประจุลบบนผิวของอนุภาคของทราย ทำให้แอมโมเนียมถูกดูดติดไว้ที่ชั้นทราย 2) กระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายอิงที่อยู่ภายในระบบเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งหมดในรูปของแอมโมเนียมไปเป็นไนเตรตไนโตรเจนในสถานะที่มีออกซิเจน และ 3) การนำไปใช้ของรากพืชในรูปของไนเตรตไนโตรเจน และแอมโมเนียมไอออน ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้มีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ 1 (คววม) พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนต่ำ ถึงแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่า ร้อยละ 51 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก (ภาคผนวก ง-5 ภาคผนวก ง) เนื่องจากระบบไม่มีการนำไนเตรตไนโตรเจน และแอมโมเนียมไอออนไปใช้โดยพืช จากผลการทดลองพบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้เมื่อความเข้มข้นของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แสดงว่า พืชมีความทนทานต่อปริมาณไนโตรเจนที่มีความเข้มข้นดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.4

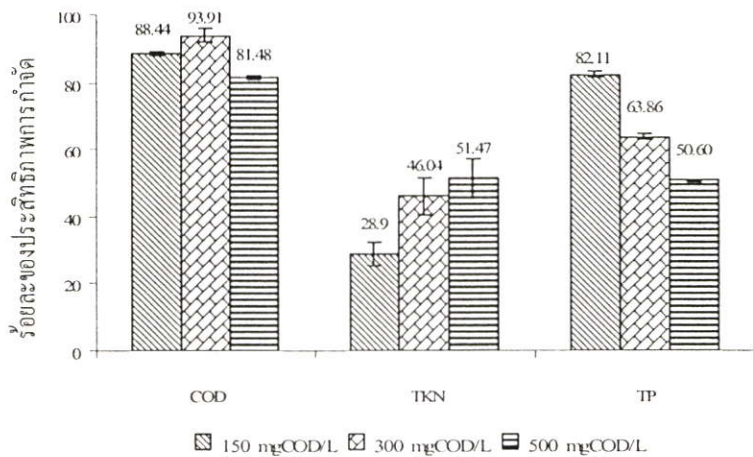
ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-9 ภาคผนวก ง) ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะที่มีอากาศ จุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เก็บในสะสมไว้ในเซลล์ในรูปพีเอชบี (poly-β-hydroxybutyrate) ได้เป็นพลังงานและเซลล์ใหม่ ทำให้ปริมาณพีเอชบีที่สะสมในเซลล์ลดลง ดังนั้นพีเอโอ (polyphosphate accumulating organism) ซึ่งใช้พลังงานที่เกิดจากการออกซิไดซ์พีเอชบี เพื่อนำฟอสฟอรัสมาสร้างเป็นโพลีฟอสเฟตในเซลล์ต่อไป (ธงชัย, 2544) จึงเกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้น และคล้าน้ำเป็นพืชดอกที่ต้องการฟอสเฟตในการเจริญเติบโต และสร้างดอก ส่งผลให้ระบบที่ปลูกคล้าน้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่า คือ ร้อยละ 83.03 , 87.60 และ 89.63 ที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบที่ 3 (กรัม) และระบบที่ 1 (ควบคุม) ลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5 - 4.7) ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถย่อยสลายฟอสฟอรัสได้ในระยะเวลาที่กักเก็บสั้นๆ เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ U.S. EPA (1998) ที่พบว่าระบบบึงประดิษฐ์จะไม่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูง เพราะมีระยะเวลาในการกักเก็บสั้น อย่างไรก็ตาม พบว่าระบบที่ 3 (กรัม) มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าระบบที่ 1 (ควบคุม) เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก และ ค (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-8 และ ง-10 ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.4 การเจริญเติบโตของพืชที่ใช้ในการทดลอง

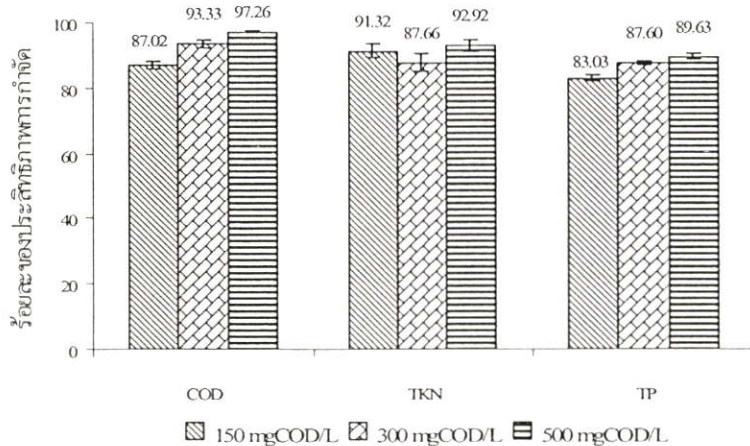
พารามิเตอร์	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)				ระบบที่ 3 (กรัม)			
	เริ่มต้น	1*	2*	3*	เริ่มต้น	1*	2*	3*
จำนวนหน่อ (หน่อ)	17	23	30	38	83	92	98	105
ความสูง(ซม.)	93	96	101	106	96	107	119	133
จำนวนดอก (ดอก)	-	12	15	16	-	-	-	-

หมายเหตุ : * 1, 2 และ 3 คือ ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

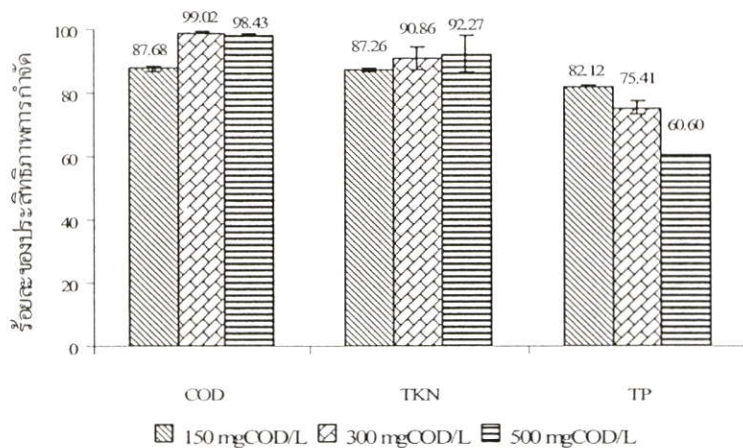
จากผลทดลองพบว่าพืชทั้ง 2 ชนิดทนต่อน้ำเสียสังเคราะห์ได้ สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงความเข้มข้น 150 - 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร คล้าน้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงกว่ากรัม เนื่องจากมีการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างดอก จากการทดลองพบว่า ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากผ่านการบำบัดโดยระบบทั้ง 3 มีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้ง สำหรับมาตรฐานน้ำทิ้งของฟอสฟอรัสยังไม่มีกำหนดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 - 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 - ง-14 ภาคผนวก ง)



(ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม)



(ข) ระบบที่ 2 (ค่าน้ำ)



(ค) ระบบที่ 3 (กรุ่ม)

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ที่เคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสีย สังกะระห์ที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม) (ข) ระบบที่ 2 (ค่าน้ำ) (ค) ระบบที่ 3 (กรุ่ม)

ตารางที่ 4.5 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอไซด์ต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งระบบ	น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง					
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)		ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)		ระบบที่ 3 (กร่ม)	
		ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีโอไซด์ (มก./ล.)	146.72 ± 2.44	16.96 ± 0.7	88.11 ± 0.72	19.04 ± 1.91	91.32 ± 2.18	18.10 ± 1.34	87.68 ± 0.91
ทีโอซี (มก./ล.)	45.51 ± 1.95	5.41 ± 0.33	88.11 ± 0.72	5.42 ± 0.34	88.09 ± 0.74	5.60 ± 0.26	87.71 ± 0.58
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	12.13 ± 0.80	8.62 ± 0.44	28.90 ± 3.64	1.05 ± 0.26	91.05 ± 2.24	1.55 ± 0.06	87.26 ± 0.53
ฟอสเฟตทั้งหมด (มก./ล.)	4.81 ± 0.04	0.86 ± 0.04	82.11 ± 0.87	0.82 ± 0.03	83.03 ± 0.63	0.86 ± 0.03	82.12 ± 0.57
ดีไอโอ (มก./ล.)	3.56 ± 0.37	3.80 ± 0.32	-	3.55 ± 0.49	-	3.73 ± 0.85	-
ความขุ่น (เอ็นทียู)	11.76 ± 0.60	17.13 ± 0.72	-	2.38 ± 0.13	-	0.67 ± 0.29	-
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมน/ซม.)	630 ± 15	745 ± 59	-	772 ± 18	-	911 ± 6.60	-
พีเอช	6.40 ± 0.25	7.19 ± 0.11	-	7.15 ± 0.26	-	7.01 ± 0.09	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.3 ± 0.5	29.1 ± 0.7	-	29.3 ± 0.7	-	29.1 ± 0.7	-

ตารางที่ 4.6 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง					
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)		ระบบที่ 2 (กลิ่นน้ำ)		ระบบที่ 3 (กรรม)	
		ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	317.76 ± 8.81	19.4 ± 6.7	93.91 ± 2.09	8.6 ± 1.0	97.28 ± 0.33	3.04 ± 1.54	99.02 ± 0.50
ทีไอซี (มก./ล.)	91.55 ± 5.95	8.95 ± 0.93	90.23 ± 1.01	5.17 ± 0.53	94.36 ± 0.58	4.96 ± 0.16	94.58 ± 0.18
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	24.14 ± 1.41	13.03 ± 1.30	46.04 ± 5.39	2.98 ± 0.65	87.66 ± 2.70	2.21 ± 0.83	90.86 ± 3.44
ฟอสเฟตทั้งหมด (มก./ล.)	9.78 ± 0.33	3.35 ± 0.07	63.86 ± 0.69	1.21 ± 0.08	87.60 ± 0.79	2.40 ± 0.22	75.41 ± 2.28
ดีไอ (มก./ล.)	2.98 ± 0.80	1.45 ± 0.83	-	3.63 ± 0.28	-	3.05 ± 0.40	-
ความขุ่น (เอ็นทียู)	16.66 ± 0.78	37.02 ± 1.46	-	6.82 ± 0.95	-	2.12 ± 0.08	-
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมน/ซม.)	779 ± 8	1005 ± 15	-	1222 ± 93	-	1168 ± 28	-
พีเอช	5.21 ± 0.33	7.39 ± 0.37	-	7.68 ± 0.44	-	7.29 ± 0.26	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.7 ± 0.3	29.1 ± 0.4	-	29.3 ± 0.5	-	29.0 ± 0.5	-

