

การบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดิน  
ร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช



นายศักดิ์ชัย อังคสิงห์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

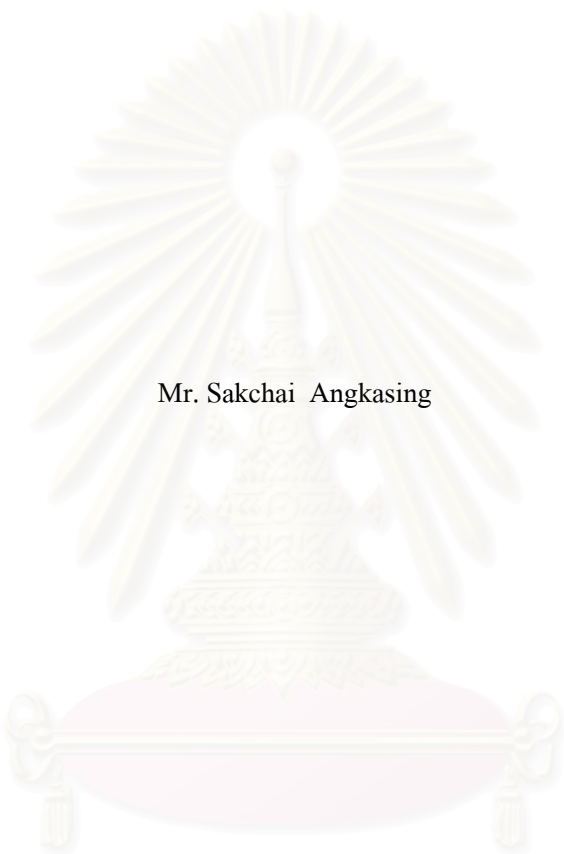
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6879-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT BY SUBSURFACE CONSTRUCTED WETLANDS  
COMBINED WITH EVAPOTRANSPIRATION SYSTEMS



Mr. Sakchai Angkasing

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6879-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดิน  
ร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช  
โดย    นายศักดิ์ชัย อังคสิงห์  
สาขาวิชา                                วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา                      รองศาสตราจารย์ ורתัย ชวาลภาฤทธิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ורתัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัสมิ์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

ศักดิ์ชัย อังคสิงห์: การบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช (DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT BY SUB SURFACE CONSTRUCTED WETLANDS COMBINED WITH EVAPOTRANSPIRATION SYSTEMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 186หน้า. ISBN: 974-17-6879-6

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช ในการบำบัดน้ำเสียบ้านเรือน โดยปลูกต้นธรรมรักษา (*Heliconia psittacorum* cv 'Lady Di') และต้นเข็ม (*Ixora coccinea*, L) ในถังที่มีการไหลในแนวตั้ง และในกระบะที่มีการไหลในแนวนอนตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากหอพักนิสิตที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยตัวกลางที่ใช้ได้แก่ตัวกลางทรายปนหิน การทดลองนี้ปรับเปลี่ยนอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ 8.23 และ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน และรูปแบบการให้น้ำเสียเข้าสู่ระบบจากการให้น้ำแบบต่อเนื่องเป็นการให้น้ำแบบเป็นระยะ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของการให้น้ำและอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของถังที่มีการไหลในแนวตั้งได้แก่การให้น้ำแบบเป็นระยะที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด ซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสเท่ากับ 71.27 63.45 64.92 88.00 88.16 และ 17.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการให้น้ำแบบต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์เดียวกันมี ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัด ซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสเท่ากับ 62.06 63.67 67.92 83.24 82.93 และ 18.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจะลดลงเมื่ออัตราการชลศาสตร์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าบีไอดี ทีเคเอ็น ของแข็งแขวนลอย อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก.

ส่วนประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืชที่มีการให้น้ำแบบต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน ให้ผลเช่นเดียวกับประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง สำหรับประสิทธิภาพสูงสุดของระบบได้แก่การให้น้ำแบบเป็นระยะที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด ซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่ากับ 91.81 92.08 91.05 98.27 96.48 และ 96.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อัตราการระเหยน้ำของระบบมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 21.68 ลิตรต่อวัน อัตราการดูดซึมน้ำไปใช้ของต้นเข็มอยู่ในช่วง 2.50-3.17 มิลลิเมตรต่อวัน ขนาดของพื้นที่ที่จะติดตั้งระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืชสำหรับนำไปใช้กับบ้านพักอาศัยจะใช้พื้นที่ประมาณ 78 ตารางเมตร

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2547

## 4670517321: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD:EVAPOTRANSPIRATION SYSTEMS / CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM  
/ DOMESTIC WASTEWATER / WASTEWATER TREATMENT

SAKCKAI ANGKASING: DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT BY  
SUBSURFACE CONSTRUCTED WETLANDS COMBINED WITH  
EVAPOTRANSPIRATION SYSTEMS. THESIS ADVISOR: ASSO.PROF. ORATHAI  
CHAVALAPARIT. 186 pp. ISBN: 974-17-6879-6.

This study was conducted to use subsurface constructed wetlands combined with evapotranspiration systems treating domestic wastewater. The treatment system were planted with *Heliconia psittacorum cv 'Lady Di'* and *Ixora coccinea* ,L in vertical flow constructed wetlands and evapotranspiration bed, respectively. The lab-scale subsurface constructed wetlands combined with evapotranspiration systems were used to treat partially treated wastewater from apartment. The media used in the treating system were gravel and sand bed. This research compared the treatment efficiency of the wastewater feeding pattern and hydraulic loading rates with two different values. Hydraulic loading rates varied of 8.23 and 16.46 cm./d. were feed to the system with different pattern namely: continuous feeding and step feeding.

The experimental results revealed that the highest removal efficiency of subsurface constructed wetlands can achieved with the step fed pattern at hydraulic loading rates(HLR) of 8.23 cm./d. The system can remove COD, BOD, SS, TKN, NH<sub>3</sub>-N and TP at 71.27% 63.45% 64.92% 88.00 % 88.16% and 17.64%, respectively. Comparing with the system with continuous fed pattern pattern at the same HLR, the remove efficiency were lower and can be achieved at 62.06% 63.67% 67.92% 83.24% 82.93% and 18.23, respectively. The results also showed that the removal efficiency of the systems was decreased with increasing HLR. However the treated wastewater meet the Thai effluent standard.

The result of subsurface constructed wetlands combined with evapotranspiration systems with continuous fed pattern at hydraulic loading rates of 8.23 cm./d. also showed the same trend of the subsurface constructed wetlands. The highest removal efficiency can achieved with the step fed pattern at hydraulic loading rates(HLR) of 8.23 cm./d. The removal of COD BOD SS TKN NH<sub>3</sub>-N and TP were achieved at 91.81% 92.08% 91.05% 98.27% 96.48% and 96.67% respectively.

The design criteria for the real implementation of subsurface constructed wetlands combined with evapotranspiration systems can be set based on this study. The average evaporation rate of the evapotranspiration system is 21.68 l/d. while the plants transpiration rate is 2.50-3.17 mm/d. The area required for such system for treating a household wastewater is 78 m<sup>2</sup>

Department Environmental Engineering

Student's signature.....

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature. ....

Academic Year 2004

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่ง รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่กรุณาอบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ประสิทธิภาพแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณครูจันทวรรณ (ครูปอง) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในส่วนของการวิเคราะห์ น้ำเสีย รวมถึงให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณอนุสาศกหอพักนิสิต อาจารย์อัจฉราวรรณ รวมถึงหอพักเฟื่องฟ้า จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และน้ำเสีย ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงช่างปาน ช่าง ป๊อบ ลุงยาม ที่ให้ความกรุณาอย่างดีในการใช้สถานที่และช่วยเหลืออย่างดีตลอดการทำงาน

ขอขอบคุณ พี่ๆ ที่กรมอุตุนิยมวิทยาสำหรับข้อมูลตรวจวัดอากาศ และ ที่สถานีตรวจวัด อากาศ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลและอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ของ เครื่องมือวัดอากาศ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ม.6/2 โรงเรียนวัดทรงธรรม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านกำลัง ภายและกำลังใจ ตลอดเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนปลา เพื่อนโอห่ม เพื่อนเก๋ ป้าคอน ป้าเรือง พี่นกซีแอตเทิล ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง รวมถึงกำลังใจที่มีให้กันตลอดมา

ขอบคุณเพื่อนๆ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ร่วมเรียนร่วมทำงานด้วยกันตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ ปี 3 ได้แก่ พี่ไอ้ต พี่เอ พี่แซร์ พี่ท๊อบ พี่แอน พี่เอ ที่กรุณาช่วยเหลือในด้าน คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และสารเคมี แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุดใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบคุณน้องชาย ที่ให้ความช่วยเหลือและ ให้กำลังใจ อย่างดียิ่ง และเป็นที่ยึดเหนี่ยวจิตใจของผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนประสบผลสำเร็จ

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ฎ

## บทที่

1	บทนำ.....	1
	1.1 บทนำ.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
	2.1 น้ำเสียชุมชน.....	4
	2.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	9
	2.3 บึงประดิษฐ์.....	10
	2.4 ระบบระเหยน้ำ.....	33
	2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
3	แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	51
	3.1 แผนการทดลอง.....	51
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	52
	3.3 ตัวแปรศึกษา.....	59
	3.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	60
	3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์.....	65
4	ผลการทดลอง.....	67
	4.1 ลักษณะทั่วไปในการทดลอง.....	67
	4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียสม่ำเสมอ.....	69
	4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	88

บทที่	หน้า
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ.....	101
4.5 ระบบบำบัดที่ไม่มีการถ่ายทิ้งน้ำเสียสำหรับบ้านเรือน.....	104
4.6 การศึกษาความเหมาะสมในการใช้ระบบเป็นระบบสำหรับบ้านเรือนทุกๆ ไป.....	109
5   สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	152
ภาคผนวก ค.....	154
ภาคผนวก ง.....	157
ภาคผนวก จ.....	162
ภาคผนวก ฉ.....	164
ภาคผนวก ช.....	169
ภาคผนวก ซ.....	175
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	186

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณการไหลของน้ำเสียแต่ละประเภท.....	5
2.2 คุณภาพน้ำเสียเฉลี่ยจากบ้านพักอาศัย.....	6
2.3 น้ำหนักของมลสารต่อคนตามลักษณะการใช้สอย.....	7
2.4 ความเข้มข้นของมลสารตามลักษณะการใช้สอย.....	7
2.5 ค่าสมมูลย์ประชากร (สป.) ในรูปของบีโอดีของกิจกรรมประจำวันของคนกรุงเทพฯ.....	8
2.6 คุณสมบัติของพืชโพล์พืชน้ำชนิดต่างๆในการบำบัดน้ำเสีย.....	15
2.7 หน้าที่ของพืชโพล์พืชน้ำในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประดิษฐ์.....	17
2.8 ความเข้มข้นและอัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้โดยทั่วไป โดยพืชโพล์พืชน้ำ.....	18
2.9 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	30
2.10 คำเสนอแนะในการออกแบบความลึกสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	31
2.11 ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์.....	32
2.12 คำแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน.....	32
3.1 แสดงตัวแปรศึกษาที่ใช้ในการทดลอง.....	59
3.2 จุดเก็บตัวอย่าง ตัวแปร และความถี่ในการวัด.....	66
3.3 วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	66
4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน.....	12
2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวนอน.....	13
2.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวคิง.....	14
2.4 พืชโคล่พื้นน้ำ.....	16
2.5 ส่วนประกอบหลักของพืชที่โคล่พื้นน้ำ.....	16
2.6 วัฏจักรของไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์.....	23
2.7 กระบวนการไนตริฟิเคชัน ในระบบบึงประดิษฐ์.....	27
3.1 ผังการไหลของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวคิงตามด้วย ระบบระเหยโดยพืช.....	51
3.2 ขนาดของถังที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวคิง.....	52
3.3 ถังที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวคิง.....	53
3.4 ขนาดของถังที่ใช้ในระบบการระเหยโดยพืช.....	54
3.5 ถังที่ใช้ในระบบการระเหยโดยพืช.....	55
3.6 ภาพตัดถังแบบจำลองที่มีการไหลในแนวคิง.....	56
3.7 ภาพตัดถังแบบจำลองระบบการระเหยโดยพืช.....	57
3.8 แสดงระบบที่ใช้ทำการทดลอง.....	60
3.9 แสดงขั้นตอนการดำเนินการ.....	62
3.10 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำและแผนการทดลอง.....	64
4.1 ค่าพีเอชของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	70
4.2 ค่าอุณหภูมิของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	71
4.3 ค่าไออาร์พีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	72
4.4 ค่าซีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	73
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	74
4.6 ค่าบีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	76
4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	77
4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	79
4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	79
4.10 ค่าทีเคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	81
4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทีเคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	81

รูปที่	หน้า
4.12 ค่าแอมโมเนียในโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	82
4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนของระบบ ที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	83
4.14 ค่าฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	84
4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	84
4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	86
4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	86
4.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	87
4.19 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา.....	87
4.20 ค่าพีเอชของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	88
4.21 ค่าอุณหภูมิของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	89
4.22 ค่าไออาร์พีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	90
4.23 ค่าซีไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	91
4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	91
4.25 ค่าบีไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	92
4.26 ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	93
4.27 ค่าของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	94
4.28 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	94
4.29 ค่าทีเคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	95
4.30 ประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	96
4.31 ค่าแอมโมเนียในโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	97
4.32 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	97
4.33 ค่าฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ.....	98
4.34 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	99
4.35 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	99
4.36 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	100
4.37 ค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	100
4.38 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ.....	101
4.39 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง.....	102
4.40 ค่าพารามิเตอร์ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง.....	102

รูปที่	หน้า
4.41 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบ การระเหยโดยพืช.....	103
4.42 ค่าพารามิเตอร์ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบ การระเหยโดยพืช.....	104
4.43 สมดุลมวลอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน.....	106
4.44 สมดุลมวลอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน.....	108



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## อักษรย่อและสัญลักษณ์

ก.	กรัม
ม.	เมตร
ซม.	เซนติเมตร
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซม./วัน	เซนติเมตรต่อวัน
cm/d	เซนติเมตรต่อวัน
HLR	อัตราการระลอกศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate)
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
ม <sup>3</sup> /(ม <sup>2</sup> -วัน)	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน
°ซ	องศาเซลเซียส
ก./(ม <sup>2</sup> -วัน)	กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน
ก./กก.	กรัมต่อกิโลกรัม
NO <sub>3</sub> -	ไนเตรท (Nitrate)
NO <sub>2</sub> -	ไนไตรท์ (Nitrite)
N <sub>2</sub>	ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)
C/N	ค่าอัตราส่วนคาร์บอน:ไนโตรเจน (Carbon:Nitrogen)
VF	การไหลในแนวตั้ง (Vertical Flow)
HF	การไหลในแนวนอน (Horizontal Flow)
ล./ตร.ม.-วัน	ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ปัญหาน้ำเสียที่เกิดจากชุมชนที่การจัดการอยู่นอกเขตที่มีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียรวม (Centralized Wastewater Treatment System) โดยเฉพาะชุมชนที่ตั้งอยู่ริมแม่น้ำ นับเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องรีบเร่งดำเนินการในการแก้ไขโดยเร่งด่วน

ปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กับอาคารเดี่ยว หรือบ้านพักอาศัย คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ระบบบ่อเกรอะ บ่อซึม และระบบบ่อกรองไร้อากาศ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ ดังนั้นเมื่อถ่ายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำก็อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้ โดยทำให้เกิดการเติบโตของสาหร่ายและวัชพืชน้ำ ทำให้แหล่งน้ำมีสภาพไม่น่าดู และขัดขวางการคมนาคมทางน้ำ