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของน้ำเสียตั้งตระหง่าความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง					
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)		ระบบที่ 2 (คลีน)		ระบบที่ 3 (กรรรม)	
		ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	520 ± 12.65	81.48 ± 0.32	14.24 ± 1.91	97.26 ± 0.37	8.16 ± 1.31	98.43 ± 0.25	
ทีไอซี (มก./ล.)	160.43 ± 3.39	75.90 ± 1.63	7.91 ± 0.97	95.07 ± 0.60	9.42 ± 0.91	94.13 ± 0.57	
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	41.29 ± 4.13	51.47 ± 5.86	2.95 ± 0.79	92.92 ± 1.91	3.19 ± 0.40	92.27 ± 0.97	
ฟอสเฟตทั้งหมด (มก./ล.)	16.49 ± 0.44	50.60 ± 0.29	1.03 ± 0.06	89.63 ± 0.65	3.92 ± 0.05	60.60 ± 0.56	
ดีไอ (มก./ล.)	3.27 ± 0.61	-	1.28 ± 0.18	-	3.05 ± 0.40	-	
ความขุ่น (เอ็นทียู)	26.66 ± 0.78	-	10.75 ± 0.77	-	12.08 ± 0.29	-	
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมน/ซม.)	1025 ± 9	-	1825 ± 64	-	1768 ± 109	-	
พีเอช	5.36 ± 0.24	-	6.70 ± 0.35	-	6.56 ± 0.06	-	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30.4 ± 0.2	-	30.4 ± 0.2	-	30.4 ± 0.2	-	

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ค่าความชุ่มที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) มีค่าลดลง เนื่องจากระบบทั้ง 2 มีการปลูกพืชทำให้การลดความชุ่มเกิดจากชั้นทรายกรอง และการกรองผ่านชั้นรากพืช ส่งผลให้ช่วยในการกำจัดสารแขวนลอยได้มากขึ้น นอกจากนี้ การชอนไชของรากพืชยังเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในชั้นตัวกลางอากาศ ทำให้จุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนสามารถสลายสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ 1 (ควบคุม) ค่าความชุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกรองที่เกิดจากชั้นทรายเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจน ทำให้น้ำเสียสังเคราะห์เกิดการเน่าเสีย ทำให้มีความชุ่มเพิ่มขึ้น

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากภายในระบบเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน เปลี่ยนจากแอมโมเนียมไอออนเป็นไนเตรตไนโตรเจน ซึ่งระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) มีการปลูกพืชเกิดกระบวนการนี้ได้ดีกว่าในระบบที่ 1 (ควบคุม) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช ดังนั้น ระบบที่ 2 และ 3 อาจมีการหลงเหลือของไนเตรตไนโตรเจนปะปนมากับน้ำทิ้ง ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าระบบที่ 1 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พบว่า ค่าความชุ่ม และค่าการนำไฟฟ้า จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 – 4.7

4.2.3 ระดับความลึกของระบบบึงประดิษฐ์

ผลการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่ระดับความลึก 4 ระดับ คือ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร พบว่าในช่วง 15 เซนติเมตร ไม่สามารถเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำ และอัตราการใช้น้ำของพืช ทำให้ระดับน้ำในระบบต่ำกว่าระดับดังกล่าว ที่ระดับ 30 เซนติเมตรจากผิวดิน ระบบบึงประดิษฐ์ทั้ง 3 ระบบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสได้สูงสุด และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ เนื่องจากที่ระดับ 30 เซนติเมตร มีการแพร่กระจายของออกซิเจนจากบรรยากาศมาสู่ผิวน้ำชั้นตัวกรอง และออกซิเจนสามารถแพร่กระจายจากบรรยากาศผ่านลำต้นพืช และแพร่ออกทางรากของพืช และที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น จะมีปริมาณออกซิเจนลดลง และสารอาหารเหลือน้อย ทำให้กระบวนการย่อยสลายจึงช้าลงจนเกือบคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-1- จ-9 ภาคผนวก จ) ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) จะมีค่าใกล้เคียงทั้งระดับความลึก และความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-10- จ-18 ภาคผนวก จ) นั่นคือ ชนิดของพืชไม่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจน แต่พืชมีความสำคัญใน

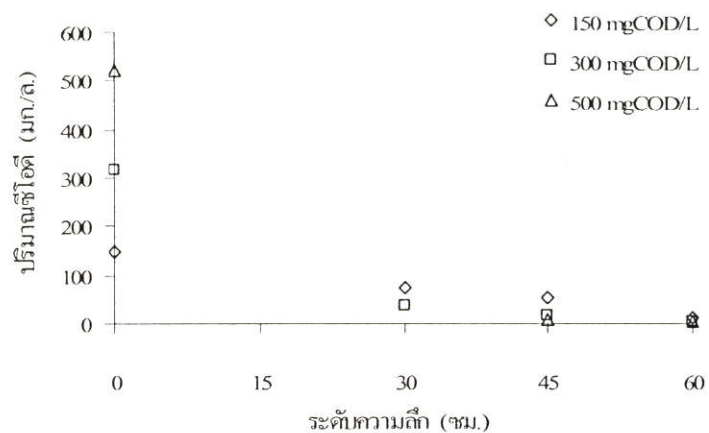
การกำจัดไนโตรเจน ดังเห็นได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และ 3 (กรรุ่ม) ดีกว่าระบบที่ 1 (ควบคุม) มาก

สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัส พบว่า ระดับความลึกมีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส เมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ค่าความเข้มข้นสูง (500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร) ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสต้องการเวลากักเก็บนาน จากการทดลอง พบว่าชนิดของพืชมีผลต่อการบำบัด จะเห็นได้จาก ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ 3 (กรรุ่ม) เนื่องจากคล้าน้ำเป็นพืชดอก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-19- จ-27 ภาคผนวก จ)

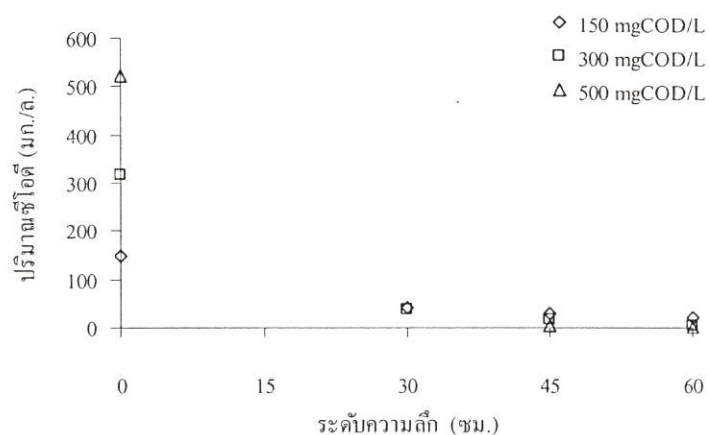
จากผลการคำนวณ พบว่า ระบบมีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.03 – 0.10 กิโลกรัมต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร และจากการทดลอง พบว่า ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมคือ 3 วัน ดังนั้น อัตราการไหลของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรุ่ม) เท่ากับ 17.64, 17.22 และ 18.06 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และอัตราการไหลของระบบที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน

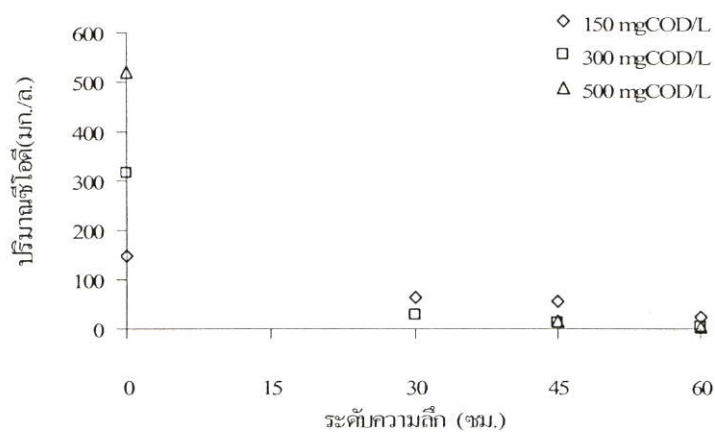
ความเข้มข้น (มก.ซีโอดี/ล.)	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (กก./วัน-ลบ.ม.)			อัตราการไหลที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน (ล./วัน)		
	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)
150	0.03	0.03	0.03	17.64	17.22	18.06
300	0.06	0.06	0.06	17.64	17.22	18.06
500	0.10	0.10	0.10	17.64	17.22	18.06



(ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม)

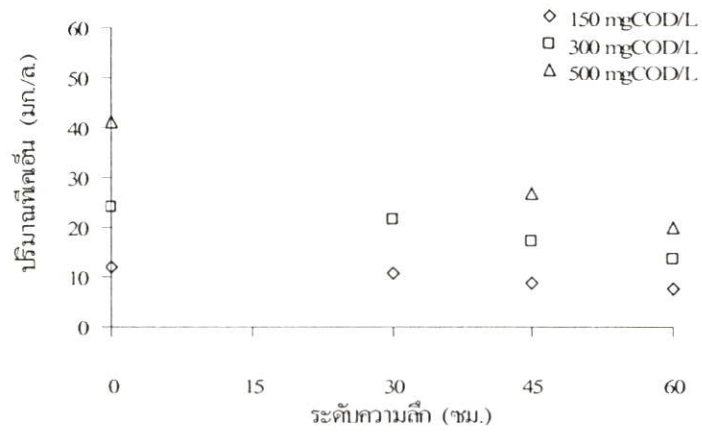


(ข) ระบบที่ 2 (คลื่นน้ำ)

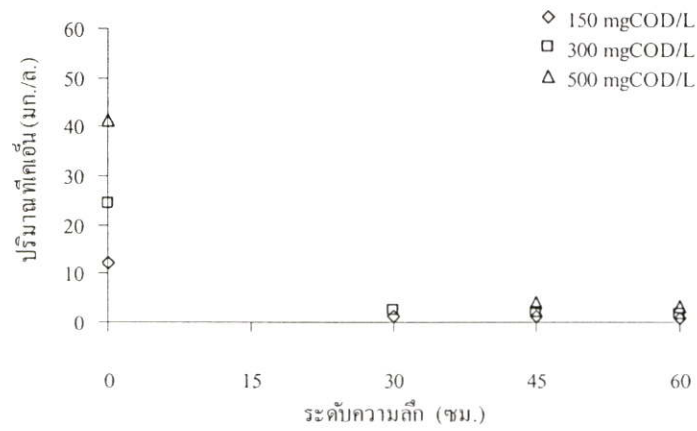


(ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

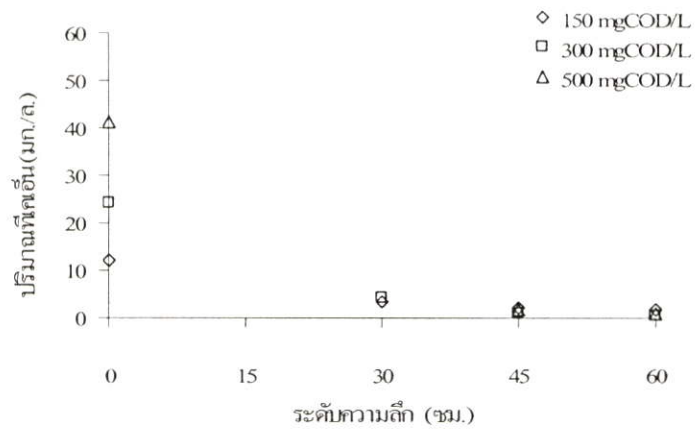
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณซีโอดีที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม) (ข) ระบบที่ 2 (คลื่นน้ำ) (ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)



(ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม)

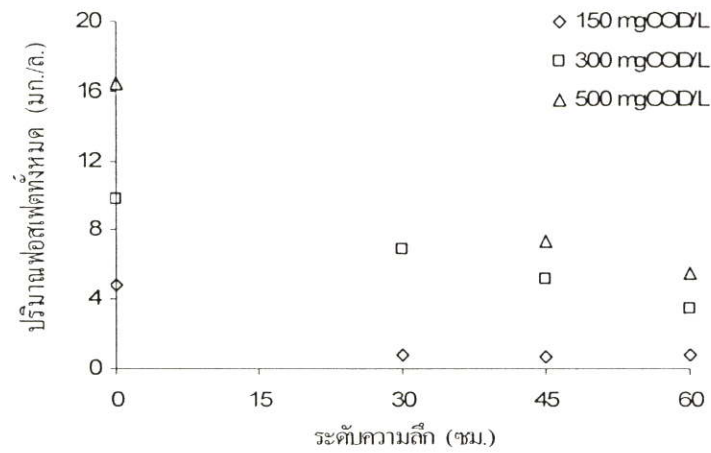


(ข) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)

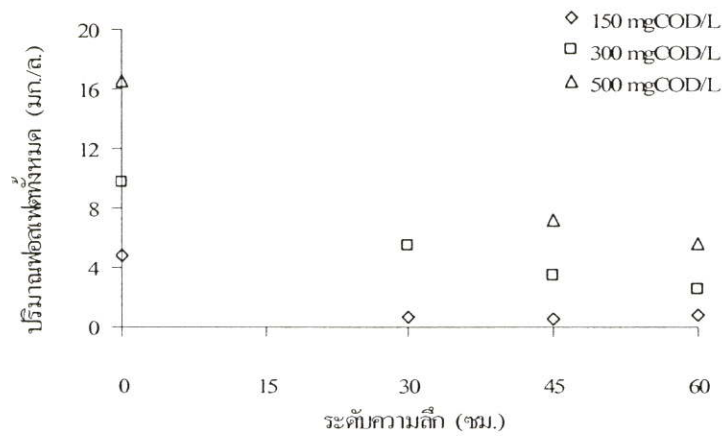


(ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

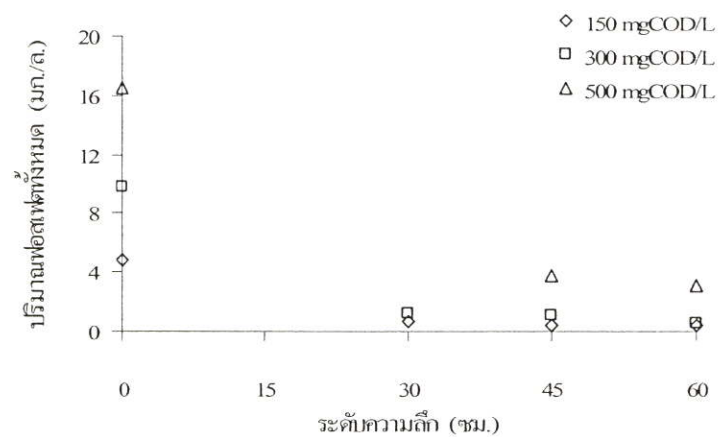
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบปริมาณที่เคเอ็นที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม) (ข) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) (ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)



(ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม)



(ข) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)

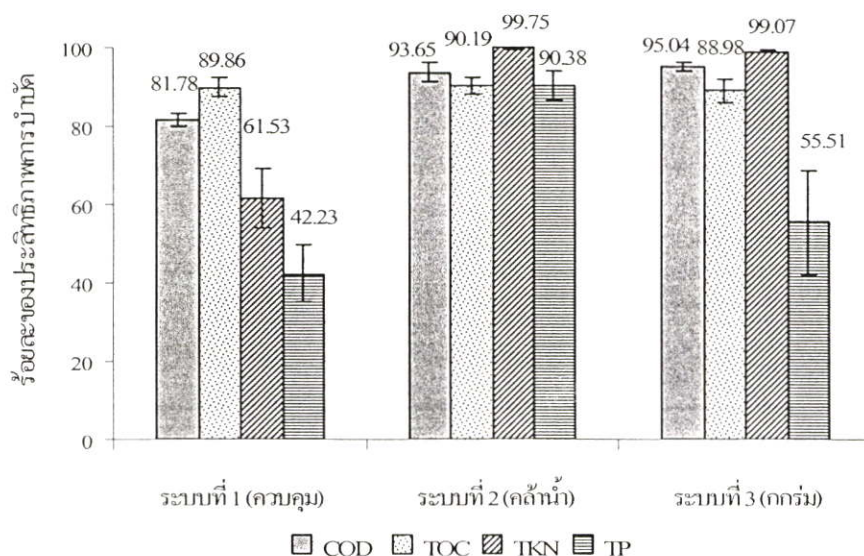


(ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดที่ระดับความลึก 0, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ก) ระบบที่ 1 (ควบคุม) (ข) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) (ค) ระบบที่ 3 (กกร่ม)

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

จากผลการทดลองพบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ที่ 2 (คล้าน้ำ) และ 3 (กรรรม) สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนในน้ำทิ้งชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิได้ใกล้เคียงกัน แต่ระบบบึงประดิษฐ์ที่ 2 (คล้าน้ำ) สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ฉ-1- ฉ-4 ภาคผนวก ฉ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียดังเคราะห์ จากการทดลองพบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ 2 (คล้าน้ำ) และ 3 (กรรรม) สามารถบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดไนโตรเจน เนื่องจากน้ำทิ้งจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นน้ำจากห้องสุขา จึงปริมาณไนโตรเจนสูง อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อน้ำทิ้งผ่านระบบบึงประดิษฐ์จะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ส่วนชุดควบคุมมีปริมาณไนโตรเจนสูงมากกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ทีเคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมด โดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้งในน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ตารางที่ 4.9 ลักษณะของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ชีวิตินแนวดิ่ง

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ชีวิตินแนวดิ่ง					
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)		ระบบที่ 2 (คลำน้ำ)		ระบบที่ 3 (กกรม)	
		ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	ค่าที่วัดได้	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	165.30 ± 37.81	30.4 ± 8.9	81.78 ± 1.52	10.10 ± 3.0	93.65 ± 2.39	8.00 ± 1.6	95.04 ± 1.25
ทีไอซี (มก./ล.)	49.79 ± 9.44	5.05 ± 1.23	89.86 ± 2.48	4.89 ± 1.12	90.19 ± 2.25	5.44 ± 1.41	88.98 ± 2.83
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	296.99 ± 14.71	137.48 ± 15.21	53.59 ± 6.24	0.90 ± 0.45	99.70 ± 0.15	2.24 ± 1.56	99.22 ± 0.54
ฟอสเฟตทั้งหมด (มก./ล.)	30.76 ± 9.87	18.23 ± 7.86	42.23 ± 7.24	3.20 ± 2.03	90.38 ± 3.73	12.80 ± 9.08	55.51 ± 13.43
ดีไอ (มก./ล.)	1.08 ± 0.53	1.11 ± 0.08	-	1.38 ± 0.24	-	1.57 ± 0.36	-
ความขุ่น (เอ็นทียู)	41.95 ± 9.44	23.74 ± 1.92	-	4.36 ± 1.20	-	12.04 ± 0.47	-
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมน/ซม.)	1160 ± 226	1464 ± 206	-	2066 ± 575	-	1882 ± 1192	-
พีเอช	7.45 ± 0.23	6.91 ± 0.14	-	7.40 ± 0.52	-	7.25 ± 0.43	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.2 ± 2.1	28.6 ± 0.1	-	28.6 ± 0.1	-	28.6 ± 0.0	-

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ 1 (ควมคุม), 2 (คล้าน้ำ) และ 3 (กรรุ่ม) มีความพรุนเท่ากับ 42%, 41% และ 43% ตามลำดับ ซึ่งความพรุนภายในระบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการไหลของระบบ เท่ากับ 0.007, 0.007 และ 0.008 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

2. การไหลของน้ำภายในระบบมีลักษณะการไหลแบบช่วง (Plug flow) และมีการกระจายตัวต่ำ เนื่องจาก ค่าตัวเลขการกระจายตัวของทั้ง 3 ระบบมีค่าน้อยกว่า 0.05

3. ตลอดการทดลองช่วงเวลาที่ระบบบึงประดิษฐ์ได้รับแสงแดด คือ 7.30 น. - 11.30 น. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ 2 (คล้าน้ำ) มีอัตราการระเหยของน้ำ และอัตราการใช้น้ำของพืชสูงสุด คือ 2.44 ± 0.12 ลิตรต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับระดับที่น้ำอิ่มตัวภายในระบบ (Saturated Zone) ของระบบที่ 2 ต่ำที่สุด คือ 45.3 ± 5.32 เซนติเมตร

4. พืชทั้ง 2 ชนิด คือ คล้าน้ำ และกรรุ่ม มีการเจริญเติบโต และทนทานกับน้ำเสียที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

5. พืชไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบบึงประดิษฐ์ แต่พืชจะมีผลต่อการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในระบบ โดยโดยการกำจัดไนโตรเจนไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช แต่การกำจัดฟอสฟอรัส จะขึ้นอยู่กับชนิดของพืช โดยพืชดอกจะสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี

6. ระบบสามารถรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 0.03 – 0.10 กก./วัน-ลบ.ม.

7. ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนที่เคเอ็น และฟอสฟอรัสจะมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในระดับความเข้มข้นที่สูงมากกว่า 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
2. ควรทำการศึกษากลไกการลดลง และการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่ระดับความลึกต่างๆ ของระบบประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวดิ่ง
3. ควรศึกษาชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ในชั้นตัวกลางที่ระดับความลึกต่างๆ ของระบบบึงประดิษฐ์
4. ควรศึกษาพืชดอกชนิดอื่น ๆ ที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มิตรนภาการพิมพ์.
- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. 2538. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- ชนิดา ปิยะสพนันท์ และ พัฒนา อนุรักษพงษ์พร. 2548. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน. ปรินญาณินพนธ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พิจิตรราชโยปถัมภ์. 2547. “บทความวิจัย.” วารสารวิทยาศาสตร์. 174-179.
- ศุวสา กานตวนิชกูร. 2544. การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ **Combined Constructed Wetland** ในเขตอากาศร้อน. เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- APHA, AWWA and WEF. 1995. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 19th Edition. USA : American Public Health Association.
- Bitton, A., Neuman, M., and Glantz, S. 1994. “Tobacco Industry Strategies for Influencing European Community Tobacco Advertising Legislation.” **The Lancet**. 359 : 1264-1265.
- Brix, H. 1994. “Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands.” **Water Science and Technology**. 29 : 71-78.
- Brix, H. and Schierup, H. 1989. “Sewage treatment in constructed reed beds Danish experiences.” **Water Science and Technology**. 21 : 89-107
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. and Shutes, R.B.E. 1996. **Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. Marlow UK : WRC Publications.
- Dane, J.H. 2002. **Physical Method**. In **Methods of soil analysis**, Part 4 , 5th edition
- Drizo, A., Frost, C.A., Smith, K.A. and Grace, J. 1997. “Phosphate and Ammonium Removal by Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow using Shale as a Substrate.” **Water Science and Technology**.

- Faulkner, S.P. and Richardson, C.J. 1989. **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural**. Chelsea, Michigan : Lewis Publishers.
- Iamchaturapatr, J., Yi, S.W. and Rhee, J.S. 2006. **Nutrient removal by 21 aquatic plants for vertical free surface –flow (VFS) constructed wetland**. 29: 287-293
- Klomjek, P. and Nitorisavut, S. 2005. “Constructed Treatment Wetland: A Study of Eight Plant Species under Saline Conditions.” **Chemosphere**. 58 : 585-593.
- Koottatep, T., Polprasert, N., Oanh, T. K., Surinkul, N., Montangero, A. and Strauss, M. 2002. **Constructed Wetlands for Septage Treatment – Towards Effective Faecal Sludge Management**. Bangkok : Asia Institute of Technology.
- Luederitz, V., Eckert, E., Lange, W.M., Lange, A. and Gersberg, M.R. 2000. “Nutrient Removal Efficiency and Resource Economics of Vertical Flow and Horizontal Flow Constructed Wetlands.” **Ecological Engineering**. 18 : 157-171
- Patrick, W.H. Jr. and Khalid, R.A. 1974. “Phosphate Release and Sorption by Soils and Sediments: Effect of Aerobic and Anaerobic Conditions.” **Science**. 86 : 53-55.
- Polprasert, C. 1998. **Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Resource Recovery, Environmental System Reviews**. Bangkok : Asia Institute of Technology.
- Puetpaiboon, U. (2003). **Application of Constructed Wetlands for Treatment of Wastewater from Smoked Sheet Rubber Plants**. Thailand : Department of Civil Engineering, Songkla University.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J. and Crites, R.W. 1988. **Natural System for Waste Management and Treatment**. New York : McGraw-Hill.
- Richardson, C.J. 1985. “Mechanisms Controlling Phosphorus Retention Capacity in Freshwater Wetlands.” **Science**. 228 : 1424-1427.
- Rusch, K.A., Fontenot J. and Boldor D. 2005. “Nitrogen removal from domestic wastewater using the marshland upwelling system.” **Ecological Engineering**. 983 : 1-18
- Steiner, G.R. and R.J. Freeman, Jr. 1989. **Configuration and Substrate Design Considerations for Constructed Wetlands Wastewater Treatment**. Chelsea, MI : Lewis Publishers.
- Stowell, R., Ludwig, R., Colt, J. and Tchobanoglous, G. 1981. “Concepts in Aquatic Treatment System Design.” **Journal of Environmental Engineering Division, ASCE**. 107 : 919-940.

- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. 4th edition. New York : McGraw-Hill.
- Vloker, L., Elke, E., Martina, L.W., Andreas, L. and Richard, M.G. 2001. "Nutrient Removal Efficiency and Resource Economics of Vertical and Horizontal Flow Constructed Wetland." **Ecological Engineering**. 18(2001) : 157-171
- Vymazal, J. 1998. **Removal Mechanism and Types of Constructed Wetlands**. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment In Europe.
- Watson, J.T., Reed, S.C., Kadlec, R.H., Knight, R.L. and Whitehouse, A.E. 1989. **Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands**. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural. Chelsea, Michigan : Lewis Publishers
- Watson, J.T. 1999. **Watson's Constructed Wetlands Presentation: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural. Chelsea, Michigan : Lewis Publishers.
- U.S. EPA, 1988. Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment. EPA/625/1-88/022.
- U.S. EPA, 2000(a). Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Free Water Surface. EPA/832/F-00/024.
- U.S. EPA, 2000(b). Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Subsurface. Flow. EPA/832/F-00/023.
- U.S. EPA, 2000(c). Onsite Wastewater Treatment Systems Manual. EPA/625/R-00/008.
- [Online].Available : www.pcd.go.th
- [Online].Available : www.Bloggang.com

ภาคผนวก ก

วิธีการดำเนินการวิจัย

ก-1 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นรวม (bulk density, ρ_b)

1. วัดความสูงของ core (h) และเส้นผ่านศูนย์กลางของ core (d) ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง เพื่อหาปริมาตรที่ใช้บรรจุทราย (V_b) ดังสมการที่ ก.1

2. อบกระดาดทรายที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ใน โถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาดทรายไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3. นำกระดาดทรายในหัวข้อ 2 มาห่อ core ที่บรรจุตัวอย่าง

4. นำ core เข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บไว้ใน โถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. เคาะทรายที่บรรจุใน core ลงในบีกเกอร์

6. ชั่งน้ำหนักน้ำหนักรายตัวอย่าง (m_s)

9. คำนวณหาความหนาแน่นรวม (ρ_b) ดังสมการที่ ก.2

$$V_b = \pi r^2 h \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ

r = รัศมีของ Core (เซนติเมตร)

h = ความสูงของ Core (เซนติเมตร)

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_b} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ

m_s = มวลแห้งของตัวอย่าง (กรัม)

V_b = ปริมาตรรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ก-2 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของอนุภาค (particle density, ρ_s)

1. นำตัวอย่างทรายมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
2. นำขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร มาชั่งน้ำหนัก (m_1)
3. ชั่งทราย 12.5 กรัมใส่ในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งน้ำหนักทราย กับขวดวัดปริมาตร (m_2)
4. ต้มน้ำกลั่นจนเดือดแล้วต้มต่อไปเป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่อากาศจากนั้นปิดด้วยกระจกนาฬิกาทันที ทิ้งไว้ให้น้ำเย็น
5. เติมน้ำที่ผ่านการไล่อากาศแล้ว 20 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาดเขย่าทรายและน้ำให้เข้ากัน
6. นำไปอุ่นบนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่อากาศออกให้หมด ตั้งทิ้งไว้จนเย็น
7. ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ไล่อากาศแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (m_3)
8. ล้างขวดวัดปริมาตรให้สะอาด แล้วตั้งทิ้งสนิท เติมน้ำที่ไล่อากาศจำนวน 50 มิลลิลิตรนำไปชั่งน้ำหนัก (m_4)
9. คำนวณหาความหนาแน่นของอนุภาค (ρ_s) ดังสมการที่ ก.3

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (\text{ก.3})$$

m_1 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตร (กรัม)

m_2 = น้ำหนักตัวกลางกับขวดวัดปริมาตร (กรัม)

m_3 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรที่บรรจุตัวกลางและปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ไล่อากาศแล้ว (กรัม)

m_4 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรที่ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ไล่อากาศ (กรัม)

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาการทำงานจากระบบบึงประดิษฐ์
แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

ตารางที่ ข-1 ความหนาแน่นรวม (ρ_p) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์

ระดับความลึก (ซม.)	ระบบที่ 1 (ควมคุม)				ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)				ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)			
	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.
20	1.49	1.56	1.53	0.01	1.45	1.45	1.45	0.00	1.36	1.43	1.40	0.05
40	1.54	1.53	1.54	0.01	1.62	1.60	1.61	0.01	1.48	1.57	1.53	0.06
60	1.57	1.55	1.56	0.01	1.50	1.50	1.50	0.00	1.53	1.53	1.53	0.00