ทางที่จะแก้ไขปัญหาน้ำเสียชุมชนให้มีประสิทธิภาพก็คือ การนำระบบบำบัดทางธรรมชาติเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยนั่นคือ ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland System) และระบบระเหยโดยพืช (Evapotranspiration System) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าการปนเปื้อนของของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันระบบบึงประดิษฐ์และระบบระเหยโดยพืชได้รับการพัฒนาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับว่าเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดีและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการไม่สูงมากนัก การกำจัดน้ำเสียโดยการปล่อยให้ระเหยโดยพืชออกสู่บรรยากาศ นั้นก็เป็นวิธีการที่สะดวกเสียค่าใช้จ่ายน้อย อีกทั้งไม่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีต่างๆ ที่ยุ่งยากและได้มีการศึกษาค้นคว้ากันตลอดมาเพื่อปรับปรุงให้การกำจัดน้ำเสียโดยการระเหยโดยพืชทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียโดยพึ่งพาธรรมชาติของดินและการระเหยโดยพืชนี้ นับว่าสอดคล้องกับยุคสมัยนี้ในสถานะพลังงานมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนา โรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนที่อยู่อาศัยมีการขยายตัวอย่างกว้างขวาง การรักษาและป้องกันมิให้สภาพแวดล้อมเสื่อมเสียหรือเกิดมลภาวะก็เป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นการลงทุนก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียจึงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจ โดยระบบการระเหยโดยพืช จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม เพราะเป็นระบบที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ต้องดูแลรักษามาก ดังนั้นการใช้บึงประดิษฐ์ตามด้วยระบบการระเหยโดยพืชจึง

เป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนหรือชุมชนที่อยู่ริมน้ำหรือพื้นที่ที่อยู่นอกเขตที่มีระบบบำบัดน้ำเสียรวม ซึ่งนอกจากจะลดการถ่ายเทน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำแล้วยังเป็นการนำน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในการปลูกไม้ประดับได้ด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียบ้านเรือน โดยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวโค้งตามด้วยระบบการระเหยโดยพืช
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราการระเหย (Hydraulic Loading Rate) และลักษณะการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวโค้งตามด้วยระบบการระเหยโดยพืช
3. เพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะแล้ว โดยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวโค้งร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช โดยตั้งแบบจำลองที่บริเวณหอพักนิสิตหญิง (เฟื่องฟ้า) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยช่วงเวลาที่ทำการวิจัยอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน-เดือนกุมภาพันธ์ มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวโค้งตามด้วยระบบการระเหยโดยพืช โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้น โดยพืชที่ใช้ในการทดลอง คือ ต้นธรรมรักษาและต้นเข็ม
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากหอพักนิสิตหญิง (เฟื่องฟ้า) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาคารสูง 5 ชั้น มีจำนวนห้องพักทั้งสิ้น 72 ห้อง
3. ปรับเปลี่ยนอัตราการระเหย (Hydraulic Loading Rate) ในระบบต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ 8.23 เซนติเมตรต่อวันและ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ

4. ปรับเปลี่ยนวิธีการป้อนน้ำเสียเข้าระบบโดยเปรียบเทียบระบบที่ป้อนน้ำเสียตลอดเวลาที่อัตราภาระชลศาสตร์คงที่ 8.23 เซนติเมตรต่อวันและ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน กับระบบที่มีการป้อนน้ำเสีย 2 ชั่วโมง หยุดป้อน 2 ชั่วโมง โดยคงอัตราภาระชลศาสตร์ที่ 8.23 เซนติเมตรต่อวันและ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ

5. ประสิทธิภาพของระบบนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ คือ พีเอช อุณหภูมิ ไออาร์พี ซีโอดี บีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสรวมในน้ำ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวโค้งตามด้วยระบบการระเหยโดยพืช ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนหรือชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าใช้จ่าย ค่าก่อสร้าง โดยเฉพาะค่าบำรุงรักษาต่ำ แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนคือน้ำเสียที่ได้จากบ้านพักอาศัย อาคารร้านค้า ตลาด โรงแรม ฯลฯ ซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ในปัจจุบันชุมชนเมืองแทบทุกชุมชนกำลังประสบปัญหามลพิษของแหล่งน้ำ ซึ่งเกิดจากการระบายน้ำเสียจากชุมชนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือแหล่งรองรับน้ำ โดยปราศจากการบำบัดน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียดังกล่าวนี้เพิ่มขึ้นตามความเติบโตของชุมชน ซึ่งเป็นผลจากการที่ชุมชนพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยปราศจากการวางแผนรองรับและการดำเนินการป้องกันด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในชุมชน ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาพเน่าเสีย

ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ซึ่งหมายถึง ทั้งปริมาณและองค์ประกอบต่างๆของน้ำเสีย เป็นข้อมูลที่สำคัญ ซึ่งต้องใช้ในการออกแบบและก็เป็นส่วนซึ่งเก็บข้อมูลที่ถูกต้องได้ยาก ในการออกแบบระบบที่มีผู้อยู่อาศัยแล้ว สามารถเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์และวัดปริมาณน้ำเสียได้ แต่สำหรับการออกแบบระบบใหม่ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเก่าหรือค่าเฉลี่ยต่างๆรวมทั้งพิจารณาคุณภาพของผู้ออกแบบเอง

##### 2.1.1 อัตราการไหลของน้ำเสีย

###### 1) อัตราการไหลเฉลี่ยทั้งวัน

อัตราการไหลเฉลี่ยทั้งวัน มีค่าประมาณ 151 ลิตร/คน-วัน ถึงแม้ว่าอัตราการไหลนี้จะแตกต่างกันมากนัก แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าไม่เกิน 227 ลิตร/คน-วัน และมีน้อยมากที่มีค่าเกิน 284 ลิตร/คน-วัน

###### 2) อัตราการไหลของน้ำเสียแต่ละประเภท

อัตราการไหลของน้ำเสียมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับกิจกรรมแต่ละประเภทได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2.1

### 3) การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียพบว่ามีค่าน้อยที่สุดและมากที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราการไหลเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ประมาณร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 300 โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 150 ของอัตราการไหลเฉลี่ยตลอดทั้งวัน

อัตราการไหลน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละชั่วโมงนั้นยากที่จะคาดการณ์ได้ถูกต้อง แต่ก็พบว่าอัตราการไหลน้อยที่สุดคือไม่มีน้ำไหลเลย ส่วนอัตราการไหลมากที่สุดของแต่ละบ้านพบว่าอาจสูงได้ถึง 380 ลิตร/ชั่วโมง

อัตราการไหลสูงที่สุด (peak flow) ขึ้นอยู่กับเครื่องสุขภัณฑ์หรืออุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งก็อกต่างๆไปจะมีอัตราการไหลมากที่สุดประมาณ 0.3 ลิตร/นาที่ แต่ถ้าเป็นถังชักโครกอาจมีค่าสูงถึง 1.6 ลิตร/นาที่ ส่วนวิธีการคำนวณสามารถทำได้โดยใช้ Hunter's curve ซึ่งอาศัยระบบหน่วยสุขภัณฑ์ (fixture unit)

#### ตารางที่ 2.1 ปริมาณการไหลของน้ำเสียแต่ละประเภท

Activity	Gal/use	Use/cap/day	gpcd <sup>b</sup>
Toilet Flush	4.3	3.5	16.2
	4.0-5.0	2.3-4.1	9.2-20.0
Bathing	24.5	0.43	10.1
	21.4-27.2	0.32-0.50	7.4-11.6
Cloteswashing	37.4	0.29	10.0
	33.5-40.0	0.25-0.31	7.4-11.6
Dishwashing	8.8	0.35	3.2
	7.0-12.5	0.15-0.50	1.1-4.9
Garbage Grinding	2.0	0.58	1.2
	2.0-2.1	0.4-0.75	0.8-1.5
Miscellaneous	-	-	6.6
	-	-	5.7-8.0
Total	-	-	45.6
	-	-	41.4-52.0

a Mean and ranges of result

b gpcd may not equal gal/use multiplied by use/cap/day due to difference in the number of study averages used to compute the mean and ranges shown

ที่มา : Christopher (1988)

## 2.1.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

### 1) ลักษณะสมบัติเฉลี่ย

ลักษณะสมบัติเฉลี่ยของน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2.2 ถึง 2.4 ทั้งในรูปของมวลสารและความเข้มข้น โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากบ้านที่ติดตั้งเครื่องสุขภัณฑ์ปกติ และมีอัตราการไหลของน้ำเสียประมาณ 170 ลิตร/คน-วัน

ตารางที่ 2.2 คุณภาพน้ำเสียเฉลี่ยจากบ้านพักอาศัย<sup>a</sup>

Parameter	Mass loading (gm/cap/day)	Concentration (mg/l)
Total Solids	115-170	680-1000
Volatile Solids	65-85	380-500
Suspended Solids	35-50	200-290
Volatile Suspended Solids	25-40	150-240
BOD <sub>5</sub>	35-50	200-290
Chemical Oxygen Demand	115-125	680-730
Total Nitrogen	6-17	35-100
Ammonia	1-3	6-18
Nitrites and Nitrates	< 1	< 1
Total Phosphorus	3-5	18-29
Phosphate	1-4	6-24
Total Coliforms <sup>b</sup>	-	10 <sup>10</sup> -10 <sup>12</sup>
Fecal Coliform <sup>b</sup>	-	10 <sup>8</sup> -10 <sup>10</sup>

**a** For typical dwelling equipped with standard water-using fixture and appliances(excluding garbage disposal) generating approximately 45 gpcd(170 lpcd).

**b** Concentrations presented in organisms per liter.

ที่มา : Christopher (1988)

ตารางที่ 2.3 น้ำหนักของมลสารต่อคนตามลักษณะการใช้สอย

Parameter	Garbages Disposal	Toilet	Basins,Sinks,Appiances	Approximate Total
BOD <sub>5</sub> (กรัม/คน-วัน)	18.1 10.9-60.9	16.7 6.9-23.6	28.5 24.5-38.8	63.2
Suspended Solids (กรัม/คน-วัน)	26.5 15.8-43.6	27.0 12.5-36.5	17.2 10.8-22.6	70.7
Nitrogen (กรัม/คน-วัน)	0.6 0.2-0.9	8.7 4.1-16.8	1.9 1.1-2.0	11.2
Phosphorus (กรัม/คน-วัน)	0.1 0.1-0.1	1.2 0.6-1.6	2.8 2.2-3.4	4.0

ที่มา : Christopher (1988)

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของมลสารตามลักษณะการใช้สอย

Parameter	Garbages Disposal	Toilet	Basins,Sinks,Appiances	Approximate Total
BOD <sub>5</sub> ,mg/l	2380	280	260	360
Suspended Solids,mg/l	3500	450	160	400
Nitrogen,mg/l	79	140	17	-
Phosphorus,mg/l	13	20	26	23

a Based on the average results in Table 5 and the following wastewater flows : Garbage disposal-2 gpcd (8 lpcd) ; toilet-16 gpcd (61 lpcd) ; basins,sinks and appliance- 29 gpcd (110 lpcd) ; total-47 gpcd (178 lpcd)

ที่มา : Christopher (1988)

### 2.1.3 วิธีคำนวณลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

การคำนวณลักษณะสมบัติของน้ำเสียประกอบด้วยสองส่วนใหญ่ๆ คือปริมาณและลักษณะสมบัติซึ่งแปรผันตามปัจจัยอื่นอีกมากมาย สำหรับบ้านพักอาศัยมักคำนวณจากจำนวนคนที่พักอาศัย แล้วนำไปคูณกับลักษณะสมบัติเฉลี่ย จำนวนคนอาจจะคำนวณได้จากสมมติฐานว่ามีผู้อาศัยสูงสุดห้องนอนละสองคน

ค่าสำรองความปลอดภัย (factors of safety) นั้นผู้ออกแบบอาจจะเพื่อเอาไว้ตั้งแต่การใช้ตัวเลขในการออกแบบ เช่น ใช้ค่าปริมาณน้ำเสีย ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยหรือการเพื่อจำนวนคนเอาไว้ ซึ่งก็นับว่าได้สำรองเพื่อความปลอดภัยเอาไว้แล้ว หรืออาจจะใช้ค่าความปลอดภัยมาคูณภายหลังจากเสร็จสิ้นการคำนวณก็ได้เช่นกัน แต่ทั้งนี้จะต้องพึงระมัดระวังมิให้มีการเพื่อเอาไว้จนมากเกินไป

#### 2.1.4 ปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย

ปริมาณความสกปรกที่เกิดจากคนในที่พักอาศัยได้จาก “ค่าสมมูลประชากร(สป.)” หรือค่าความสกปรกที่เปรียบเทียบว่า คนคนหนึ่งได้ปล่อยความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ที่วัดออกมาในรูปของบีโอดี (มีหน่วยเป็นกรัมต่อคน หรือ g/c/d) จากการศึกษาพบว่า สป. สำหรับกิจกรรมประจำวันในที่พักอาศัยของคนในกรุงเทพฯ อันได้แก่ การถ่ายอุจจาระ ปัสสาวะ การอาบน้ำ การซักล้าง การประกอบอาหาร และการล้างภาชนะ มีค่าเท่ากับ 53กรัมบีโอดี/คน/วัน โดยกิจกรรมประจำวันต่างๆ จะมีค่า สป. แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าสมมูลประชากร (สป.) ในรูปของบีโอดีของกิจกรรมประจำวันของคนกรุงเทพฯ

กิจกรรม	ความสกปรก	
	ค่าสมมูลประชากร (สป.) กรัม/คน/วัน	ร้อยละ
จากการถ่ายอุจจาระ ปัสสาวะ	11.42	21.4
จากการอาบน้ำ	14.82	27.8
จากการซักผ้า	3.15	5.9
จากการประกอบอาหาร (จากห้องครัว)	23.97	44.9

ที่มา : บุญส่ง ไช้เกษ และคณะ (2534)

\* น้ำเสียผ่านตะแกรง (Screening) มาแล้ว

ถ้าไม่ผ่านตะแกรงมีค่าเท่ากับ 52 กรัม/คน/วัน

$$\begin{aligned} \text{ค่าสมมูลประชากร (สป.)} &= \text{ค่าบีโอดีของน้ำเสีย (มก./ล.)} \times \text{ปริมาณ} \\ &\quad \text{น้ำเสียที่ปล่อยออกมาต่อวัน (ล./คน/วัน)} \\ &= \text{ค่าบีโอดีเป็น มก. หรือ กรัม/คน} \end{aligned}$$

## 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียชุมชน

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่เหมาะสมและนิยมใช้กับน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย ได้แก่ บ่อปรับเสถียร สระเติมอากาศ เอเอส และระบบบำบัดน้ำเสียที่ติดก๊ับที่

### 2.2.1 ระบบบ่อปรับเสถียร

บ่อปรับเสถียรเป็นกระบวนการที่มีความต้องการเครื่องจักรน้อยมาก ไม่ต้องการการดูแลเอาใจใส่มากนัก เติบระบบง่าย มีงบประมาณการลงทุนและการดำเนินการต่ำ แต่เป็นระบบที่มีความต้องการพื้นที่มาก ดังนั้นอาจมีข้อจำกัดในกรณีชุมชนมีพื้นที่จำกัดหรือที่ดินมีราคาแพง

### 2.2.2 ระบบสระเติมอากาศ

สระเติมอากาศเป็นกระบวนการที่ควบคุมระบบง่ายและมีความต้องการพื้นที่ปานกลาง แต่มีงบประมาณการดำเนินการสูงกว่าระบบบ่อปรับเสถียร โดยทั่วไปสระเติมอากาศสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ แบบผสมอย่างสมบูรณ์ (complete-mix aerated lagoon) และแบบผสมบางส่วน (partial-mix aerated lagoon)

สำหรับน้ำเสียชุมชนของประเทศไทยควรใช้สระเติมอากาศแบบผสมบางส่วนหรือเติมอากาศให้พอดีกับความต้องการออกซิเจนของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากเป็นแบบที่มีงบประมาณการดำเนินการต่ำ