ตารางที่ ข-2 ความหนาแน่นอนุภาค (ρ_s) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์

ระดับความลึก (ซม.)	ระบบที่ 1 (ควมคุม)				ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)				ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)			
	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.
20	2.58	2.64	2.61	0.04	2.65	2.62	2.64	0.02	2.63	2.63	2.63	0.00
40	2.64	2.61	2.63	0.02	2.67	2.65	2.66	0.01	2.60	2.63	2.62	0.02
60	2.64	2.58	2.61	0.04	2.61	2.60	2.61	0.01	2.62	2.60	2.61	0.01

ตารางที่ ข-3 สัดส่วนช่องว่าง (e) ของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์

ระดับความลึก (ซม.)	ระบบที่ 1 (ควมคุม)				ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)				ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)			
	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.
20	0.73	0.69	0.71	0.03	0.83	0.81	0.82	0.01	0.93	0.84	0.89	0.07
40	0.71	0.71	0.71	0.01	0.65	0.66	0.65	0.01	0.76	0.68	0.72	0.06
60	0.68	0.66	0.67	0.01	0.74	0.73	0.74	0.00	0.71	0.70	0.71	0.01

ตารางที่ ข-4 ร้อยละความพรุนของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์

ระดับความลึก (ซม.)	ระบบที่ 1 (ควมคุม)				ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)				ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)			
	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.	จุด 1	จุด 2	\bar{X}	S.D.
20	42.25	40.91	41.58	0.95	45.28	44.66	44.97	0.44	48.29	45.63	46.96	1.88
40	41.67	41.38	41.52	0.20	39.33	39.62	39.47	0.21	43.08	40.30	41.69	1.96
60	40.53	39.92	40.23	0.43	42.53	42.31	42.42	0.16	41.60	41.15	41.38	0.32
เฉลี่ยทั้งระบบ	41.48	40.74	41.11	0.53	42.38	42.20	42.29	0.27	44.32	42.36	43.34	1.39

ตารางที่ ข-5 อัตราการไหลที่ได้จากการทดลองของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

ครั้งที่ทำการวัด	ระบบที่ 1 (ควมคุม)	ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)
1	0.0074	0.0073	0.0075
2	0.0073	0.0074	0.0076
3	0.0074	0.0072	0.0077
4	0.0074	0.0072	0.0075
5	0.0073	0.0072	0.0078
\bar{X}	0.0073	0.0073	0.0076
S.D.	0.0001	0.0001	0.0001

ตารางที่ ข-6 ค่าจากการคำนวณหาการสะสมตัวของสารในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวนอน

Time (hr.)	Br (mg/L)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)				ระบบที่ 2 (กลั่นน้ำ)				ระบบที่ 3 (ถกกรม)			
		Dt x C (mg/L.min)	E(t) (min ⁻¹)	t x E(t) x Dt (min)	Cumulative total F	Dt x C (mg/L.min)	E(t) (min ⁻¹)	t x E(t) x Dt (min)	Cumulative total F	Dt x C (mg/L.min)	E(t) (min ⁻¹)	t x E(t) x Dt (min)	Cumulative total F
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.71	0.01	0.08	0.08	37.69	0.00	1.85	0.04
60	18.62	223.44	0.02	0.21	12.53	132.82	0.01	0.12	0.20	224.82	0.02	13.81	0.27
72	21.43	257.17	0.02	0.24	17.31	371.28	0.03	0.34	0.54	378.80	0.03	27.93	0.66
84	23.88	286.58	0.02	0.27	22.51	253.12	0.02	0.23	0.78	190.98	0.02	16.43	0.85
96	5.29	63.52	0.00	0.06	5.70	55.73	0.00	0.05	0.83	36.78	0.00	3.62	0.89
108	11.08	133.00	0.01	0.12	13.43	125.98	0.01	0.12	0.95	47.47	0.00	5.25	0.94
120	4.41	52.90	0.00	0.05	5.53	20.11	0.00	0.02	0.97	49.07	0.00	6.03	0.99
132	2.78	33.36	0.00	0.03	4.12	21.89	0.00	0.02	0.99	4.43	0.00	0.60	0.99
144	1.64	19.67	0.00	0.02	2.65	13.21	0.00	0.01	1.00	2.66	0.00	0.39	1.00
156	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.02	0.00	0.00	1.00	3.89	0.00	0.62	1.00
168	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Total	89.14	1069.63		1.00	84.18	1077.85		1.00		976.60		76.53	

ตารางที่ ข-7 ตัวเลขการกระจายตัว (Dispersion number, d) ของสารในระบบบึงประดิษฐ์

Time (hr.)	Br (mg/L)	ระบบที่ 1 (ควมคุม)		ระบบที่ 2 (ค้ำน้ำ)		ระบบที่ 3 (กกรวม)	
		tc (mg.Hr/L)	t ² c (mg.Hr ² /L)	tc (mg.Hr/L)	t ² c (mg.Hr ² /L)	tc (mg.Hr/L)	t ² c (mg.Hr ² /L)
0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
12	0	0	0	0	0	0.00	0.00
24	0	0	0	0	0	0.00	0.00
36	0	0	0	0	0	0.00	0.00
48	6.809	0	0	326.832	15687.936	0.00	0.00
60	11.068	1117.2	67032	664.08	39844.8	44514610.56	74888150.40
72	30.94	1543.032	111098.304	2227.68	160392.96	247491469.85	171428238.22
84	21.093	2006.088	168511.392	1771.812	148832.208	298570506.48	338048681.35
96	4.644	508.128	48780.288	445.824	42799.104	21747423.12	24786630.18
108	10.498	1196.964	129272.112	1133.784	122448.672	146566652.23	154734064.27
120	1.676	528.96	63475.2	201.12	24134.4	12766132.22	33575841.79
132	1.824	366.96	48438.72	240.768	31781.376	11662493.74	17775072.69
144	1.101	236.016	33986.304	158.544	22830.336	5388324.58	8021311.52
156	0.168	0	0	26.208	4088.448	0.00	0.00
168	0	0	0	0	0	0.00	0.00
Total		670594.32	7503.348	7196.652	612840.24	788707612.8	823257990.4
Dispersion number, d		0.01		0.01		0.01	

หมายเหตุ : tc = ระยะเวลาเฉลี่ยที่สารสะสมในกราฟ Tracer (mg.Hr/L)

t²c = ระยะเวลาเฉลี่ยที่สารสะสมในกราฟ Tracer กำลังสอง (mg.Hr²/L)

ตารางที่ ข-8 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 1
(ควบคุม)

วันที่เก็บ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณน้ำเข้า ระบบ(ลิตร)	ปริมาณน้ำออกจาก ระบบ(ลิตร)	อัตราการระเหยของน้ำและ อัตราการใช้น้ำของพืช (ลิตร/วัน)
26 ก.พ. 2550	29.4	5.20	3.11	2.09
2 มี.ค. 2550	30.1	5.20	3.15	2.05
12 มี.ค. 2550	30.2	5.20	3.15	2.05
16 มี.ค. 2550	29.9	5.20	3.10	2.10
26 มี.ค. 2550	32.6	5.20	3.15	2.05
30 มี.ค. 2550	33.2	5.20	3.00	2.20
	\bar{X}		3.11	2.09
	S.D.		0.06	0.06

ตารางที่ ข-9 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 2
(คลื่นน้ำ)

วันที่เก็บ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณน้ำเข้า ระบบ(ลิตร)	ปริมาณน้ำออกจาก ระบบ(ลิตร)	อัตราการระเหยของน้ำและ อัตราการใช้น้ำของพืช (ลิตร/วัน)
26 ก.พ. 2550	29.4	5.30	2.85	2.45
2 มี.ค. 2550	30.1	5.30	2.94	2.36
12 มี.ค. 2550	30.2	5.30	3.00	2.30
16 มี.ค. 2550	29.9	5.30	2.90	2.40
26 มี.ค. 2550	32.6	5.30	2.80	2.50
30 มี.ค. 2550	33.2	5.30	2.65	2.65
	\bar{X}		2.86	2.44
	S.D.		0.12	0.12

ตารางที่ ข-10 ช่วงเวลาที่ได้รับแสงแดด อัตราการระเหย และอัตราการใช้น้ำของพืชในระบบที่ 3
(กรัม)

วันที่เก็บ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณน้ำเข้า ระบบ(ลิตร)	ปริมาณน้ำออกจาก ระบบ(ลิตร)	อัตราการระเหยของน้ำและ
				อัตราการใช้น้ำของพืช (ลิตร/วัน)
26 ก.พ. 2550	29.4	5.40	3.16	2.24
2 มี.ค. 2550	30.1	5.40	3.25	2.15
12 มี.ค. 2550	30.2	5.40	3.10	2.30
16 มี.ค. 2550	29.9	5.40	3.12	2.28
26 มี.ค. 2550	32.6	5.40	2.95	2.45
30 มี.ค. 2550	33.2	5.40	2.98	2.42
\bar{X}			3.09	2.31
S.D.			0.11	0.11

ตารางที่ ข-11 ระดับที่นำอิมิตัวภายในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง

ครั้งที่เก็บตัวอย่าง	ระดับที่นำอิมิตัวภายในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่ง (ชม.)											
	ระบบที่ 1 (ความสูง)			ระบบที่ 2 (กลางน้ำ)			ระบบที่ 3 (กกร่ม)					
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.
1	53.50	48.60	48.40	50.50	46.70	46.40	51.00	45.70	47.50	47.50	47.50	47.50
2	50.00	50.30	49.70	51.30	45.30	44.70	50.50	47.30	45.70	45.70	45.70	45.70
3	52.60	49.50	40.50	48.40	46.50	38.00	50.70	48.50	38.50	38.50	38.50	38.50
4	53.80	49.90	41.40	50.50	48.90	36.50	50.60	47.00	39.50	39.50	39.50	39.50
5	52.30	47.20	40.60	53.50	46.70	39.20	51.50	46.00	40.80	40.80	40.80	40.80
6	58.60	47.70	41.00	49.40	47.20	36.70	51.90	46.20	39.70	39.70	39.70	39.70
7	49.50	48.90	42.20	47.90	45.90	35.20	46.90	46.60	38.20	38.20	38.20	38.20
8	49.00	45.90	44.60	49.30	46.00	36.60	47.40	46.30	39.60	39.60	39.60	39.60
\bar{X}	50.10	46.65	39.16	52.41	48.50	43.55	50.06	46.70	41.19	41.19	41.19	41.19
S.D.	1.78	1.08	4.14	3.10	1.49	3.65	1.86	0.89	3.47	3.47	3.47	3.47