### 2.2.3 ระบบเอเอส

ระบบเอเอสเป็นระบบที่มีความต้องการเครื่องจักรมาก มีความซับซ้อนในการดำเนินการควบคุมระบบ และมีงบประมาณการลงทุนและการดำเนินการสูง แต่มีความต้องการพื้นที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบ่อปรับเสถียรและระบบสระเติมอากาศ ดังนั้นจึงเหมาะกับชุมชนซึ่งมีพื้นที่จำกัดและมีราคาที่ดินสูง ระบบเอเอสสามารถแบ่งกระบวนการได้หลายแบบ แต่แบบที่สำคัญต่อการออกแบบคือการแบ่งประเภทกระบวนการตามอัตราการบำบัด ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ แบบอัตราสูง (high rate) แบบธรรมดา (conventional) และแบบอัตราต่ำ (low rate)

### 2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่

หมายถึง ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการก่อสร้างหรือติดตั้งเพื่อบำบัดน้ำเสียจากอาคารเดี่ยว ๆ เช่น บ้านพักอาศัย อาคารชุด โรงเรียน หรืออาคารสถานที่ทำการ เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่สำหรับบ้านพักอาศัยที่นิยมใช้กัน ได้แก่ บ่อดักไขมัน (Grease Trap) ระบบบ่อกะโระ (Septic Tank) ระบบบ่อกกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) เป็นต้น

### 2.3 บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

ระบบบึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติที่กำลังได้รับการพัฒนาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากการก่อสร้างและออกแบบไม่ซับซ้อนอีกทั้งการดูแลระบบไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อย นอกจากนี้ระบบบึงประดิษฐ์ ยังเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับว่าเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี เพราะเป็นการใช้ธรรมชาติของ ดิน ต้นไม้ น้ำ และจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย

บึงประดิษฐ์เป็นการสร้างเลียนแบบธรรมชาติถูกสร้างขึ้นโดยมีคันขอบดินสูงประมาณ 1 เมตร โดยพื้นที่กั้นบึงปรับให้ได้ระดับเสมอกันเพื่อขังน้ำ ดินพื้นควรมีคุณสมบัติที่ให้พืชน้ำยืดเกาะได้ดี เมื่อก่อสร้างงานดินเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำพืชน้ำมาปลูก ซึ่งจะมีทั้งพืชที่มีรากเกาะดิน เช่น ธูปฤาษี บัว กก อ้อ ฯลฯ พืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน ผักตบชวา และพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย เป็นต้น

บึงประดิษฐ์ถูกนำมาใช้เป็นระบบในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปพบว่าสามารถกำจัดมลสารต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระบบนี้มลสารถูกกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมไปถึงกระบวนการตกตะกอน การดูดซับกับอนุภาคของดิน การนำไปใช้โดยพืชและการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ ข้อดีของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดอื่น ๆ มีดังนี้

- ค่าก่อสร้าง โดยเฉพาะค่าบำรุงรักษาต่ำ
- ใช้พลังงานน้อย
- ใช้เทคโนโลยีน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรผู้ชำนาญงานในการดำเนินการและการเดินระบบ

- ระบบมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกกระทบกระเทือนจากการเปลี่ยนแปลงของภาระบรรทุกต่างๆ
- สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆของบึงได้
- ระบบผูกพันกับสิ่งแวดล้อมอย่างมากหรือการทดลองใช้กับพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

Metcalf และ Eddy (1991) แบ่งระบบบึงประดิษฐ์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

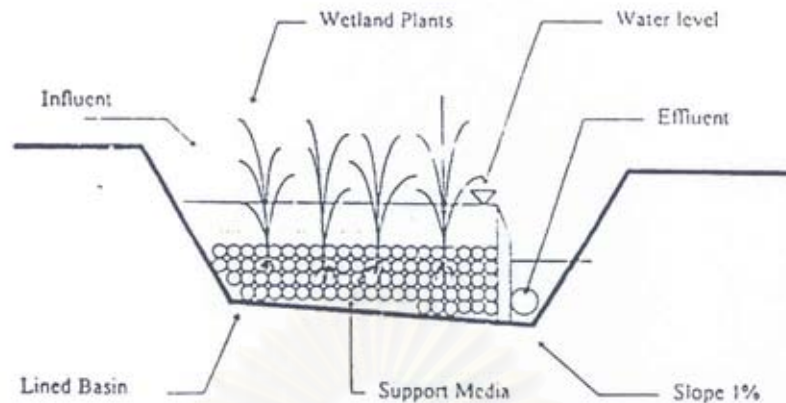
### 2.3.1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน ( Free Water Surface System, FWS )

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินนี้ประกอบไปด้วย บ่อดินที่น้ำไหลซึมลงดินได้น้อย จะ มีอยู่หลายบ่อวางเรียงขนานกัน มีระดับความลึกประมาณ 10-60 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการปล่อยน้ำเสียเข้าระบบ ควรปล่อยให้น้ำไหลลงอย่างช้า ๆ ผ่านก้านลำต้นพืช และรากพืชต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักที่ทำการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้ การเติมอากาศในระบบมาจากพืช ลมพัด และการสังเคราะห์แสง ระบบนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ค่าการบีโอดีค่อนข้างปานกลางซึ่งไม่ควรเกิน 6 ก. ของบีโอดี/(ม.<sup>2</sup>- วัน)ควรมีเวลาเก็บกักประมาณ 4-15 วัน และมีค่าการชะลศาสตร์เท่ากับ 0.01-0.05 ม.<sup>3</sup>/(ม.<sup>2</sup>- วัน) (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539)

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วย บึงที่มีความกว้าง 3-5 ม. และยาวมากกว่า 100 ม. การบำบัดน้ำเสียจะเป็นไปในลักษณะตามยาว ปลูกด้วยพืชที่มีรากเกาะดิน มีส่วนที่โผล่พ้นผิวน้ำ การบำบัดน้ำเสียเกิดจากส่วนของต้นพืชที่จมอยู่ในน้ำ และซากพืชที่ทับถมที่ผิวน้ำดินช่วยให้จุลินทรีย์มาจับและเจริญเติบโต แต่ส่วนสำคัญที่ควรคำนึงถึงก็คือ น้ำเสียอาจจะรั่วออกจากทางน้ำ เพราะพื้นดินด้านล่างไม่ได้ปูด้วยวัสดุกันซึม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน  
ที่มา : Sintumongkolchai (1996)

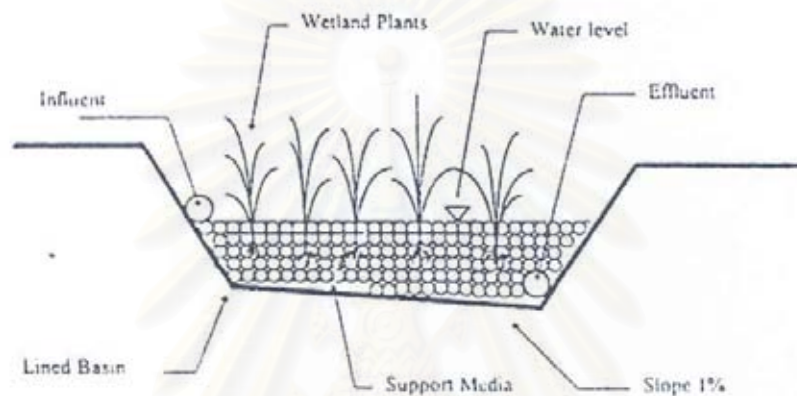
### 2.3.2 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface System, SFS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินนี้ จะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะ ชั้นตัวกลางที่ใช้ได้แก่ หินบด กรวด ทราย และดิน มีความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60-70 ซม. ด้านล่างคาดด้วยดินเหนียว วัสดุกันซึมอื่นๆ หรือปูด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ส่วนก้นบึงให้มีความลาดชันประมาณ 1% เพื่อให้ น้ำไหลลงโดยไม่มี การกักขังเกิดขึ้น และในบริเวณท้ายน้ำจะมีท่อเพื่อทำหน้าที่รวบรวมและรับน้ำออกจากระบบ น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางในสภาพไร้ออกซิเจน และไหลผ่านรากของพืชน้ำที่ปลูก ระบบนี้อาศัยการเติมอากาศด้วยรากพืชเป็นหลัก ซึ่งออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ตามรากพืช ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

ซึ่งบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

### 2.3.2.1 การไหลตามแนวนอน

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วยแปลงที่ปลูกด้วยต้นพืชโผล่พ้นน้ำ และปูด้านล่างด้วยวัสดุกันซึม เพื่อป้องกันการรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ตัวกลางที่ใช้ในระบบอาจเป็นดิน กรวด หรือทราย มีการไหลในแนวนอนจากจุดน้ำเข้า ผ่านชั้นตัวกลางและไหลออกที่จุดน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในช่วงที่น้ำเสียไหลผ่านชั้นรากพืช จะเกิดการบำบัดมลสารให้ลดน้อยลงได้

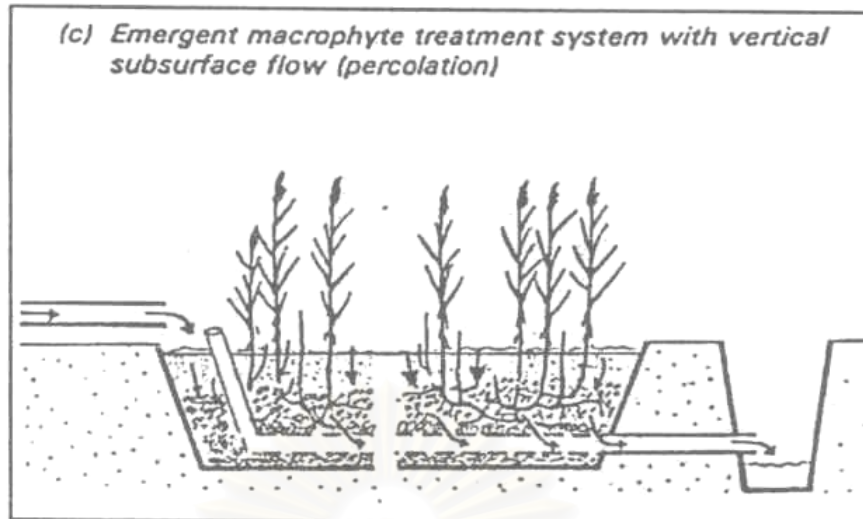


รูปที่ 2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวนอน  
ที่มา : Sintumongkolchai (1996)

### 2.3.2.2 การไหลตามแนวตั้ง

การออกแบบประกอบไปด้วย แปลงบึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยต้นพืชโผล่พ้นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การไหลซึมลงชั้นตัวกลางและการให้น้ำแบบครั้งคราว จะช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดินได้มากกว่าการไหลตามแนวนอนหลายเท่า ในช่วงการให้น้ำเข้าระบบ อากาศจะเติมเข้ามายังช่องว่างในดิน จึงเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดิน ยิ่งไปกว่านั้นการแพร่ของออกซิเจนผ่านดินเพิ่มให้ดีขึ้นได้ในช่วงหยุดการให้น้ำ

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



รูปที่ 2.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลตามแนวดิ่ง  
ที่มา : Brix (1997)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาระบบบึงประดิษฐ์ให้มีความก้าวหน้า และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จึงเกิดระบบใหม่ที่เรียกว่า “บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน” ซึ่งมีขีดความสามารถสูงกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน หรือแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว

### 2.3.3 บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บึงประดิษฐ์แบบผสมผสานนี้ เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่รวมเอาบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนและแนวดิ่งเข้าด้วยกัน

จากการศึกษามากกว่า 13 ปีในยุโรปแสดงให้เห็นว่า ระบบการไหลในแนวนอนสามารถกำจัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในอัตราที่เพียงพอต่อการเกิดไนตริฟิเคชันได้โดยสมบูรณ์ ส่วนระบบการไหลในแนวดิ่งได้ถูกพัฒนา มากกว่า 11 ปี เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นกับการไหลในแนวนอน ในการออกแบบสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี และยังสามารถกำจัดบีโอดีได้อีกด้วย แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำ ในระบบผสมผสานนี้ ช่วยให้จุดแข็งและจุดอ่อนของการไหลในแนวดิ่งและแนวนอนผสมผสานกันจนเกิดความสมดุล ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดบีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ถ้าสามารถเกิดไนตริฟิเคชันได้สมบูรณ์ก็มี

ความเป็นไปได้ที่จะออกแบบเพื่อกำจัดในเตรทโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสามารถทำได้ โดยระบบการไหลในแนวนอนเพราะปริมาณออกซิเจนถูกจำกัด ในระบบนี้จะมีพื้นที่ที่มีสภาพ แอนนออกซิกภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งสามารถเอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

### 2.3.4 พืชที่ใช้ในบึงประดิษฐ์

พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่เป็นพืชที่โผล่พ้นน้ำ เช่น ฐูปถายี (Cattail : *Typha*), กก (Bulrush : *Scirpus*) , อ้อ (Reed : *Phragmites*) และหญ้าทรงกระเทียม (Sedge : *Carex*) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

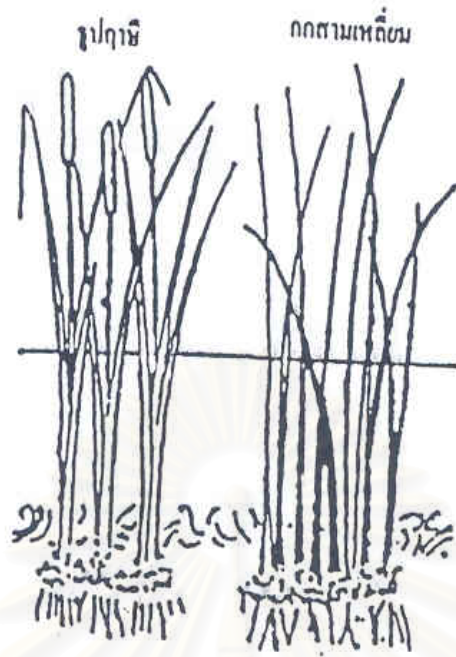
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของพืชโผล่พ้นน้ำชนิดต่างๆในการบำบัดน้ำเสีย

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

หมายเหตุ : \* ppt (part per thousand)

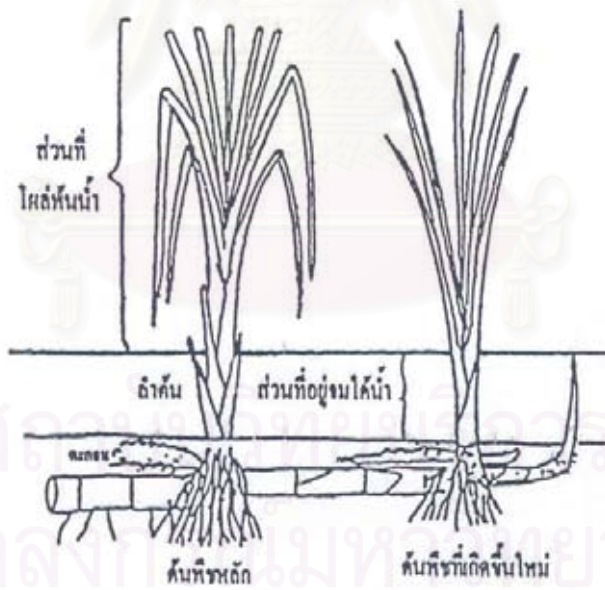
ที่มา : Reed et al. (1988)

รากของพืชโผล่พ้นน้ำนั้นเป็นส่วนที่สำคัญต่อระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งจะเจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 50 ซม. หรือมากกว่า โดยทั่วไปจะสร้างลำต้นและใบให้สัมผัสกับอากาศ และแผ่ขยายรากและระบบรากพืชภายใต้ชั้นดิน



รูปที่ 2.4 พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant)

ที่มา : Thayalakumaran (1994)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบหลักของพืชที่โผล่พ้นน้ำ

ที่มา : Thayalakumaran (1994)