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน
และฟอสฟอรัสของระบบด้วยพืชต่างชนิดกัน

ตารางที่ ก-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่างชนิดกัน

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	น้ำเข้าระบบ 150 มก.ซีโอดี/ล.	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (คววม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกรม)	ระบบที่ 1 (คววม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกรม)
ครั้งที่ 1	144.80	16.80	19.20	16.00	88.55	86.91	89.09
ครั้งที่ 2	149.60	16.00	16.80	19.20	89.09	88.55	86.91
ครั้งที่ 3	144.00	17.60	20.00	18.40	88.00	86.37	87.46
ครั้งที่ 4	146.40	16.80	17.60	17.60	88.55	88.00	88.00
ครั้งที่ 5	148.80	17.60	21.60	19.20	88.00	85.28	86.91
\bar{X}	146.72	16.96	19.04	18.08	88.44	87.02	87.68
S.D.	2.44	0.67	1.91	1.34	0.46	1.30	0.91

ตารางที่ ก-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดทีไอซีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตร ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวดิ่งด้วยพืชต่างชนิดกัน

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	น้ำเข้าระบบ 150 มก.ซีโอดี/ล.	ความเข้มข้นทีไอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทีไอซี (ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (คววม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกรม)	ระบบที่ 1 (คววม)	ระบบที่ 2 (คล้าน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกรม)
ครั้งที่ 1	43.56	5.10	5.25	5.21	88.79	88.46	88.55
ครั้งที่ 2	48.04	5.05	4.94	5.86	88.90	89.14	87.12
ครั้งที่ 3	43.59	5.64	5.64	5.64	87.60	87.60	87.60
ครั้งที่ 4	45.71	5.46	5.46	5.46	88.01	88.01	88.01
ครั้งที่ 5	46.64	5.80	5.80	5.80	87.26	87.26	87.26
\bar{X}	45.51	5.41	5.42	5.59	88.11	88.09	87.71
S.D.	1.95	0.33	0.34	0.26	0.72	0.74	0.58

ตารางที่ ก-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตรของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้งด้วยพืชต่างชนิดกัน

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	น้ำเข้าระบบ 150 มก.ซีโอดี/ล.	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3	ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3
		(ควบคุม)	(คล้าน้ำ)	(กรรุ่ม)	(ควบคุม)	(คล้าน้ำ)	(กรรุ่ม)
ครั้งที่ 1	11.76	8.29	1.40	1.57	31.67	88.46	87.07
ครั้งที่ 2	13.10	8.40	1.23	1.46	30.75	89.84	88.00
ครั้งที่ 3	11.48	8.85	0.95	1.51	27.06	92.15	87.54
ครั้งที่ 4	12.88	8.29	0.73	1.62	31.67	94.00	86.61
ครั้งที่ 5	11.42	9.30	0.95	1.57	23.36	92.15	87.07
\bar{X}	12.13	8.62	1.05	1.55	28.90	91.32	87.26
S.D.	0.80	0.44	0.26	0.06	3.64	2.18	0.53

ตารางที่ ก-4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินแนวตั้งด้วยพืชต่างชนิดกัน

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	น้ำเข้าระบบ 150 มก.ซีโอดี/ล.	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ทั้งหมด (ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3	ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3
		(ควบคุม)	(คล้าน้ำ)	(กรรุ่ม)	(ควบคุม)	(คล้าน้ำ)	(กรรุ่ม)
ครั้งที่ 1	4.85	0.92	0.86	0.88	80.81	82.05	81.64
ครั้งที่ 2	4.83	0.88	0.82	0.88	81.62	82.96	81.64
ครั้งที่ 3	4.78	0.82	0.82	0.86	82.87	83.04	82.13
ครั้งที่ 4	4.84	0.84	0.80	0.86	82.63	83.37	82.18
ครั้งที่ 5	4.77	0.84	0.78	0.82	82.63	83.75	83.04
\bar{X}	4.81	0.86	0.82	0.86	82.11	83.03	82.12
S.D.	0.04	0.04	0.03	0.03	0.87	0.63	0.57

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน
และฟอสฟอรัสของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวตั้ง
ที่น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ง-1 ผลของปริมาณซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น และฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์ที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

ครั้งที่	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ทีโอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ทีเคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.	มก.ซีโอดี/ล.
1	144.80	312.00	520.00	43.56	89.54	156.20	11.76	25.65	47.71	4.85	9.94	16.66
2	149.60	312.00	512.00	48.04	98.26	161.00	13.10	22.96	42.45	4.83	9.54	17.14
3	144.00	313.60	536.00	43.59	83.59	163.59	11.48	25.54	36.74	4.78	10.29	16.04
4	146.40	332.80	504.00	45.71	89.71	157.71	12.88	23.91	40.15	4.84	9.58	16.13
5	148.80	318.40	528.00	46.64	96.64	163.64	11.42	22.62	39.42	4.77	9.54	16.50
\bar{X}	146.72	317.76	520.00	45.51	91.55	160.43	12.13	24.14	41.29	4.81	9.78	16.49
S.D.	2.44	8.81	12.65	1.95	5.95	3.39	0.80	1.41	4.13	0.04	0.33	0.44

ตารางที่ ง-2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	16.80	28.00	96.00	88.55	91.19	81.54
ครั้งที่ 2	16.00	16.80	94.40	89.09	94.71	81.85
ครั้งที่ 3	17.60	18.40	97.60	88.00	94.21	81.23
ครั้งที่ 4	16.80	10.40	98.40	88.55	96.73	81.08
ครั้งที่ 5	17.60	23.20	95.20	88.00	92.70	81.69
\bar{X}	16.96	19.36	96.32	88.44	93.91	81.48
S.D.	0.67	6.65	1.66	0.46	2.09	0.32

ตารางที่ ง-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)

ครั้งที่	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	19.20	8.80	14.40	86.91	97.18	97.23
ครั้งที่ 2	16.80	9.60	15.20	88.55	96.92	97.08
ครั้งที่ 3	20.00	9.60	16.80	86.37	96.92	96.77
ครั้งที่ 4	17.60	7.20	12.80	88.00	97.69	97.54
ครั้งที่ 5	21.60	8.00	12.00	85.28	97.44	97.69
\bar{X}	19.04	8.60	14.24	87.02	97.23	97.26
S.D.	1.91	1.00	1.91	1.30	0.33	0.37

ตารางที่ ง-4 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรรม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	16.00	1.60	9.60	89.09	99.48	98.15
ครั้งที่ 2	19.20	2.40	8.80	86.91	99.22	98.31
ครั้งที่ 3	18.40	2.40	6.40	87.46	99.22	98.77
ครั้งที่ 4	17.60	5.60	7.20	88.00	98.19	98.62
ครั้งที่ 5	19.20	3.20	8.80	86.91	98.96	98.31
\bar{X}	18.08	3.04	8.16	87.68	99.02	98.43
S.D.	1.34	1.54	1.31	0.91	0.50	0.25

ตารางที่ ง-5 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	8.29	11.87	17.14	31.67	50.82	58.50
ครั้งที่ 2	8.40	12.77	18.31	30.75	47.11	55.65
ครั้งที่ 3	8.85	12.32	22.96	27.06	48.96	44.39
ครั้งที่ 4	8.29	15.23	21.90	31.67	36.90	46.97
ครั้งที่ 5	9.30	12.94	19.88	23.36	46.41	51.85
\bar{X}	8.62	13.03	20.04	28.90	46.04	51.47
S.D.	0.44	1.30	2.42	3.64	5.39	5.86

ตารางที่ ง-6 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (กล้าน้ำ)

ครั้งที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	1.40	3.58	3.47	88.46	85.15	91.59
ครั้งที่ 2	1.23	2.02	1.57	89.84	91.65	96.20
ครั้งที่ 3	0.95	2.91	3.25	92.15	87.94	92.13
ครั้งที่ 4	0.73	3.58	3.42	94.00	85.15	91.73
ครั้งที่ 5	0.95	2.80	2.91	92.15	88.40	92.95
\bar{X}	1.05	2.98	2.92	91.32	87.66	92.92
S.D.	0.26	0.65	0.79	2.18	2.70	1.91

ตารางที่ ง-7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	1.57	3.42	2.69	87.07	85.85	93.49
ครั้งที่ 2	1.46	2.69	2.91	88.00	88.86	92.95
ครั้งที่ 3	1.51	1.46	3.58	87.54	93.97	91.32
ครั้งที่ 4	1.62	1.90	3.58	86.61	92.11	91.32
ครั้งที่ 5	1.57	1.57	3.19	87.07	93.50	92.27
\bar{X}	1.55	2.21	3.19	87.26	90.86	92.27
S.D.	0.06	0.83	0.40	0.53	3.44	0.97

ตารางที่ ง-8 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	0.92	3.46	8.10	80.81	64.60	50.88
ครั้งที่ 2	0.88	3.61	8.11	81.62	63.09	50.80
ครั้งที่ 3	0.82	3.56	8.12	82.87	63.62	50.75
ครั้งที่ 4	0.84	3.58	8.21	82.63	63.41	50.22
ครั้งที่ 5	0.84	3.46	8.19	82.63	64.58	50.35
\bar{X}	0.86	3.53	8.15	82.11	63.86	50.60
S.D.	0.04	0.07	0.05	0.87	0.69	0.29

ตารางที่ ง-9 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)