ในระบบบึงประดิษฐ์พืชที่โผล่พ้นน้ำมีหน้าที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ออกซิเจนถูกถ่ายเทผ่านช่องว่างของใบ และลำต้น ไปยังรากและระบบรากพืช โดยการแพร่ และโดยการไหลพาของอากาศ ออกซิเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยจากระบบรากออกสู่ชั้นรากพืช

โดยรอบ ก่อให้เกิดสภาพมีออกซิเจน และช่วยเสริมในการย่อยสลายอินทรีย์สาร รวมถึงการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของพืชเหล่านี้ในช่วงประมาณ 5 ถึง 45 ก. ของ  $O_2/(m^2 \cdot \text{วัน})$  ของพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับความดันของออกซิเจนในดิน การแพร่และการเคลื่อนผ่านของออกซิเจนจากลำต้นและปล่อยออกจากชั้นรากพืชจะไปเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และเพิ่มอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน และเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนคอลลอยด์ฟอสฟอรัส (Cooper และ Boon, 1987)

ตารางที่ 2.7 หน้าที่ของพืชไหล่น้ำในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	หน้าที่ในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ลดความเข้มของแสงเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน</li> <li>ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว</li> <li>ลดผลกระทบจากลมต่อผิวน้ำ</li> <li>ทำให้ระบบมองดูสวยงาม</li> <li>สะสมสารอาหาร</li> </ul>
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ลดความเร็วกระแส น้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ</li> <li>เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับตัวของไบโอฟิล์ม</li> <li>กรองตะกอนขนาดใหญ่</li> <li>ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน</li> <li>ดูดซับสารอาหาร</li> </ul>
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำอยู่ตัว ถูกกัดเซาะน้อย</li> <li>ป้องกันตัวกลางอุดตันในระบบการไหลในแนวดิ่ง</li> <li>ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการย่อยสลาย และการเกิดไนตริฟิเคชัน</li> <li>ดูดซับสารอาหาร</li> <li>ปลดปล่อยแอนติไบโอติก(Antibiotics)</li> </ul>

ที่มา : Brix (1997)

### 1) การนำสารอาหารไปใช้โดยพืช

อัตราการกำจัดสารอาหารของพืชน้ำนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารอาหารในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำเสีย เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่กำจัดได้ยาก ฯลฯ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 อัตราการนำสารอาหารไปใช้โดยพืช ถูกกำจัดโดยขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของพืช พืชที่ปลูก ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อของพืชและลักษณะของตะกอนและน้ำเสีย การนำสารอาหารไปใช้โดยพืชไหล่น้ำมีปริมาณสูงในพืชที่เพิ่งเริ่มทำการบำบัด หรือมีอายุน้อย (มากกว่า 2.5 ก./กก. ของเนื้อเยื่อ) แต่จะน้อยลงเมื่อพืชน้ำใช้งานมานานหรือโตเต็มที่ (Reddy และ Debusk, 1987)

ตารางที่ 2.8 ความเข้มข้นและอัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้โดยทั่วไปในพืชไหล่น้ำ

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

ที่มา : Reddy และ Debusk (1987)

## 2) การสูญเสียจากการคายระเหย

การคายระเหยเป็นการรวมกันของการระเหยจากพื้นผิวน้ำ และน้ำที่สูญเสียจากพืชไหล่น้ำเอง (Kadlec , 1987) การคายระเหยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ควบคุมเช่น แสงแดด ลม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ (Hammer และ Kadlec, 1983 ) น้ำที่สูญเสียจากการระเหยในฤดูร้อนจะทำให้ปริมาณน้ำในน้ำเสียที่อยู่ในระบบบึงประดิษฐ์ลดลง และทำให้ความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนที่ยังคงอยู่ในน้ำนั้นมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณน้ำลดลงจะทำให้เวลากักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะเกิดสถานะขาดออกซิเจนขึ้นได้ (Reed และคณะ,1988)ในการแก้ปัญหาการสูญเสียน้ำจากการคายระเหยแต่ยังคงให้ได้อัตราการไหลตามค่าที่ออกแบบไว้ควรจะนำน้ำที่ออกจากระบบบางส่วนกลับเข้ามาใหม่ในฤดูแล้งที่มีการสูญเสียน้ำเป็นปริมาณมาก (Metcalf และ Eddy, 1991)

## 3) การถ่ายเทออกซิเจน

พืชที่โผล่พ้นน้ำ เช่น กก ธูปฤาษี กกสามเหลี่ยม และต้นอ้อ สามารถดูดซึม ออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านและลำต้นที่อยู่เหนือน้ำไหลลงสู่รากได้ ออกซิเจนจะถูกปลดปล่อย ออกจากรากและสร้างชั้นที่มีออกซิเจน ดังนั้นในโซนของดินจะมีสถานะที่มีออกซิเจนและไม่มี ออกซิเจนอยู่ พืชโผล่พ้นน้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในช่วง 5 ถึง 45 ก.ของ  $O_2/(m^2 \cdot \text{วัน})$  ของ พื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับออกซิเจนที่มีอยู่ในดิน (Cooper และ Boon, 1987)

### 2.3.5 ดิน

สารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่จะได้รับมาจากดินยกเว้น คาร์บอน ดินในธรรมชาติที่ธูปฤาษีอยู่จะมีลักษณะเป็นโคลนแต่ส่วนใหญ่แล้วพืชจะเจริญเติบโตใน ตัวกลาง (Media) ที่แตกต่างกัน ช่องว่างในดินหรือตัวกลางชนิดอื่นจะใช้เป็นช่องทางนำไหลแก่ ระบบน้ำใต้ผิวดินที่มีการไหลลงสู่เบื้องล่างซึ่งจะมีการบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ที่รากพืชและ ดินที่อยู่บริเวณโดยรอบ

ดินอาจจะถูกใช้ให้เป็นพื้นที่ของตัวกลางเมื่อต้องการที่จะกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากการ กำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นดินแต่อย่างไรก็ตามดินที่มีศักยภาพในการกำจัด ฟอสฟอรัสได้สูงจะต้องเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดและน้ำสามารถซึมผ่านได้ต่ำถึงปานกลางซึ่งอาจจะ เป็นตัวจำกัดความจุทางศาสตร์ของดินพื้นส่วนล่างในระบบบึงประดิษฐ์ได้

### 2.3.6 จุลินทรีย์

ในระบบบึงประดิษฐ์จะพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์เช่นแบคทีเรียโปรโตซัว ฟังไจ จนถึงสัตว์พวกที่มีกระดูกสันหลัง ในกรณีของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ในส่วนของพืชที่จมอยู่ในน้ำ (รากและลำต้นที่จมอยู่ในน้ำ) ในชั้นตะกอน ที่อยู่ด้านล่างและบนผิวดินตัวกลาง (Thayalakumaran, 1994)

แบคทีเรียอาจจะดำรงชีวิตอย่างอิสระในน้ำ เช่น Bacterioplankton หรือบางชนิดเกาะอยู่ที่ ผิวของส่วนที่จมอยู่ในน้ำหรือใต้ดินของพืชน้ำ เช่น บริเวณราก และส่วนของลำต้นที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งเป็นพวก Periphytic Bacteria และชนิดที่เกาะอยู่ที่ผิวดินตัวกลาง เช่น หิน กรวด ทราย และชั้น ตะกอนด้านล่าง ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิด Benthic Bacteria (Roger และคณะ, 1985)



Periphytic Bacteria ชนิด *Elodea canadensis* ซึ่งเกาะติดอยู่กับพืชน้ำนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า Planktonic Benthic Bacteria (Fly และ Humphrey, 1978) ส่วน ฟังไจชนิดต่างๆซึ่งรวมถึงประเภท Saprophytic ที่อาศัยดำรงชีวิตอยู่ในซากพืชที่ตายแล้วและ ประเภท Parasitic ยังมีส่วนช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่คงตัว พวกที่ดำรงชีวิตอิสระ เช่น Zooplankton Benthic หรือจำพวกไม่มีกระดูกสันหลังที่อาศัยเกาะบริเวณผิวของพืชก็พบในระบบบึงประดิษฐ์เช่นเดียวกับพวก Annelid Worms, Mollusks, Crustaceans, Insect ฯลฯ ซึ่งทั้ง สิ่งมีชีวิตที่ไม่มีกระดูกสันหลังและพืชกลายเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญสำหรับพวกที่มีกระดูกสันหลัง เช่น ปลาเล็กๆ เป็นต้น

ดังนั้นสิ่งมีชีวิตทั้งพวกที่มีกระดูกสันหลังและไม่มีกระดูกสันหลังจึงมีส่วนสำคัญในการ ถ่ายเทพลังงาน สารอาหาร และยังช่วยจัดระเบียบห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน์ของบึงประดิษฐ์ อีกด้วย (Rogers และคณะ, 1985)

### 2.3.7 กลไกการบำบัด (Treatment Mechanisms)

จากการศึกษาโดยส่วนใหญ่ได้ชี้ให้เห็นว่า บึงประดิษฐ์สามารถกำจัดบีโอดี สารแขวนลอย สารอาหาร โลหะหนัก และเชื้อโรค จากน้ำเสียหลากหลายชนิดได้ในปริมาณสูง กลไกการ บำบัดประกอบไปด้วย การตกตะกอน การทำงานของจุลินทรีย์ การดูดซับ การย่อยสลายทางเคมี และการดูดซับของดิน (Rogers และคณะ, 1985)

#### 1) การกำจัดบีโอดี

บีโอดีเป็นการวัดค่าการดูดซับออกซิเจนของพืชน้ำ ซึ่งเป็นผลของกระบวนการทาง ชีวเคมีของจุลินทรีย์ในระบบ ค่าบีโอดีในระดับที่สูงในน้ำเสียเป็นผลให้ออกซิเจนละลายน้ำใน แหล่งน้ำที่รองรับหมดไป

สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมตัวอยู่กับบึงย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลาย อินทรีย์จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำและที่แขวนลอยอยู่ ออกซิเจนส่วนใหญ่ จะได้มาจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่มีอยู่จำนวนน้อย เนื่องจากการเติบโตของสาหร่ายถูก จำกัดจากการบดบังแสงแดดของพืชเหนือน้ำ

#### 2) การกำจัดสารของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากเวลาเก็บกัก (HRT) ที่ยาวนาน ตื้น และมีสภาพที่สงบนิ่ง การตกตะกอนโดยส่วนใหญ่ของของแข็งเกิดขึ้นภายใน 2-3 ม. แรกจากทางน้ำเข้า (Reed และคณะ, 1988) ยิ่งไปกว่านั้นต้นพืชมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของน้ำเสียที่เข้ามาต่ำลง และช่วยกระจายน้ำเข้าไปทั่วทั้งระบบ ซึ่งช่วยเสริมการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น (Gray, 1989) พวกคอลลอยด์และของแข็งที่ไม่ตกตะกอนถูกกำจัดอย่างน้อยส่วนหนึ่งโดยการจับติดกับแบคทีเรีย การชนกัน การไหลไปรวมกัน และการดูดติดกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ลำต้นพืชด้านข้างและก้นร่องดิน (Kessomboon, 1990) การกำจัดของแข็งแขวนลอย และการย่อยสลายมวลสาร เป็นผลให้เกิดชั้นของตะกอน (Sludge Layer) สะสมในร่อง (Hammer และ Kadlec, 1983)

### 3) การกำจัดไนโตรเจน

การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์เกิดขึ้นจากกลไกดังต่อไปนี้ (Rogers และคณะ, 1985)

- การนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช และการเก็บเกี่ยวภายหลัง
- การระเหยของแอมโมเนีย
- การดูดซับแอมโมเนีย
- กระบวนการไนตริฟิเคชัน
- กระบวนการไนตริฟิเคชัน

ในระบบบึงประดิษฐ์นั้น แบคทีเรียเป็นตัวการสำคัญในการกำจัดไนโตรเจน ซึ่งมันจะเปลี่ยนรูปจากสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนไปเป็นสารประกอบอนินทรีย์ และจากรูปแบบหนึ่งของสารประกอบอนินทรีย์ไปเป็นรูปแบบอื่น ๆ

แบคทีเรียเปลี่ยนรูป  $\text{NH}_4^+$  ไปเป็น  $\text{NO}_3^-$  โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้น ต้องการสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนซึ่งเดิมจากผิวหนังน้ำได้ดีหรือสภาพมีออกซิเจนชั้นบาง ๆ ที่โคนของรากพืชที่ซึ่งปริมาณของออกซิเจนนั้นถูกปลดปล่อยโดยความสามารถในการส่งผ่านก๊าซของพืชโผล่พ้นน้ำภายใต้สภาพแอนอนอกซิก  $\text{NO}_3^-$  จะถูกแปรรูปไปเป็น  $\text{N}_2$  และปล่อยออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ในอีกทางหนึ่งในโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์อาจจะสูญเสียไปในรูปของ  $\text{NH}_3$  โดยการระเหย (Volatilization) จากผิวหนังน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่มีอุณหภูมิและพีเอชสูง

ผิวน้ำที่กว้างและตื้นในระบบบึงประดิษฐ์มีส่วนช่วยในการระเหยของแอมโมเนีย (Roger และคณะ, 1985)

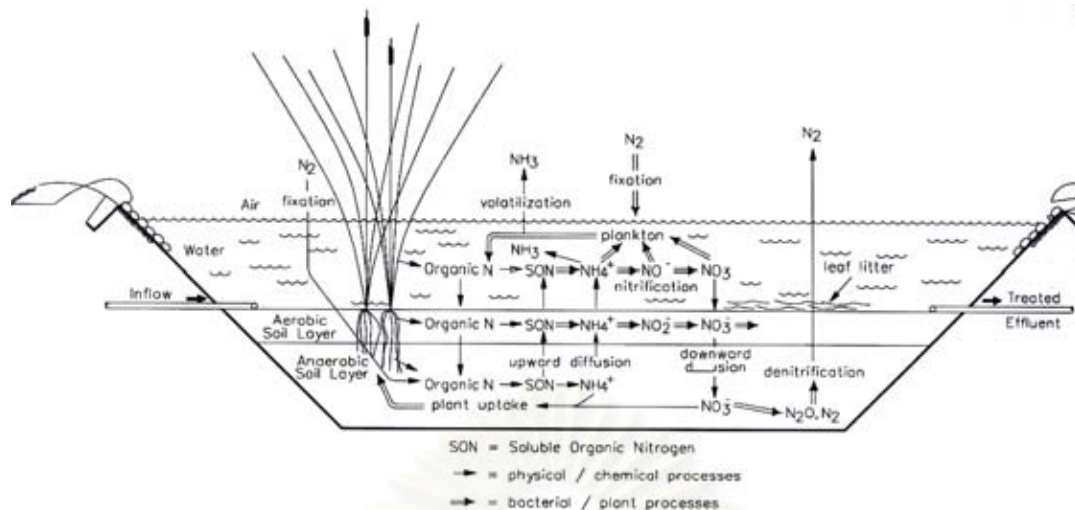
มีรายงานที่ระบุว่า การกำจัดไนโตรเจนอาจสูงถึง 79% ในอัตราภาระไนโตรเจน 44 กก./(เฮกตาร์-วัน) แต่ในบางแห่งก็สามารถกำจัดได้เพียง 10% การกำจัดไนโตรเจนเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน แอมโมเนียจะถูกแปรไปเป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในส่วนที่มีอากาศ แล้วไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนในส่วนของแอนน็อกซิก โดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

การบำบัดไนโตรเจนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ อัตราภาระชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate) กลไกสำคัญในการบำบัดไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสีย นั้น ๆ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณคาร์บอน อุณหภูมิ ตลอดจนอัตราและระยะเวลาในการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของกระบวนการที่ลดไนโตรเจน อาจจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

#### ก. การเปลี่ยนรูปไนโตรเจน

การเปลี่ยนรูปไนโตรเจนจะเกิดขึ้นในน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งประกอบไปด้วย การตรึงไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในรูปของแอมโมเนีย ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน

ปฏิกริยาที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ ยังสามารถเกิดขึ้นในดินได้ด้วย นอกจากนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนของแอมโมเนียม การแปรรูปเป็นอิวมัสและไนโตรเจนที่ถูกพืชนำไปใช้ ปฏิกริยาเหล่านี้เป็นการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนที่สำคัญในดิน การเปลี่ยนรูปแบบของไนโตรเจนได้แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วัฏจักรของไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา : Cambell และ Ogden (1999)

ในขณะที่มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในน้ำเสียที่ไหลผ่านมากมาย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนก็ต่ำกว่าในดิน เพราะในน้ำเสียมีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าในดิน นอกจากนี้ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แล้ว ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่จำกัดการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนก็คือ ระยะเวลาการกักเก็บที่ไม่ยาวนานพอ

#### ข. การลำเลียงไนโตรเจน

ในการบำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสีย จะต้องอาศัยการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเป็นกระบวนการแรก และจะประกอบไปด้วยการลำเลียงออกจากระบบ ซึ่งต้องอาศัยการลำเลียงไนโตรเจนโดยกระบวนการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

##### ข.1 การระเหยของแอมโมเนีย

การระเหยแอมโมเนียสู่บรรยากาศจะช่วยกำจัดแอมโมเนียในรูปของก๊าซ ปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช อุณหภูมิ และสัดส่วนของอากาศที่เจือปนในน้ำเสีย แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว การลำเลียงไนโตรเจนจากระบบบึงประดิษฐ์จะค่อนข้างต่ำ เพราะค่าพีเอชของน้ำเสียมักจะเป็นกลาง

## ข.2 กลไกการบำบัดทางกายภาพ

ไนโตรเจนในส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นอนุภาคจะถูกบำบัดโดยการตกตะกอนและการกรอง ธรรมชาติของไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่ถูกบำบัดโดยการตกตะกอนและการกรอง จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาคมวลสารและความเข้มข้นของไนโตรเจนในอนุภาคมวลสาร นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความแปรปรวนในไหลของน้ำเสีย

ถ้าพิจารณากลไกการบำบัดไนโตรเจนโดยแยกเป็นส่วน ๆ อาจจำแนกได้ดังนี้

- การตกตะกอนและการกรอง

อนุภาคที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์จะตกลงสู่ผิวของดินหรือชั้นทราย และถูกกรองโดยชั้นทรายร่วมกับระบบรากฝอยของพืชซึ่งสานกันเป็นร่างแหในชั้นทราย

- การระเหยของแอมโมเนีย

การระเหยของแอมโมเนียเป็นกลไกกรองในการบำบัดไนโตรเจน เพราะเกือบทั้งหมดของปริมาณไนโตรเจนอยู่ในรูปอนินทรีย์ สารไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซแอมโมเนียยังอยู่ในระดับที่ต่ำ

- การนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช

โดยการใช้เพื่อการสร้างเซลล์ของพืช

- ไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน

ในขณะที่ปล่อยน้ำเสียไหลผ่านระบบบำบัด ไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบในอินทรีย์สารจะถูกตรึงในรูปของแอมโมเนียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออนในขณะเดียวกันสภาพเช่นนี้ไม่เหมาะสมสำหรับ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เพราะน้ำเสียที่ปล่อยเข้าระบบ

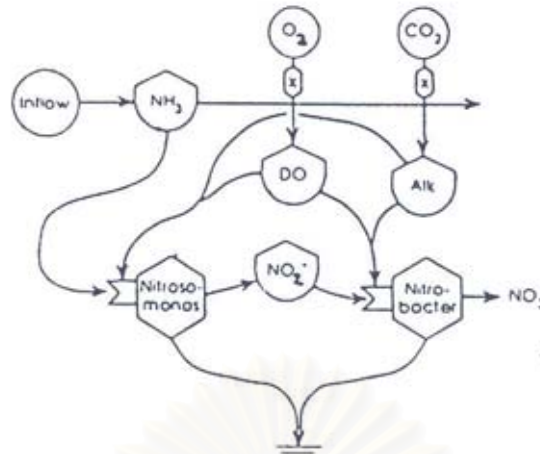
จะมีออกซิเจนน้อยและมีแบคทีเรียชนิดไนตริไฟร์ (Nitrifier) น้อย แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดช่วงที่หยุดปล่อยน้ำเสีย

กลไกของระบบไนตริฟิเคชัน แสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) และรูปที่ 2.7 โดยขั้นแรก *Nitrosomonas* จะเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนให้กลายเป็นไนไตรท์ไนโตรเจน และ *Nitrobacter* จะเปลี่ยนไนไตรท์ให้เป็นไนเตรท



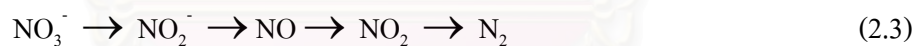
ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในระบบบำบัดแบบ Land Treatment สำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะทำการเปลี่ยนไนเตรทไนโตรเจนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนและก๊าซไนโตรเจนในที่สุด โดยไนเตรทไนโตรเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน มีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน สามารถจำแนกปฏิกิริยานี้ได้เป็น 2 ชนิด คือ Substrate Nitrate Denitrification คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนมาจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่มาจากเซลล์ของจุลินทรีย์ และ Endogenous Nitrate Denitrification กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีคาร์บอนจากแหล่งภายนอก คือ จุลินทรีย์จะใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของตน ปฏิกิริยานี้จึงเสมือนว่าเป็นการย่อยตัวเอง

การรักษาสภาพมีอากาศเป็นเหตุผลหนึ่งของการเติมน้ำเสียเป็นครั้งคราวหรือในช่วงไม่ยาวมากนัก เพราะสภาพมีอากาศจะยังคงอยู่ในระหว่างที่ยังไม่มีน้ำเสียไหลผ่านปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นบริเวณผิวดินเพราะเป็นสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน และยังคงเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างช่องว่างของเม็ดดินหรืออนุภาคทรายซึ่งมีออกซิเจนจากรากพืชแทรกอยู่ อันส่งผลให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ได้ และเมื่อถึงเวลาเติมน้ำเสียครั้งต่อไปแอมโมเนียที่ผ่านมากับน้ำเสียก็จะถูกดูดซับลงสู่ดินและแปรรูปเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียให้ได้ผลดี น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากกว่า 3



รูปที่ 2.7 กระบวนการไนตริฟิเคชัน ในระบบบึงประดิษฐ์  
ที่มา : Kadlec และ Knight (1996)

การกำจัดไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ทำโดยการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาพแอนน็อกซิก เป็นสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่สามารถนำออกซิเจนมาใช้จากแหล่งอื่น คือ ไนเตรท ไนไตรท์ หรือแม้กระทั่งซัลเฟต ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า ดีไนตริฟิเคชัน กระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ซึ่งในขั้นต่อมาจะผลิตไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกมาแล้วปลดปล่อยสู่บรรยากาศ



ออกซิเจนละลายเป็นตัวบ่งชี้ของระบบดีไนตริฟิเคชัน ค่าพีเอชที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 7 และ 8 แต่อย่างไรก็ตามค่าความเป็นด่างที่ผลิตออกมาในช่วงที่เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นผลทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้น อุณหภูมิก็มีผลต่อปฏิกิริยาอย่างมากซึ่งไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 5°C และควรมีอัตราการไหลเข้าระบบต่ำ

#### 4) การกำจัดฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีตั้งแต่ 0-90% ส่วนใหญ่การกำจัดเกิดขึ้นที่ชั้นดินในส่วนพื้นบึง ถ้าหากดินมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียมและแคลเซียม ก็จะช่วยส่งเสริมการกำจัดให้ดีขึ้น ส่วนพีชน้ำจะนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ผ่านทางราก เมื่อพีชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสบางส่วนออกมา ส่วนที่เหลือจะจมอยู่กับซากพืช

## 5) การกำจัดเชื้อโรค

มีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์ที่ชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ในช่วง 86-90% Gersberg และคณะ. (1987) รายงานว่ามีปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำเข้าเป็นจำนวน  $6.75 \times 10^7$  MPN/100 มล. แล้วถูกกำจัดลดลงถึง 99.1% ในน้ำออก

กลไกหลักในการกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์ คือ การตายตามธรรมชาติ การจับกินกันเอง การตกตะกอน และการดูดซับ พยาธิไส้เดือนและซิสต์ของปรสิตชนิดอื่น ๆ ของน้ำน้อย แบคทีเรียจะถูกดูดซับด้วยอนุภาคที่อยู่ในน้ำ และถูกกำจัดเมื่ออนุภาคนั้นตกตะกอน ยิ่งไปกว่านั้นแบคทีเรียบางส่วนอาจถูกดูดซับบนผิวของพืชน้ำที่ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์นั้น

มีการศึกษาอีกมากมายที่กล่าวถึงการกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์นั้นพบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรค เวลาเก็บกัก และอุณหภูมิ (Reed และคณะ, 1988)

Bavor และคณะ. (1987) รายงานว่าการกำจัดแบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้เวลาเก็บกัก 3-7 วันนั้นมีความสามารถในการกำจัดเท่าเทียมหรือมากกว่าที่กำจัดด้วยระบบบ่อเติมอากาศแบบธรรมดาซึ่งใช้เวลาเก็บกักที่ยาวนานกว่า

## 6) การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก

สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก สารประกอบอินทรีย์ที่คงตัว รวมไปถึงเซอร์แฟกแตนท์ (Surfactants) ฟีนอล เบนซีน และยาฆ่าแมลงในการเกษตร ซึ่งเป็นพิษและมีการย่อยสลายทางชีววิทยาได้ช้ามาก วิธีหลักในการกำจัดสารเหล่านี้ในระบบบึงประดิษฐ์คือ การทำให้เกิดการระเหย การดูดซับ และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Rogers และคณะ, 1985) Polprasert (1989) ได้แสดงข้อมูลสนับสนุนว่าสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากใน Aquatic System จะถูกกำจัดโดยการดูดซับภายในผิวหน้าของระบบ และถูกเปลี่ยนไปโดยกระบวนการสลายตัวทางกายภาพเคมี และชีวภาพ (Kadlec, 1987) รายงานว่าการดูดซับที่ชั้นตะกอนด้านล่างและส่วนที่จมอยู่ในดินของพืช สามารถช่วยลดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้บางส่วน ในระบบบึงประดิษฐ์ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากนี้จะไปสะสมอยู่ในตะกอนซึ่งค่อย ๆ ถูกย่อยสลายไปโดยการทำงานของจุลินทรีย์ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมี



จำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้น ค่าพีเอช อุณหภูมิของน้ำ ลักษณะของอาหาร และระยะเวลาเก็บกักจะมีผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

## 7) การกำจัดโลหะ

ในระบบบึงประดิษฐ์โลหะถูกกำจัดออกจากรน้ำเสียโดยการนำไปใช้โดยพืช การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับกับดินและสารประกอบอนินทรีย์ที่ตกตะกอน (Gearheart, 1992) อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าขีดความสามารถของระบบบึงประดิษฐ์ในการกำจัดโลหะโดยการนำไปใช้โดยพืชและการเก็บเกี่ยวมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Stowell และคณะ, 1981)

### 2.3.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

โดยทั่วไปแล้วบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวนอนจะประกอบไปด้วยร่องยาว หรือบ่อที่ปูพื้นข้างล่างด้วยวัสดุที่น้ำไม่สามารถผ่านได้ เพื่อป้องกันการรั่วซึม และภายในบรรจุตัวกลางซึ่งให้พืชไหลผ่านน้ำยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ ตัวกลางที่ใช้จะมีหินหรือหินบดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 ซม. กรวด และดินประเภทต่าง ๆ ซึ่งภายในบ่ออาจจะบรรจุตัวกลางชนิดเดียวหรือบรรจุตัวกลางหลายชนิดรวมกัน

น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและถูกบำบัดในระหว่างที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางและชั้นรากของพืช ในพื้นผิวดักกลางจะมีสภาวะที่อึดตัวตลอดเวลาซึ่งจะเกิดสภาพขาดออกซิเจนแต่อย่างไรก็ตามพืชสามารถนำเอาออกซิเจนเข้าสู่ระบบรากได้ ดังนั้นจะมีสภาวะใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณใกล้ ๆ รากพืชด้วย

#### 1) การพิจารณาทางชลศาสตร์

ในสภาพที่ตื้นและเต็มไปด้วยสภาวะที่อึดตัวของน้ำในร่องซึ่งไม่มีการรั่วซึมข้างล่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงไฮโดรลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว จะถูกสมมุติให้เป็นความลาดชันของพื้นบ่อ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้ตามสมการที่ (2.4) (Reed และคณะ, 1988)

$$Q = K_s * A * S \quad (2.4)$$

เมื่อ  $Q =$  อัตราการไหล

$$\begin{aligned}
 K_s &= \text{สภาพนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity)} \\
 &\text{ของพื้นที่ 1 หน่วยของตัวกลาง} \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัด} \\
 S &= \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว} \\
 &= \Delta h / \Delta L
 \end{aligned}$$

และสามารถหาพื้นที่หน้าตัดที่สถานะอิ่มตัวของน้ำจากสมการ (3.5) ได้เป็น

$$a_c = \frac{Q}{K_s * S} \quad (2.5)$$

$$S = \frac{8.6}{K_s} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 a_c &= \text{พื้นที่หน้าตัดของบ่อที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ (ม.<sup>2</sup>)} \\
 &\text{และมีค่าเท่ากับ } d_1 \times w_1 \\
 d_1 &= \text{ความลึกของน้ำในบ่อ (ม.)} \\
 w_1 &= \text{ความกว้างของบ่อ (ม.)} \\
 K_s &= \text{สภาพทางชลศาสตร์ของตัวกลาง (อาจดูได้จากตารางที่ 2.9)}
 \end{aligned}$$

และเมื่อต้องการคำนวณหาเวลาเก็บกักและพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์แบบ SFS สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7) และ (2.8)

$$t = \frac{L * W * Y * n}{Q} \quad (2.7)$$

$$A_s = L * W \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 t &= \text{เวลาเก็บกัก, วัน} \\
 L &= \text{ความยาวของบ่อ, ม.} \\
 W &= \text{ความกว้างของบ่อ, ม.} \\
 A_s &= \text{พื้นที่ผิวของบ่อ, ม.<sup>2</sup>} \\
 Q &= \text{อัตราไหลเฉลี่ยของระบบ ((Q<sub>เข้า</sub> + Q<sub>ออก</sub>)/2), ม.<sup>3</sup>/วัน} \\
 Y &= \text{ความลึกของน้ำในบ่อ, ม.} \\
 n &= \text{ค่าความพรุนของตัวกลางในบ่อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.45} \\
 &\text{ขึ้นอยู่กับขนาดของกรวด อาจดูได้จากตารางที่ 2.9}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

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

ที่มา : Metcalf และ Eddy (1991)

เมื่อคำนวณหาเวลาเก็บกัก โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการกำจัด บีโอดี จะใช้สมการ (2.9)

$$\frac{BOD_{\text{ออก}}}{BOD_{\text{เข้า}}} = e^{-K_T t} \quad (2.9)$$

$$K_T = K_{20}(1.1)^{T-20} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $K_T$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาลำดับหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ต่อวัน  
 $T$  = อุณหภูมิในระบบ, °ซ

เมื่อพิจารณาถึงสภาพนำทางชลศาสตร์ จะใช้สมการ (2.11) คำนวณหา  $t$

$$t = \frac{L}{K_S S} \quad (2.11)$$

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้ฝายนํ้าล้นในการควบคุมการไหลให้ส่วนก้นบ่อมีความลาดของบ่อประมาณ 1% เพื่อให้ให้นํ้าไหลลง โดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น ส่วนก้นบ่อบริเวณปลายท้ายนํ้าของบ่อจะมีท่อตัดเจาะรูรอบท่อเพื่อรับนํ้าที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการหลีกเลี่ยงที่จะรบกวนโครงสร้างของตัวกลางและชั้นรากของพืชและเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการบำบัด ค่าความเร็วของการไหลของนํ้าผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 ม./วัน

(Reed และคณะ, 1988) ในการออกแบบความลึกของบ่อ ควรจะเลือกให้สอดคล้องกับชนิดของพืชในระบบซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ค่าเสนอแนะในการออกแบบความลึกสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

ชนิดของพืช	ความลึกของบ่อ, ซม.
กกสามเหลี่ยม	76
อ้อ	60
ธูปฤาษี	30

ที่มา : Reed และ คณะ (1988)

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ มีขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

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

ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.11

## 2) ภาวะบรรทุสารอินทรีย์

ภาวะบรรทุสารอินทรีย์ไม่ได้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าวิกฤตในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์ แต่เป็นตัวตรวจสอบให้แน่ใจว่าได้ผิวดินมีออกซิเจนพอเพียง โดยทั่วไปแล้วพืชใล่ผิวดินสามารถส่งผ่านออกซิเจนได้ในช่วง 5-45 ก. ของ  $O_2/(m^2 \cdot \text{วัน})$  ของพื้นผิบบึงประดิษฐ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของออกซิเจนในบริเวณราก แต่สามารถสมมุติได้ว่าออกซิเจนที่ต้องการมีค่าเป็น

1-1.5 เท่าของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เป็นค่าสมมุติที่เหมาะสมสำหรับ SFS ซึ่งจะป้องกันอัตราการเกิดออกซิเจนสำหรับพืช ไม่ให้มากกว่า 20 ก. ของ  $O_2/(m^2 \cdot \text{วัน})$  สำหรับค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบ SFS ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลที่ควรทราบ	รายละเอียด
1. ชนิดของชั้นดิน	ควรเป็นดินประเภทที่ให้น้ำไหลซึมลงดินได้ช้า
2. เทคนิคการกระจายน้ำเสีย	ใช้หัวกระจายน้ำเสียหรือท่อเจาะรูด้านข้างเพื่อกระจายน้ำเสีย
3. ภาระปริมาณน้ำเข้า	5-18 ม./ปี
4. ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	20-66 $m^2 / (m^3 \cdot \text{วัน})$
5. ความต้องการพืชบนพื้นที่บำบัด	ต้องการพืชปลูกบนพื้นที่ลาดเอียงควรมีระบบ
6. ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ตกตะกอนขั้นต้นก่อนปล่อยลงบนพื้นที่และอาจเติมอากาศเล็กน้อยลงในน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าบึงประดิษฐ์ แต่ไม่ควรมีสาหร่ายในระบบบึง
7. ความลาดของพื้นที่บำบัด	น้อยกว่า 5%
8. การเก็บเกี่ยวพืชน้ำ	ไม่จำเป็นต้องทำ
9. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย	จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ C/N ว่ามีเพียงพอหรือไม่ โดยทั่วไปควรมีมากกว่า 2 ต่อ 1 จึงจะสามารถกำจัดสารไนโตรเจนได้
10. ค่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าระบบ	เมื่อเป็นพืชที่จุ่มในน้ำจะมีประมาณ 5-45 ก. ของ $O_2/(m^2 \cdot \text{วัน})$
11. ระบบป้องกันน้ำท่วม	ควรมีระบบป้องกันน้ำท่วมสำหรับบึงประดิษฐ์

ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539)

ตารางที่ 2.12 ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

พารามิเตอร์ที่ให้ออกแบบ	หน่วย	ระบบ SFS
- เวลาเก็บกัก (HRT)	วัน	4-15
- ระดับน้ำ	ม.	0.3-0.8
- อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์	กก./ (เฮกแตร์-วัน)	< 68
- อัตราภาระชดสสาร	$m^2 / (m^3 \cdot \text{วัน})$	0.014-0.047
- พื้นที่ผิวจำเพาะ	เฮกแตร์ / ( $10^3 / m^3 \cdot \text{วัน}$ )	2.14-7.16

ที่มา : Metcalf และ Eddy (1991)

### 3) โครงร่างของระบบ

โดยส่วนใหญ่โครงสร้างของระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน มีลักษณะและรายละเอียดต่างๆ เช่น ความลึกของน้ำและตัวกลาง ชนิดของตัวกลาง ความลาดชันของความลึก ระดับของการบำบัดในชั้นต้น และชนิดของพืช ในอดีตระบบน้ำไหลใต้ผิวดินส่วนใหญ่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง เป็น 10 : 1 หรือมากกว่า ในระบบน้ำไหลใต้ผิวดินจะมีความลึกของตัวกลาง ประมาณ 0.3-0.76 ม. และใช้ทราย กรวด หิน เป็นตัวกลาง พื้นที่ส่วนล่างมีความลาดชัน 0-1% ระดับน้ำควรจะต่ำกว่าพื้นผิวบนของตัวกลาง และสามารถควบคุมระดับน้ำได้ดีที่ทางออก (Reed และ Brown, 1992)

### 4) การบำบัดชั้นต้น

น้ำเสียที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน อย่างน้อยควรผ่านการบำบัดชั้นต้นมาก่อนแล้ว ซึ่งอาจจะผ่านบ่อเกรอะ ถึงตกตะกอน การบำบัดชั้นต้นแบบธรรมดา หรือถึงปฏิกิริยาไม่ใช้ออกซิเจนชั้นต้น ซึ่งจะมีประโยชน์ในการลดสารอินทรีย์ และจำนวนของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

## 2.4 ระบบระเหยน้ำ (evaporation system)

การกำจัดน้ำเสียโดยการระเหย เป็นวิธีการกำจัดน้ำเสียวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เมื่อน้ำเสียไม่สามารถระบายออกสู่แหล่งน้ำผิวดินได้ และไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการปล่อยซึมลงดินในบางกรณีซึ่งระบบระเหยนี้มีด้วยกันหลายประเภท

### 2.4.1 ระบบระเหย

ระบบระเหยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

#### 2.4.1.1 evapotranspiration beds

##### 1) evapotranspiration system (ET)

ระบบนี้เป็นระบบกำจัดน้ำเสียที่ทำโดยการระเหยสู่บรรยากาศ จะไม่มีการซึมของน้ำเสียลงสู่ดิน ซึ่งระบบนี้จะทำการขุดดินออกไป แล้วเอาทรายมาปูรองพื้น แล้ววางแผ่นพลาสติกกัน

ซึมซับ จากนั้นจะวางท่อกระจายน้ำเสียซึ่งจะเอากววมารอบๆเส้นท่อเพื่อช่วยในการกระจายน้ำเสียแล้วถมด้วยทรายทับอีกชั้น ซึ่งผิวหน้าของระบบนี้จะถมทับด้วยดินเดิม แล้วทำการปลูกพืชคลุมไว้ ซึ่งน้ำเสียจะเข้าสู่ระบบทางท่อกระจายน้ำเสีย แล้วจะไหลผ่านรูพรุนของดินและทรายขึ้นไปโดยอาศัยแรงดัน capillary แล้วน้ำเสียก็จะระเหยสู่บรรยากาศ และส่วนหนึ่งก็จะถูกรากของพืชดูดขึ้นมาไว้ แล้วระเหยสู่บรรยากาศทางใบพืช ระบบ ET นี้จะใช้ได้ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงและดินไม่ค่อยซึมซับ โดยที่ปริมาณน้ำเสียประมาณ 71 % จะถูกกำจัดไปโดยกระแสลมเหนือระบบ ส่วนปริมาณน้ำเสียอีก 21 % จะถูกกำจัดโดยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบนี้จะใช้ในกรณีที่ไม่สามารถปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และไม่สามารถปล่อยน้ำเสียทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และไม่สามารถให้น้ำเสียซึมลงดินได้

ซึ่งระบบกำจัดน้ำเสียระบบ evapotranspiration system นี้จะต้องพิจารณาองค์ประกอบหลายๆ ด้านด้วย ซึ่งได้แก่

- ค่าอัตราการระเหยของน้ำ (evaporation rate)

เป็นค่าอัตราการระเหยของน้ำ ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าค่าอัตราน้ำที่เข้าสู่ระบบ จึงจะทำให้สามารถสร้างระบบ evapotranspiration system ได้

- ค่าอัตราน้ำที่เข้าสู่ระบบ (precipitation rate)

เป็นค่าอัตราน้ำที่ตกลงมาเข้าสู่ระบบ evapotranspiration system ซึ่งส่วนมากจะเป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา

- ค่าตะกอนเกลือ (salt concentrations)

เป็นปริมาณสะสมของตะกอนเกลือ ซึ่งเกิดจากการที่น้ำระเหยไป เหลือแต่ตะกอนของสารต่างๆ ซึ่งจะมีมากในบริเวณผิวดิน แต่ตะกอนต่างๆนี้จะกระจายตัวอีกครั้งลงสู่ดินในฤดูฝน เนื่องจากมีน้ำฝนมาช่วยกระจายและชะล้างตะกอนต่างๆให้กระจายไป ซึ่งค่าตะกอนเกลือ นี้จะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อระบบ evapotranspiration system

- อุณหภูมิ (temperature)

เป็นค่าอุณหภูมิของอากาศที่มีผลต่อระบบการระเหยมากที่สุด ถ้าอุณหภูมิสูง การระเหยก็จะมีมากกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า

- ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)

เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศมีผลต่อการระเหยรองลงมาจากค่าอุณหภูมิ ถ้าในบรรยากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูง การระเหยก็จะเกิดขึ้นน้อยกว่าในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่า

- พลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation)

เป็นค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีผลต่อการระเหยน้อยกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์

- ความเร็วลม (wind speed)

เป็นค่าความเร็วลมในบรรยากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการระเหยน้อยที่สุด

- ชนิดของพืชที่ปลูกคลุมผิวดิน

พืชที่จะปลูกคลุมดินนั้นจะต้องมีลักษณะพิเศษ คือ ต้องสามารถทนต่อสภาพน้ำท่วมขังได้ เนื่องจากบางกรณีในช่วงฤดูฝนอาจจำเป็นต้องมีน้ำขังอยู่ในระบบเป็นบางเวลา และรากของพืชจะต้องไม่มีความยาวมากเกินไป เพราะรากของพืชอาจจะไปรบกวนระบบได้

2) Evapotranspiration/Absorption (ETA)

ระบบนี้คล้ายๆกับระบบ ET แต่จะต่างกันตรงที่จะให้น้ำเลียบบางส่วนซึมลงดิน โดยระบบนี้จะไม่ใช้แผ่นพลาสติกปูรองกันหลุม

#### 2.4.1.2 lagoon

เป็นระบบที่ใช้บ่อน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบนี้ใช้ในกรณีที่มีพื้นที่มากเพียงพอ เพราะใช้พื้นที่มาก

#### 2.4.1.3 mechanical

ระบบนี้ใช้เครื่องจักรกลในการระเหยน้ำเสีย โดยใช้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน



## 2.4.2 การระเหย

การระเหย (evaporation) คือการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวหรือของแข็งไปเป็นสถานะก๊าซ และแพร่สู่บรรยากาศ

### 2.4.2.1 กลไกการระเหย

ถ้าขยายหยดน้ำเล็กๆ ให้ใหญ่ขึ้น จะเห็นว่าโมเลกุลเหล่านั้นไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันทั้งหมด บางโมเลกุลจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าโมเลกุลอื่น พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า พลังงานจลน์ (kinetic energy) อุณหภูมิของน้ำหรือสารต่างๆ ก็เป็นการวัดพลังงานจลน์เฉลี่ยของสารนั้น หรือกล่าวได้ว่าอุณหภูมิคือค่าความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุล ถ้าเพิ่มพลังงานให้เท่ากับน้ำ โมเลกุลของน้ำก็จะเคลื่อนที่เร็ว และอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าเอาพลังงานออก โมเลกุลก็จะเคลื่อนที่ช้าลงและอุณหภูมิจึงลดลง

กระบวนการการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ผิวน้ำ โมเลกุลที่มีความเร็วพอเพียงและเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เหมาะสมจะหลุดออกจากผิวของเหลวเข้าสู่บรรยากาศ โมเลกุลเหล่านี้เปลี่ยนจากสถานะของเหลวไปเป็นไอในกระบวนการที่เรียกว่า “การระเหย” ขณะที่บางโมเลกุลหลุดออกจากของเหลวก็มีส่วนที่กลับเข้ามาจากสถานะไอเป็นของเหลว เรียกกระบวนการนี้ว่า “การควบแน่น” ดังนั้นที่ผิวของเหลวจะพบว่า มีโมเลกุลที่ระเหยไป (หนีออกไป) และที่ควบแน่น(กลับเข้ามา)

### 2.4.2.2 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการระเหย

การระเหยจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีปัจจัยต่อไปนี้

- 1) มีแหล่งน้ำ
- 2) มีแหล่งความร้อน ซึ่งอาจมาจาก
  - พลังงานแสงอาทิตย์,  $R_c$
  - จากกระแสอากาศ,  $H$
  - จากพื้นดิน,  $G$
  - จากพื้นน้ำ,  $R_s$

3) มีผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ผิวน้ำกับความดันไอน้ำในบรรยากาศเป็นบวก ( $e_s - e_d > 0$ )

### 2.4.2.3 องค์ประกอบที่ควบคุมการระเหยของน้ำ

อัตราการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

1) องค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่

- รังสีดวงอาทิตย์ แปรตามละติจูด ฤดูกาล เวลาของวัน และสภาพของท้องฟ้า

- ความดันไอน้ำ อัตราการระเหยของน้ำแปรตามค่าผลต่างระหว่างความดันไอน้ำของน้ำกับความดันไอน้ำของบรรยากาศเหนือผิวน้ำดังสมการของดาลตัน

$$E = f(u)(e_s - e_d) \quad (2.12)$$

โดยที่	E	=	ค่าอัตราการระเหย
	f(u)	=	ฟังก์ชันความเร็วลม
	$e_s$	=	ความดันไอน้ำที่ผิวน้ำ
	$e_d$	=	ความดันไอน้ำในบรรยากาศ ณ ความสูงหนึ่ง

ถ้าผลต่างของความดันไอน้ำมีค่าเป็นบวก การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นจนกระทั่งค่าผลต่างของไอน้ำมีค่าเป็นศูนย์การระเหยของน้ำก็จะหยุดลง

- อุณหภูมิของอากาศ เมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง โมเลกุลของไอน้ำก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เมื่อไอน้ำชนกับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศก็จะเป็นการชนแบบสะท้อนกลับ แต่เมื่ออากาศมีอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของไอน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เมื่อไอน้ำชนกับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศก็จะเป็นการชนแบบเกาะติด ทำให้อนุภาคในอากาศมีขนาดและมวลเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการชนขึ้นหลายครั้งก็จะกลายเป็นละอองน้ำขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศและตกลงสู่ผิวน้ำในที่สุดเมื่อมีมวลมากพอ ดังนั้นการที่อากาศมีอุณหภูมิต่ำ โอกาสที่โมเลกุลของน้ำในบรรยากาศจะกลับลงสู่ผิวน้ำจะมีมากขึ้น ทำให้อัตราการระเหยต่ำกว่าเมื่อมีอุณหภูมิสูง

- ลม คัดสมการของคาลตัน อัตราการระเหยแปรผันตรงกับฟังก์ชันของความเร็วลม โดยที่ลมจะทำให้เกิดความแปรปรวนของกระแสอากาศเหนือผิวน้ำ จึงเกิดการพาไอน้ำที่อยู่บริเวณผิวน้ำออกไปสู่บรรยากาศเร็วขึ้น ทำให้ความดันไอน้ำในบรรยากาศลดต่ำลง โมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำจึงมีโอกาสจะหลุดเข้าสู่บรรยากาศมากขึ้น นอกจากนี้ลมยังช่วยในการถ่ายเทพลังงานให้กับโมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำอีกด้วย