ครั้งที่	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	0.86	1.14	1.06	82.05	88.31	89.38
ครั้งที่ 2	0.82	1.21	1.05	82.96	87.67	89.46
ครั้งที่ 3	0.82	1.28	0.99	83.04	86.89	90.00
ครั้งที่ 4	0.80	1.30	0.94	83.37	86.69	90.50
ครั้งที่ 5	0.78	1.13	1.11	83.75	88.42	88.80
\bar{X}	0.82	1.21	1.03	83.03	87.60	89.63
S.D.	0.03	0.08	0.06	0.63	0.79	0.65

ตารางที่ ง-10 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 3 (กกรัม)

ครั้งที่	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส (ร้อยละ)		
	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.	150 มก.ซีโอดี/ล.	300 มก.ซีโอดี/ล.	500 มก.ซีโอดี/ล.
ครั้งที่ 1	0.88	2.25	3.98	81.64	76.97	59.98
ครั้งที่ 2	0.88	2.43	3.97	81.64	75.19	60.10
ครั้งที่ 3	0.86	2.78	3.91	82.13	71.54	60.62
ครั้งที่ 4	0.86	2.29	3.87	82.18	76.59	61.12
ครั้งที่ 5	0.82	2.27	3.86	83.04	76.76	61.18
\bar{X}	0.86	2.40	3.92	82.12	75.41	60.60
S.D.	0.03	0.22	0.05	0.57	2.28	0.56

ตารางที่ ง-11 ผลของลักษณะของน้ำที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้วัดดินแวนดิงที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร

ครั้งที่	ดีไอ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความขุ่น (เอ็นทียู)			ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			พีเอช		
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
1	3.11	2.39	3.04	11.14	15.91	25.91	651	776	1011	29.4	29.7	30.7	6.59	5.45	5.45
2	3.92	2.39	3.19	12.52	16.17	26.17	640	787	1031	28.8	29.3	30.3	6.73	4.72	5.72
3	3.42	2.42	2.42	12.16	17.89	27.89	619	771	1028	29.2	29.9	30.4	6.28	5.21	5.21
4	3.38	3.73	3.73	11.78	16.89	26.89	619	773	1033	28.9	29.5	30.5	6.14	5.58	5.33
5	3.96	3.96	3.96	11.18	16.45	26.45	621	789	1023	30.1	30.1	30.1	6.26	5.11	5.11
\bar{X}	3.56	2.98	3.27	11.76	16.66	26.66	630	779	1025	29.3	29.7	30.40	6.40	5.21	5.36
S.D.	0.37	0.80	0.61	0.60	0.78	0.78	15	8	9	0.5	0.32	0.22	0.25	0.33	0.24

ตารางที่ ง-12 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระบบที่ 1 (ควบคุม)

ครั้งที่	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความขุ่น (เอ็นทียู)			ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			พีเอช		
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
1	4.21	0.45	1.02	17.86	35.86	41.86	644	1018	1521	29.4	29.7	30.7	7.33	7.16	7.06
2	3.69	0.63	1.63	16.66	36.66	43.66	756	985	1527	28.8	29.2	30.3	7.25	7.70	6.80
3	3.78	2.08	1.28	17.97	36.50	45.70	769	1009	1523	28.2	28.5	30.4	7.16	7.86	6.86
4	3.34	1.97	1.27	16.58	39.58	46.58	798	1017	1537	28.9	28.9	30.5	7.20	7.20	6.82
5	3.96	2.11	1.11	16.59	36.50	46.50	760	994	1522	30.1	29.1	30.1	7.03	7.03	7.03
\bar{X}	3.80	1.45	1.26	17.13	37.02	44.86	745	1005	1526	29.08	29.1	30.4	7.19	7.39	6.91
S.D.	0.32	0.83	0.23	0.72	1.46	2.05	59	15	6.56	0.71	0.4	0.22	0.11	0.37	0.12

ตารางที่ ง-13 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอไซด์ต่อลิตร ระบบที่ 2 (ค่าจำนำ)

ครั้งที่	ซีโอไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความขุ่น (เอ็นทียู)			ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			พีเอช		
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
1	3.81	3.89	1.15	2.35	7.23	11.65	762	1151	1778	29.4	29.3	30.7	7.25	7.96	6.96
2	3.85	3.58	1.58	2.23	7.55	11.89	755	1189	1863	28.8	29.9	30.3	7.24	7.94	6.79
3	2.78	3.39	1.19	2.45	6.45	10.23	784	1333	1893	28.2	29.7	30.4	7.46	7.40	6.34
4	3.34	3.34	1.30	2.33	5.33	10.33	798	1128	1854	28.9	28.5	30.5	6.76	8.06	7.09
5	3.96	3.96	1.16	2.56	7.56	10.56	760	1309	1739	30.1	29.1	30.1	7.03	7.03	6.33
\bar{X}	3.55	3.63	1.28	2.38	6.82	10.75	772	1222	1825	29.08	29.3	30.4	7.15	7.68	6.70
S.D.	0.49	0.28	0.18	0.13	0.95	0.77	18	93	64	0.71	0.5	0.2	0.26	0.44	0.35

ตารางที่ ง-14 ผลของลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ความเข้มข้น 150, 300 และ 500 มิลลิกรัมซีโอไซด์ต่อลิตร ระบบที่ 3 (กรรม)

ครั้งที่	ซีโอไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ความขุ่น (เอ็นทียู)			ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			พีเอช		
	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500	150	300	500
	3.91	3.21	3.21	0.39	2.09	11.91	917	1139	1621	29.4	29.7	30.7	6.97	6.96	6.51
1	3.91	3.21	3.21	0.39	2.09	11.91	917	1139	1621	29.4	29.7	30.7	6.97	6.96	6.51
2	4.57	2.35	2.35	0.73	2.02	12.17	902	1199	1831	28.8	29.3	30.3	7.15	7.42	6.54
3	3.92	3.13	3.13	0.36	2.11	12.55	915	1137	1873	28.2	29.8	30.4	6.93	7.07	6.67
4	2.3	3.15	3.15	0.81	2.16	11.85	906	1183	1831	28.9	28.6	30.5	6.97	7.56	6.56
5	3.96	3.39	3.39	1.04	2.22	11.90	915	1184	1684	30.1	29.3	30.1	7.03	7.44	6.54
\bar{X}	3.73	3.05	3.05	0.67	2.12	12.08	911	1168	1768	29.08	29.3	30.4	7.01	7.29	6.56
S.D.	0.85	0.40	0.40	0.29	0.08	0.29	6.60	28	109	0.71	0.5	0.2	0.09	0.26	0.06

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน
และฟอสฟอรัสที่ระดับความลึกต่างๆ

ตารางที่ จ-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	146.72*	2.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	70.40	76.00	72.00	72.80	2.88	52.02	48.20	50.93	50.38	1.97
45	57.60	51.20	52.80	53.87	3.33	60.74	65.10	63.54	63.13	2.21
60	12.00	13.60	14.40	13.33	1.22	91.82	90.73	90.06	90.87	0.89

หมายเหตุ: * คุรยละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (กลั่นน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	146.72*	2.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	48.00	45.60	35.20	42.93	6.80	67.28	68.92	76.01	70.74	4.64
45	32.00	25.60	32.00	29.87	3.70	78.19	82.55	78.19	79.64	2.52
60	24.00	20.00	22.40	22.13	2.01	83.64	86.37	84.73	84.91	1.37

หมายเหตุ: * คุรยละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-3 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	146.72*	2.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	67.20	61.60	62.40	63.73	3.03	54.20	58.02	57.47	56.56	2.06
45	58.40	59.20	48.80	55.47	5.79	60.20	59.65	66.74	62.20	3.94
60	17.60	28.00	22.40	22.67	5.21	88.00	80.92	84.73	84.55	3.55

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	317.76*	8.81	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	40.00	32.00	35.20	35.73	4.03	87.41	89.93	88.92	88.75	1.27
45	21.60	16.00	12.80	16.80	4.45	93.20	94.96	95.97	94.71	1.40
60	6.40	8.80	1.60	5.60	3.67	97.99	97.23	99.50	98.24	1.15

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-5 ผลประสิทธิผลการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 2 (กล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	317.76*	8.81	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	34.40	38.40	35.20	36.00	2.12	89.17	87.92	88.92	88.67	0.67
45	15.20	19.20	19.20	17.87	2.31	95.22	93.96	93.96	94.38	0.73
60	3.20	9.60	4.80	5.87	3.33	98.99	96.98	98.49	98.15	1.05

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-6 ผลประสิทธิผลการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรรม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	317.76*	8.81	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	25.60	24.00	30.40	26.67	3.33	91.94	92.45	90.43	91.61	1.05
45	9.60	11.20	16.80	12.53	3.78	96.98	96.48	94.71	96.06	1.19
60	4.80	3.20	5.60	4.53	1.22	98.49	98.99	98.24	98.57	0.38

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-7 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	520*	12.65	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	6.40	12.00	8.00	8.80	2.88	98.77	97.69	98.46	98.31	0.54
60	4.00	6.40	0.80	3.73	2.81	99.23	98.77	99.85	99.28	0.76

หมายเหตุ: * คุรยละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-8 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	520*	12.65	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	4.80	3.20	8.00	5.33	2.44	99.08	99.38	98.46	98.97	0.47
60	1.60	1.60	0.80	1.33	0.46	99.69	99.69	99.85	99.74	0.09

หมายเหตุ: * คุรยละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-9 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดี
ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรรม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	520*	12.65	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	5.60	15.20	26.40	15.73	10.41	98.92	97.08	94.92	96.97	2.00
60	1.60	1.60	7.20	3.47	3.23	99.69	99.69	98.62	99.33	0.62

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-10 ผลประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี
ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	12.13*	0.80	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	10.86	10.58	10.81	10.75	0.15	10.44	12.75	10.90	11.36	1.22
45	8.96	8.57	8.68	8.74	0.20	26.13	29.37	28.44	27.98	1.66
60	7.28	7.50	7.45	7.41	0.12	39.98	38.14	38.60	38.91	0.96

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-11 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 2 (กล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	12.13*	0.80	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1.18	1.57	1.40	1.38	0.20	90.31	87.07	88.46	88.61	1.62
45	0.95	1.18	1.06	1.06	0.11	91.90	90.00	90.95	90.95	0.95
60	0.84	0.95	0.95	0.91	0.06	92.86	91.90	91.90	92.22	0.55