- ความกดของบรรยากาศ ในบริเวณที่มีความกดอากาศสูงจะมีโมเลกุลของอากาศอยู่หนาแน่น ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของน้ำที่หลุดเข้าสู่บรรยากาศจะชนกับโมเลกุลของอากาศและกลับเข้าสู่พื้นน้ำมากขึ้น

2) ลักษณะสมบัติของน้ำ

น้ำที่ถูกเจือปนจะมีความดันไอของน้ำนั้นลดลง เป็นผลให้การระเหยลดต่ำลง นอกจากนั้นความขุ่นและสีของน้ำเจือปนยังมีผลต่อการดูดกลืนและการสะท้อนพลังงานความร้อน ทำให้พลังงานและอุณหภูมิของแหล่งน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงไป อัตราการระเหยจึงเปลี่ยนไป

2.4.2.4 การคำนวณหาค่าการระเหยของน้ำ

การหาค่าน้ำระเหยไม่สามารถวัดได้โดยตรง ต้องหาโดยการคำนวณจากสมการต่าง ๆ ดังนี้

1) วิธีสมดุลของน้ำ

อาศัยหลักสมดุลน้ำ

$$\text{น้ำเข้า} = \text{น้ำออก}$$

$$I + P + \Delta S = O + O_g + E \tag{2.13}$$

โดยที่ E = ค่าน้ำระเหย  
 $\Delta S$  = การเปลี่ยนแปลงน้ำในการกักเก็บน้ำ  
 I = น้ำไหลเข้า

$$\begin{aligned}
 P &= \text{น้ำฝน} \\
 O &= \text{น้ำไหลออก} \\
 O_g &= \text{น้ำซึมออก}
 \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติมีข้อผิดพลาดในการวัดปริมาณน้ำไหลเข้า-ออกและมีการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำกักเก็บมาก ทำให้ได้ค่าการระเหยของน้ำที่ผิดพลาดและเวลาที่ใช้ในการหาน้ำระเหยควรจะใช้เวลาานพอที่จะทำให้ค่าการระเหยมีมากเมื่อเทียบกับพจน์อื่น ๆ

## 2) วิธีสมดุลของพลังงาน

อาศัยหลักการของกฎทรงพลังงานได้สมการ

$$R_n = H + G + LE + R_s + R_p + R_t \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 R_n &= \text{ปริมาณรังสีรวมที่ผิวน้ำได้รับ} \\
 &= R_c (1-r) - R_b \\
 R_c &= \text{ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์} \\
 r &= \text{อัตราการสะท้อนรังสีที่บรรยากาศ} \\
 R_b &= \text{ปริมาณรังสีที่สะท้อนกลับ ณ ผิวน้ำ} \\
 H &= \text{ความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศสู่ผิวน้ำ หรือในทิศทางตรงข้าม} \\
 G &= \text{ความร้อนที่เข้าสู่พื้นดิน} \\
 LE &= \text{ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนของเหลวให้กลายเป็นไอ โดยที่ L เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และ E เป็นค่าการระเหย} \\
 R_s &= \text{ความร้อนที่เก็บอยู่ในน้ำ} \\
 R_p &= \text{ความร้อนที่เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการสังเคราะห์แสง} \\
 R_t &= \text{ความร้อนที่เข้าหรือออกจากระบบโดยการไหลเข้า หรือออกจากรูน้ำ}
 \end{aligned}$$

ค่า  $R_p$  ไม่ค่อยนำมาใช้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า 1% ค่า  $R_s$  และ  $R_i$  สามารถหาได้ อุณหภูมิและปริมาตรของน้ำ ค่า  $G$  อาจนำมาคิดรวมกับ  $R_s$  ได้ ดังนั้นจึงแปรรูปสมการใหม่โดยใช้ ค่า  $R$  แทนค่า  $R_s - G - R_i$  และตัด  $R_p$  ออกจากสมการได้

$$R = H + LE \quad (2.15)$$

กำหนดอัตราส่วนของ Bowen ไว้ดังนี้

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{\rho C_p K_H \partial T / \partial z}{\rho L K_w \partial q / \partial z} \quad (2.17)$$

$$\beta = \frac{\gamma \Delta T}{\Delta q} \quad (2.18)$$

และจากสมการข้างบนจะได้

$$E = \frac{R}{L + (1 + \beta)} \quad (2.19)$$

$$E = \frac{R}{L [1 + \gamma(T_s - T_a)(e_s - e_d)]} \quad (2.20)$$

โดยที่  $C_p$  = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

$\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ

$T_s$  = อุณหภูมิที่ผิวน้ำ

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศ

$e_s$  = ความดันไอน้ำที่ผิวน้ำ

$e_d$  = ความดันไอน้ำจริงที่บรรยากาศ

$K_H$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$K_w$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทไอน้ำ

$q$  = ความชื้นจำเพาะ

## 3) วิธีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic approach)

อาศัยสมการของดาลตันสามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

$$E = f(u)(e_s - e_d) \quad (2.21)$$

ซึ่ง  $f(u)$  เป็นฟังก์ชันของความเร็วลมที่อยู่ในรูป  $a(1+bu)$  โดยที่  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงที่วัด  $e_d$  และ  $u$  และขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิวน้ำระเหย

ทฤษฎีพื้นฐานของสมการ คือการถ่ายเทไอน้ำจากผิวน้ำไปสู่บรรยากาศทำให้เกิดกระบวนการแปรปรวนซึ่งสามารถหาได้ในรูปของความเร็วลมและความดันไอน้ำ แล้วจึงแปลงเป็นค่าอัตราการระเหยด้วยความสัมพันธ์ในสมการของดาลตัน

## 4) วิธีสมระหว่างอากาศพลศาสตร์และสมการสมดุลพลังงาน

จะได้

$$E = \frac{R\Delta/L + e_a \gamma}{\Delta + \gamma} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } E &= f(u)(e_s - e_d) \\ e_a &= \text{ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่บรรยากาศ} \\ \text{และ } \Delta &= \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} \end{aligned} \quad (2.23)$$

โดยในการวิจัยนี้จะใช้วิธีสมดุลของน้ำมาคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำเสียของระบบที่ใช้ในการทดลองเพราะว่าสามารถหาข้อมูลได้ง่าย และเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าวิธีอื่น

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประดิษฐ์

#### Coleman และคณะ (2001)

ศึกษาผลของพืช 3 ชนิด (กกกลม, กกสามเหลี่ยม และธูปฤๅษี) ปลูกในแปลงทดลอง ขนาดเล็กรับน้ำเสียที่ถูกบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยแปรความลึกในการทดลอง 2 ค่า (45 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตร) และใช้การปลูกพืช 5 แบบ (ปลูกพืชชนิดเดียวในแปลง ปลูกพืชผสม 3 ชนิดเท่ากัน ในแปลงเดียว และไม่ปลูกพืช) แปลงทดลองถูกออกแบบให้เหมือนกับบึงประดิษฐ์ที่จะใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนใน Virginia ตะวันตก โดยน้ำเข้าที่อัตราการไหล 19 ลิตรต่อวันและความถี่ 3 วัน ต่อครั้ง น้ำเสียที่เข้าแปลงทดลองแต่ละแปลงจะถูกเก็บตัวอย่างทุกเดือนเพื่อหาค่าตัวแปรทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงร้อยละ 70 ทีเคเอ็นแอม โมเนีย และฟอสฟอรัสลดลงร้อยละ 50-60 ความลึกของชั้นกรวดมีผลเล็กน้อยต่อประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ แต่มีผลต่อการเจริญของธูปฤๅษี และ กกสามเหลี่ยม กรวดที่เตรียมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบเช่นกันประสิทธิภาพในการบำบัดและอัตราการเจริญของธูปฤๅษีดีกว่า กกสามเหลี่ยม และ กกกลม นอกจากนี้ยังพบว่าการปลูกพืช 3 ชนิดในแปลงเดียวกันมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่า การปลูกชนิดเดียว ธูปฤๅษีเจริญได้ดีกว่าในแปลงที่ปลูกผสม แต่อัตราการเจริญลดลงเมื่อธูปฤๅษีอยู่ ห่างจากจุดน้ำเข้าจนปริมาณปุ๋ยจำกัด

#### Thammarat และคณะ (2001)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใน แนวโค้งสำหรับบำบัดน้ำเสียจากห้องส้วมในบริเวณพื้นที่เขตร้อน ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลอง ระดับห้องปฏิบัติการจำนวน 3 ชั้นเป็นระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวโค้ง ซึ่งมีขนาด  $5 \times 5 \text{ m}^2$  ภายในบรรจุชั้นตัวกลางประกอบด้วยชั้นทราย 65 เซนติเมตร และชั้นกรวด ในชั้นล่างมีท่อระบาย น้ำเสียไปสู่ถังกรอง และในระบบจะทำการปลูกพืช กกกลม (*Thypha augustifolia*) ไว้ในระบบ การเดินระบบนั้นในช่วงเวลาปีแรกจะมี อัตราภาระของแข็งประมาณ 80-500 กิโลกรัม TS/ตารางเมตร-ปี โดยความถี่ 1-2 ครั้งต่อสัปดาห์ ปริมาณอัตราภาระของแข็งที่เหมาะสมในการทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งทั้งหมด, ซีไอดี และทีเคเอ็น เท่ากับ 80, 96 และ 92 ตามลำดับ ในระบบจะมี ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำจากห้องส้วมสูง การซึมผ่านของระบบจะไม่ค่อยลดลงเนื่องจากจะ เกิดการแพร่ไปที่ระบบรากและลำต้นในบริเวณชั้นดิน จากผลที่ได้ปฏิบัติการในตรีฟิเคชันที่เกิดใน ระบบจะเกิดจากกลไกการกรอง มีปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทประมาณ 120-250 มก./ล. ในขณะที่ปริมาณของไนเตรทในน้ำจากห้องส้วมที่ออกมา มีค่าต่ำกว่า 10 มก./ล. ในขณะที่มีการ

กรองเกิดขึ้นพีชในระบบจะทำการควบแน่นไว้โดยเฉพาะในฤดูแล้ง ในการดำเนินงานในปีที่ 2 จะมีระยะเวลาที่นำก่อนปล่อยออก จำนวน 2 และ 6 วันตามลำดับ แต่มีอัตราการระเหยของแข็งเท่ากับ 250 กิโลกรัม TS/ตารางเมตร-ปี ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นแล้วว่าประโยชน์ของระบบคือ จะเพิ่มการกำจัดไนโตรเจนเนื่องจากการกรองผ่านมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในระบบ ผลที่ได้คือมีปริมาณไนเตรท ประมาณ 20-50 มก./ล. สำหรับพื้นที่ที่ระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลลงในแนวตั้งต้องการมีค่าประมาณ 32.5 ตร.ม./1000 capita ซึ่งสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้สูงในการใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวตั้งบำบัดน้ำเสียจากห้องส้วมในบริเวณพื้นที่เขตร้อน

#### **Cooper และ Maseseneer (1998)**

ได้รายงานถึงการศึกษาในระบบไฮบริด ซึ่งเป็นการผสมผสานรวมเอาระบบที่มีการไหลในแนวนอน (Horizontal Flow : HF) และการไหลในแนวตั้ง (Vertical Flow : VF) เข้าด้วยกันซึ่งจากผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาสรุปได้ว่าระบบที่มีการไหลในแนวนอนนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและบีโอดี ส่วนระยะที่มีการไหลในแนวตั้งมีความสามารถสูงในการกำจัดบีโอดีที่อัตราการระบรทุกที่สูงกว่า อีกทั้งสามารถเกิดไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียในโตรเจน แต่มีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดของแข็งแขวนลอย เมื่อผสมผสานทั้งระบบการไหลในแนวนอนและแนวตั้งเข้าด้วยกันอย่างเหมาะสมจึงสามารถสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพสูงกำจัดได้ทั้ง บีโอดี ของแข็งแขวนลอย และเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์สามารถลดค่าไนเตรทและลดค่าไนโตรเจนให้ต่ำลง จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ของทางเลือกต่าง ๆ ในระบบผสมผสานนี้ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบตัวอย่างของระบบนี้ที่กำลังพิจารณาศึกษา คือ การออกแบบที่ Stoultton Hawbridge การออกแบบขั้นต้นคือ ใ้หวางระบบการไหลในแนวตั้งอยู่ลำดับแรก แล้วตามด้วยระบบการไหลในแนวนอน ซึ่งต่อมาให้ติดตั้งระบบการไหลในแนวตั้งอยู่ก่อนการไหลในแนวตั้งเพิ่ม รายละเอียดของระบบเบื้องต้นคือ มีระบบการไหลในแนวตั้ง 2 ชั้น การออกแบบระบบการไหลในแนวตั้งยึดเกณฑ์การออกแบบระบบของ Oaklands Park ซึ่งสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ ลดบีโอดีได้บางส่วน และเกิดไนตริฟิเคชันบางส่วน และการออกแบบระบบการไหลในแนวตั้งเพื่อเกิดไนตริฟิเคชัน ยึดเกณฑ์การออกแบบระบบของ WRC Medmenhans ที่มีการไหลในแนวตั้ง 2 แปลง เป็นระบบบำบัดขั้นที่ 3 เพื่อเกิดไนตริฟิเคชัน

#### **House และคณะ (1996)**

ได้ทำการศึกษาในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งรวมแบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวนอนและแนวตั้ง (Vertical - Horizontal Subsurface Flow) เพื่อทดสอบหาความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสีย ซึ่งอัตราของน้ำเสียเข้าระบบมีค่า 15 และ 140 ลิตร/วัน โดย



ติดตั้งระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวคิ่งเป็นจำนวน 2 บ่อ มีขนาดกว้าง 9.1 ม. ยาว 13.7 ม. และลึก 0.6 ม. ภายในบรรจุด้วยตัวกลางคือ ทรายหยาบ และกรวด ปลูกด้วยกกกลม (*Juncus effusus*) ปล่อยน้ำเข้าระบบ 3-4 ครั้ง/วัน มีค่าภาระทางชลศาสตร์ 40 ล./ (ม.<sup>2</sup> - วัน) จนถึง 120 ล./ (ม.<sup>2</sup> - วัน) เพื่อความแน่ใจในการเกิดไนตริฟิเคชัน จึงเพิ่มระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวอนเป็นจำนวน 2 บ่อ มีขนาดกว้าง 9.8 ม. ยาว 13.7 ม. และลึก 0.6 ม. ซึ่งภายในบรรจุด้วยตัวกลาง คือ กรวด ปลูกด้วยกกสามเหลี่ยม (*Scirpus calidus*) โดยออกแบบให้มีเวลาเก็บกัก 5-7 วัน เพื่อช่วยเสริมการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ใช้อิฐหักซึ่งมีปริมาณเหล็กสูงเป็นตัวกรองสารตั้งต้นในชั้นล่าง เพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัส การดำเนินการโดยผ่านน้ำเสียเข้าระบบการไหลในแนวคิ่งก่อน น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วบางส่วนถูกสูบบำบัดในระบบการไหลในแนวอน หรือถูกส่งหมุนเวียนกลับไปยังบ่อเกรอะ เพื่อช่วยเสริมในการบำบัดไนโตรเจนผลการศึกษาพบว่า ระบบน้ำสามารถลดปริมาณไนโตรเจนรวมได้ 75% และลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนได้ถึง 98.5% แสดงถึงการเกิดไนตริฟิเคชันที่เกือบจะสมบูรณ์ ระบบสามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสรวมได้ดีในช่วงปีแรกของการดำเนินการแต่จะลดลงในปีต่อมา ซึ่งควรมีการปรับปรุงค่า ปริมาณน้ำเข้าต่อจำนวนรอบของการสูบน้ำ และเพิ่มช่วงเวลาระหว่างรอบการสูบน้ำเข้าเพื่อเสริมประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกรองปริมาณเหล็กสูงที่ใช้ให้ดียิ่งขึ้น ระบบสามารถกำจัดสารแขวนลอยทั้งหมดได้ 55% และบีโอดี 97% สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยเพื่อขึ้นจาก 16% ในปีแรก ไปเป็น 96% ในปีที่ 4 ได้