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-12 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรวม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	12.13*	0.80	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	2.86	3.36	3.42	3.21	0.31	76.46	72.30	71.84	73.53	2.54
45	1.79	2.24	2.13	2.05	0.23	85.23	81.53	82.46	83.07	1.92
60	1.34	1.57	2.02	1.64	0.34	88.92	87.07	83.38	86.46	2.82

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-13 ผลประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	24.14*	1.41	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	21.73	21.45	21.84	21.67	0.20	9.99	11.15	9.53	10.22	0.84
45	17.36	16.24	17.98	17.19	0.88	28.09	32.73	25.53	28.78	3.65
60	12.99	13.55	14.45	13.66	0.73	46.18	43.86	40.15	43.40	3.04

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-14 ผลประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 2 (กลั่นน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	24.14*	1.41	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	2.35	2.24	3.02	2.54	0.42	90.26	90.72	87.47	89.48	1.76
45	2.24	0.78	2.58	1.87	0.95	90.72	96.75	89.33	92.27	3.95
60	2.02	0.11	2.35	1.49	1.21	91.65	99.54	90.26	93.81	5.00

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-15 ผลประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรวม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	24.14*	1.41	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	3.81	3.25	4.93	3.99	0.86	84.23	86.55	79.59	83.45	3.54
45	0.45	0.90	1.01	0.78	0.30	98.14	96.29	95.82	96.75	1.23
60	0.45	0.50	0.50	0.49	0.03	98.14	97.91	97.91	97.99	0.13

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-16 ผลประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดี ต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	41.29*	4.13	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	31.36	26.99	26.60	28.32	2.64	32.19	34.63	35.58	34.13	1.75
60	25.14	18.98	20.38	21.50	3.23	51.31	54.02	50.63	51.99	2.40

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-17 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีไอดี ต่อลิตรของระบบที่ 2 (กล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	41.29*	4.13	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	4.37	3.70	3.86	3.98	0.35	89.42	91.05	90.64	90.37	0.85
60	3.25	3.58	3.14	3.32	0.23	92.13	91.32	92.40	91.95	0.56

หมายเหตุ: * คุราชละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-18 ผลประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีไอดี ต่อลิตรของระบบที่ 3 (กกร่ม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	41.29*	4.13	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	1.57	0.90	2.13	1.53	0.62	96.20	97.83	94.85	96.29	1.49
60	1.57	0.45	0.56	0.86	0.62	96.20	98.91	98.64	97.92	1.49

หมายเหตุ: * คุราชละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-19 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	4.81*	0.04	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.71	0.80	0.76	0.76	0.05	85.27	83.37	84.23	84.29	0.95
45	0.67	0.75	0.67	0.69	0.05	86.17	84.49	86.10	85.59	0.95
60	0.82	0.82	0.84	0.82	0.01	83.04	83.05	82.54	82.88	0.29

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-20 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (กลั่นน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	4.81*	0.04	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.78	0.51	0.63	0.64	0.14	83.75	89.37	86.92	86.68	2.82
45	0.42	0.40	0.42	0.41	0.01	91.34	91.63	91.34	91.43	0.17
60	0.42	0.45	0.51	0.46	0.04	91.24	90.74	89.47	90.48	0.91

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-21 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150

มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	4.81*	0.04	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.68	0.68	0.76	0.71	0.05	85.79	85.90	84.12	85.27	1.00
45	0.56	0.61	0.58	0.58	0.03	88.46	87.40	88.04	87.97	0.53
60	0.80	0.72	0.80	0.77	0.05	83.38	85.13	83.41	83.97	1.00

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-22 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300

มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ

60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	9.78*	0.33	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	7.59	6.70	6.32	6.87	0.65	22.38	31.51	35.36	29.75	6.67
45	4.95	5.85	4.85	5.22	0.55	49.36	40.23	50.38	46.66	5.59
60	3.09	3.30	4.07	3.49	0.51	68.37	66.28	58.39	64.35	5.26

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-23 ผลประสิทธิผลการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (กล้าน้ำ) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	9.78*	0.33	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1.18	1.20	1.44	1.28	0.14	87.91	87.71	85.27	86.96	1.47
45	0.94	1.01	1.22	1.06	0.14	90.34	89.63	87.50	89.16	1.48
60	0.55	0.68	0.38	0.53	0.15	94.40	93.08	96.13	94.54	1.53

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-24 ผลประสิทธิผลการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ระดับความลึก 30, 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิผลการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	9.78*	0.33	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	5.55	5.37	5.41	5.44	0.09	43.28	45.10	44.70	44.36	0.96
45	3.52	3.82	3.01	3.45	0.41	63.97	60.91	69.24	64.71	4.22
60	2.47	2.26	2.96	2.56	0.36	74.72	76.85	69.75	73.77	3.64

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-25 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 1 (ควบคุม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	16.49*	0.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	7.28	7.04	7.77	7.36	0.38	55.85	57.33	52.86	55.35	3.17
60	6.25	5.05	5.20	5.50	0.65	62.09	69.35	68.48	66.64	0.62

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-26 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 2 (กลั่นน้ำ) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	16.49*	0.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	3.52	4.10	3.51	3.71	0.34	78.63	75.15	78.71	77.50	2.03
60	2.77	3.66	2.97	3.13	0.47	82.69	77.11	81.45	80.42	2.93

หมายเหตุ: * ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ จ-27 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรของระบบที่ 3 (กรวม) ที่ระดับความลึก 45 และ 60 เซนติเมตร

ความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
0	-	-	-	16.49*	0.44	-	-	-	-	-
15**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	6.89	7.45	7.07	7.14	0.28	58.22	54.84	57.12	56.73	1.72
60	5.02	5.69	6.19	5.63	0.58	69.53	65.48	62.47	65.83	3.54

หมายเหตุ : * ดูรายละเอียดในตารางที่ จ-1 ภาคผนวก ง

** ไม่มีตัวอย่าง

ภาคผนวก ฉ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชน
จากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ตารางที่ ฅ-1 ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น เข้าสู่ระบบ (มก.ซีโอดี/ล.)	ความเข้มข้นซีโอดี(มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี(ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกร่ม)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกร่ม)
ครั้งที่ 1	152.0	28.8	13.6	9.60	81.05	91.05	93.68
ครั้งที่ 2	208.0	40.0	8.8	8.00	80.77	95.77	96.15
ครั้งที่ 3	136.0	22.4	8.0	6.40	83.53	94.12	95.29
\bar{X}	165.3	30.4	10.1	8.00	81.78	93.65	95.04
S.D.	37.81	8.9	3.0	1.6	1.52	2.39	1.25

ตารางที่ ฅ-2 ผลประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น เข้าสู่ระบบ (มก.ซีโอดี/ล.)	ความเข้มข้นทีโอซี(มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี(ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกร่ม)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กกร่ม)
ครั้งที่ 1	45.670	5.869	5.638	6.853	88.21	88.68	86.24
ครั้งที่ 2	60.596	3.628	3.598	4.034	92.71	92.77	91.90
ครั้งที่ 3	43.118	5.642	5.422	5.567	88.67	89.11	88.82
\bar{X}	49.79	5.046	4.886	5.485	89.86	90.19	88.98
S.D.	9.44	1.234	1.121	1.411	2.48	2.25	2.83

ตารางที่ ๓-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น เข้าสู่ระบบ (มก.ซีโอดี/ล.)	ความเข้มข้นที่เคเอ็น(มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น(ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)
ครั้งที่ 1	313.60	136.98	0.90	3.25	56.32	99.71	98.86
ครั้งที่ 2	285.60	152.94	0.45	0.45	46.45	99.84	99.84
ครั้งที่ 3	291.76	122.53	1.34	3.02	58.00	99.54	98.96
\bar{X}	296.99	137.48	0.90	2.24	53.59	99.70	99.22
S.D.	14.71	15.21	0.45	1.56	6.24	0.15	0.54

ตารางที่ ๓-4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำเสียชุมชนจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ครั้งที่เก็บ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น เข้าสู่ระบบ (มก.ซีโอดี/ล.)	ความเข้มข้นฟอสเฟตทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ)		
		ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)	ระบบที่ 1 (ควบคุม)	ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ)	ระบบที่ 3 (กรรุ่ม)
ครั้งที่ 1	39.81	26.08	5.21	23.18	34.49	86.91	41.78
ครั้งที่ 2	20.23	10.36	1.15	6.35	48.81	94.33	68.62
ครั้งที่ 3	32.23	18.24	3.25	8.88	43.41	89.91	56.13
\bar{X}	30.76	18.23	3.20	12.80	42.23	90.38	55.51
S.D.	9.87	7.86	2.03	9.08	7.24	3.73	13.43

ภาคผนวก ช

ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรรม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

Descriptives

		Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Between- Component Variance
				Lower Bound	Upper Bound	
Model	Fixed Effects	.95402	.24633	87.1746	88.2480	
	Random Effects		.40919	85.9507	89.4719	.32028

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.023	2	2.512	2.759	.103
Within Groups	10.922	12	.910		
Total	15.945	14			

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่ 2 (คลาน้ำ) และระบบที่ 3 (กรกรม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
percentage	8.492	.019	4.057	8	.004	4.06200	1.00127	Lower	Upper
			4.057	4.472	.012	4.06200	1.00127	1.75306	6.37094
								1.39400	6.73000

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
percentage	1.00	5	91.3200	2.17544	.97289
	2.00	5	87.2580	.52931	.23672

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดของระบบที่ 1 (ควบคุม) ระบบที่ 2 (คล้ำน้ำ) และระบบที่ 3 (กรรุ่ม) ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

Descriptives

		Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Between-Component Variance
				Lower Bound	Upper Bound	
Model	Fixed Effects	.70466	.18194	82.0276	82.8204	
	Random Effects		.30503	81.1116	83.7364	.17982

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.791	2	1.396	2.811	.100
Within Groups	5.959	12	.497		
Total	8.750	14			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวประกายธรรม สุขสถิตย์
วัน เดือน ปีเกิด	19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524
ที่อยู่	100/25 หมู่ 1 ต.ตลาดขวัญ อ.เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	2546 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 2549 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