#### Laber และคณะ (1996)

ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวคิ่ง โดยทดลองใช้ระบบ 2 แบบ เพื่อช่วยเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้น คือ ระบบ A ซึ่งเป็นบึงประดิษฐ์บ่อเดียว ส่วนระบบ B เป็นบึงประดิษฐ์ 2 บ่อ ติดตั้งต่อเนื่องกัน การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนเปรียบเทียบกัน โดยขั้นตอนแรกต้องรักษาสภาพของตัวกลางไม่ให้ห่อตัว (มีระดับน้ำในตัวกลางต่ำ) และให้น้ำเข้าระบบ 4 ครั้ง/วัน มีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหมุนเวียนกลับไปยังถังตกตะกอน น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Nitrified Effluent) ผสมกับน้ำเสียที่เข้าระบบ ซึ่งมีสารประกอบคาร์บอนที่จำเป็นต่อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียและมีสภาพแอนน็อกซิกในถังตกตะกอน อัตราการหมุนเวียนในขั้นแรกมีค่า 50-60% ของปริมาณน้ำออก ขั้นที่สองดำเนินการเหมือนขั้นแรก แต่เพิ่มอัตราการหมุนเวียนเป็น 80% เพื่อให้เกิดสภาพห่อตัวของชั้นตัวกลางเสริมการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ระดับน้ำในชั้นตัวกลางสูงขึ้น 0-20 ซม. ส่วนการทำงานของระบบ B มีค่าออกแบบ 5 ม.<sup>2</sup> / สมมูลประชากร และปริมาณน้ำเข้าระบบมี สมมูลประชากรเท่ากับ 8 เป็นการไหลแนวคิ่งผ่านชั้นตัวกลางที่มีความลึก 60 ซม. ทั้ง 2 บ่อ ชั้นตัวกลางประกอบไปด้วยทรายและกรวดผสมกัน มีขนาด 1 - 4 มม. ปลูกด้วยต้นอ้อและมี

ระบบบำบัดขั้นต้นคือถังตกตะกอน 3 ม.<sup>3</sup> โดยบ่อแรกรักษาไม่ให้เกิดสภาพอึดตัวของชั้นตัวกลาง และให้น้ำแก่ระบบ 4 ครั้ง/วัน ส่วนบ่อที่ 2 ซึ่งติดตั้งต่อเนื่องกันแบบอนุกรม จัดให้มีสภาพอึดตัวของชั้นตัวกลาง (ระดับน้ำในชั้นตัวกลางสูง) เพื่อให้เกิดสภาพไร้อากาศ เสริมปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันในบ่อที่ 2 มีการเติมแหล่งคาร์บอนภายนอกคือ เมทานอล 4 ครั้ง/วัน ระบบ B ได้ทดสอบการให้น้ำแบบต่างๆ 3 แบบ คือ แบบครึ่งคราว แบบต่อเนื่อง และแบบทีละเท

ผลการศึกษาพบว่า สำหรับระบบ A และ B เปรียบเทียบกันพบว่า ระบบ B ที่มีการให้น้ำแบบครึ่งคราว มีประสิทธิภาพสูงสุดแสดงถึงการเกิดปฏิริยาดีไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่าทั้งการหมุนเวียนและการเติมเมทานอล แสดงถึงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ในการเกิดปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปยังถังตกตะกอนสามารถดำเนินการได้โดยมีค่าใช้จ่ายและบำรุงรักษาระบบต่ำ ซึ่งเหมาะกับครัวเรือนและชุมชนขนาดเล็ก ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี และอินทรีย์คาร์บอนรวมสามารถกำจัดได้ดีเช่นกัน J. Vymazal และคณะ. (1998) ได้แนะนำอัตราการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 50-100%

#### Platzer (1996)

ได้ทำการศึกษาระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งเป็นแบบน้ำไหลได้ผิวดิน โดยประกอบไปด้วยบึงประดิษฐ์ 2 บ่อ บ่อแรกเป็นชนิดน้ำไหลแนวตั้ง (VFB<sub>s</sub>) ตามด้วยบ่อที่ 2 เป็นชนิดน้ำไหลแนวนอน (HFB<sub>s</sub>) จุดประสงค์ของการศึกษาเพื่อเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 5°C ในตริฟิเคชัน จะถูกจำกัด อัตราการกำจัดเฉลี่ยคือ 35% (Me) และ 45% (Li) ส่วนการกำจัดไนโตรเจนในโตรเจนรวมเฉลี่ยมีค่า 30% ในทั้งสองแห่ง ผลการทดลองในบ่อน้ำไหลในแนวตั้ง แสดงการเกิดไนตริฟิเคชัน ในอัตราสูงเมื่อค่าทีเคเอ็นต่ำกว่า 6.5ก./ม.<sup>2</sup>.วัน) และเมื่ออุณหภูมิในน้ำออกสูงกว่า 10°C อัตราไนตริฟิเคชันที่ Li สูงกว่า Me อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสิ่งที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดของทั้ง 2 แห่ง คือ ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และภาระทางชีวศาสตร์ที่สูงกว่าของ Li ในตริฟิเคชันถูกจำกัดเมื่อเกิดการอุดตันของระบบ ดังนั้นค่าภาระทาง ชลศาสตร์และไนตริฟิเคชันจึงไม่ใช่เป็นตัวแปรวิกฤติที่เกี่ยวกับขีดความสามารถสูงสุดในบ่อน้ำไหลในแนวตั้ง สิ่งที่ควรพิจารณาและรักษา คือ ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน ภาระบรรทุกและรอบการหมุนเวียนน้ำ สำหรับดีไนตริฟิเคชันในบ่อน้ำไหลในแนวตั้ง กรณีที่มีความต้องการการกำจัดไนโตรเจนสูง ต้องมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปยังระบบบำบัดขั้นต้น เพื่อให้เกิดพรี-ดีไนตริฟิเคชัน (pre-denitrification) ค่าภาระเจดาลไนโตรเจนออกแบบอยู่ในช่วง 2-5 ก./ม.<sup>2</sup>.วัน) ซึ่งทำให้ระบบบำบัดมีราคาต่ำและง่ายในการกำจัดไนโตรเจน เมื่อน้ำเข้ามีความเข้มข้นสูงจึงใช้ บ่อน้ำไหลในแนวนอนเป็นระบบบำบัดขั้นต้น

สอง เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากของการนำน้ำหมุนเวียนกลับไป ซึ่งในกรณีนี้ บ่อน้ำไหลในแนวนอนเป็นโพสต์-ดีไนตริฟิเคชัน (post-denitrification) โดยปราศจากแหล่งคาร์บอนภายนอก ผลการทดลองในบ่อน้ำไหลในแนวนอนพบว่ามีการกำจัดไนโตรเจนรวม ได้ 45-80% ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ

#### เกียรติศักดิ์ ปิงกุล (2546)

การวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินแบบไหลขึ้นตามด้วยแบบไหลลง ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่แตกต่างกันคือ 5,10,15 และ 20 ซม./วัน ในการทดลองนี้ใช้บ่อทดลอง 2 บ่อ แต่ละบ่อรองรับพื้นที่ผืนพีวีซีกันน้ำซึมผ่านบรรจุด้วยกรวดหยาบและทรายในบ่อที่มีน้ำไหลขึ้นทำการปลูกต้นธูปฤาษี ส่วนบ่อที่มีน้ำไหลลงปลูกต้นกกกรังกา น้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่อง โดยสูบน้ำเข้าสู่บ่อที่มีน้ำไหลขึ้นแล้วไหลลง และมีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่บ่อที่มีน้ำไหลขึ้นในอัตราการหมุนเวียน 100 %

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 5 ซม./วัน โดยสามารถกำจัดไนโตรเจนรวมได้ 63.7 % และกำจัดซีโอดีได้ 74 % ซึ่งพบว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในบ่อที่มีน้ำไหลขึ้นและเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในบ่อที่มีน้ำไหลลงอย่างชัดเจน ส่วนอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ไม่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสรวม และของแข็งแขวนลอย ในการทดลองนี้ต้นธูปฤาษีสามารถสะสมไนโตรเจนได้ 0.5 -3.8 % ของไนโตรเจนรวม ที่เข้าสู่บ่อที่มีน้ำไหลขึ้น และต้นกกกรังกาสามารถสะสมไนโตรเจนได้ 0.4-3.7 % ของไนโตรเจนรวมที่เข้าสู่บ่อที่มีน้ำไหลลง

#### ภิญญา เนียมคำ (2545)

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียมูลสุกร โดยระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวตั้งปลูกด้วยต้นกกกรังกา อยู่เหนือถัง กรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน การทดลองนี้ใช้แบบจำลองระดับ ห้องปฏิบัติการขนาดกว้าง 1.2 ม. ยาว 1.2 ม. และสูง 1.2 ม. โดยสูบน้ำเสียเข้า ระบบแบบครั้งคราวคือ ทำงาน 4 ชม. และหยุด 4 ชม. สลับกันไปอัตราการไหล ของน้ำ 4.5 ล./ชม. โดยแปรเปลี่ยนอัตราการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบที่ 0 50 100 และ 200% เพื่อหาอัตราการหมุนเวียนที่ทำให้มีการกำจัดไนโตรเจน ได้สูงสุด ผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบสามารถลดปริมาณ ไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีขึ้น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดจาก 314.6 มก./ล. ลดลงเหลือ 21.9 มก./ล เท่ากับประสิทธิภาพการกำจัด 93.0% ที่ อัตราการหมุนเวียนน้ำ 100% และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 7.5 ซม./วัน ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวตั้ง โดยมีปริมาณ ออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

จาก 0.8 มก./ล. เป็น 81.7 มก./ล สามารถกำจัด ซีโอดีจาก 2,008.0 มก./ล เหลือ 51.1 มก./ล คิดเป็น ประสิทธิภาพการกำจัด 97.5% และกำจัดเจดาลไนโตรเจนจาก 313.8 มก./ล เหลือ 7.8 มก./ล คิดเป็น ประสิทธิภาพการกำจัด 97.5% ในส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน สามารถลด ค่าซีโอดีได้เพิ่มขึ้น และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้อย่าง น่าพอใจ

### โสมนัส สมประเสริฐ (2545)

การวิจัยนี้เปรียบเทียบการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยพืช 2 ชนิด คือ ฐูปถุณีและกกสามเหลี่ยมในระบบบึงประดิษฐ์ในระบบที่มีการไหลในแนวตั้งวางอยู่เหนือถังกรอง ทรายที่มีการไหลในแนวราบโดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน การทดลองนี้ใช้ถังคอนกรีต 2 ถัง แต่ละถังแบ่งเป็น 2 ชั้นกั้นด้วยแผ่นพีวีซีกั้นน้ำซึมผ่านชั้นล่างเป็นถังกรองทรายชั้นบนเป็นบึง ประดิษฐ์ที่บรรจุด้วยทรายและกรวด ชั้นบนของถังหนึ่งปลูกฐูปถุณี ส่วนอีกถังหนึ่งปลูกกก สามเหลี่ยม น้ำเสียถูกป้อนเข้าถังแบบเป็นครั้งคราว คือป้อนน้ำ 4 ชั่วโมง และหยุด 4 ชั่วโมง สลับกันไปโดยสูบเข้าชั้นล่างของถังหลังจากนั้นจึงสูบน้ำขึ้นชั้นบน น้ำที่ออกจากชั้นบนจะถูก หมุนเวียนเข้าสู่ชั้นล่างอีก ครั้งในอัตราการหมุนเวียน 100 % การทดลองมีการแปรผันอัตราการระ ปรทุกทางชลศาสตร์ 3 ค่า คือ 3,6 และ 12 ซม./วัน

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดที่อัตราการระปรทุกทางชล ศาสตร์ 3 ซม./วัน โดยถังที่ปลูกฐูปถุณีมีประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนดีกว่าถังที่ปลูกกก สามเหลี่ยมคือ 85 % และ 75% ตามลำดับ ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้ดีมากในส่วนของถัง กรองทรายโดยลดออกซิโดซ์ไนโตรเจนและซีโอดีได้ 95-99 % และ 62-72 % ตามลำดับและพบว่ามี การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในส่วนของบึงประดิษฐ์โดยสามารถลดเจดาลไนโตรเจนได้ 52-98 % ในการทดลองนี้ฐูปถุณีและกกสามเหลี่ยมสะสมไนโตรเจนคิดเป็น 0.3-3 % และ 0.2-4 % ของ ไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบตามลำดับ

### งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบการระเหย

#### Arif (1987)

ได้ทำการศึกษาหาว่าการประเมินค่า reference crop evapotranspiration วิธีใดมี ความถูกต้องมากที่สุดจากหลายวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในการศึกษานี้จะพิจารณา 5 วิธีการ ประเมินค่า  $ET_0$  ซึ่งจะใช้อ้างอิงจากกรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทยในช่วงเวลา 10 ปี (ค.ศ. 1974-1983) จากการศึกษาที่พบวิธีของ Penmen จะใช้ค่า  $ET_0$  ที่ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด โดย พิจารณาถึงสภาพภูมิอากาศต่างๆด้วย และการศึกษาที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย

มาก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมมาก ซึ่งแต่ละวิธีก็ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในพื้นที่นั้นๆว่าเหมาะสมว่าจะใช้วิธีใดในการประเมินค่า Eto

#### **Syaranamual (1986)**

ได้ทำการศึกษาที่พยายามจะหาวิธีที่จะประมาณค่าค่า reference crop evapotranspiration ETo (4 วิธีของ FAO และวิธีของ Jensen-Haise ) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบค่า ETo ซึ่งประมาณค่าโดยวิธีการของ Penmen ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันและเชื่อถือว่าเป็นการประมาณค่า ETo ที่ดีที่สุด การศึกษานี้ได้แสดงว่าประเทศไทยถูกแบ่งเป็น 5 บริเวณตามลักษณะของการประมาณค่า ETo โดยวิธีของ Penmen และการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนซึ่งข้อมูลได้มาจากการติดตามของ 20 สถานี การประมาณค่า ETo โดยวิธี pan evaporation และวิธีของ Jensen-Haise นั้นจะได้ผลดีที่สุดในช่วงฤดูร้อน วิธี Radiation และวิธีของ Jensen-Haise จะได้ผลดีที่สุดในช่วงฤดูฝน วิธี radiation และวิธีของ Jensen-Haise จะสอดคล้องกับวิธีของ Penmen วิธี Radiation จะมีค่า ETo ที่ใกล้เคียงมากที่สุดสำหรับทุกพื้นที่ในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน

#### **Hussain (1985)**

ได้ทำการศึกษาที่จะพยายามหาวิธีที่สะดวกที่สุดในการประเมินค่า reference crop evapotranspiration (ETo) โดยคำนึงถึงข้อมูลเกี่ยวกับภูมิอากาศ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อประเทศไทย ซึ่งวิธีต่างๆในการหาค่า ETo จะถูกเปรียบเทียบกับค่า observed ETo ซึ่งได้มาจากอัตราส่วนระหว่าง crop evapotranspiration ( ETc ) กับค่า crop coefficient ( Kc ) การประเมินค่าจะต่างกันในกรณีที่ค่า ETo observed ได้มาต่างกัน ซึ่งวิธีที่เหมาะสมนั้นก็จะต้องดูจากจากความเกี่ยวข้องของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกัน จากการศึกษาพบการประเมินค่า ETo โดยวิธีต่างๆจะได้ค่าใกล้เคียงกัน แต่วิธีของ Penmen จะดีที่สุดสำหรับพื้นที่ต่ำ แต่สำหรับที่สูงนั้นการใช้วิธี Pan evaporation จะดีที่สุดในการประมาณค่า ETo ซึ่งค่า ETo นี้จะขึ้นอยู่กับค่าต่างๆทางภูมิอากาศด้วย

#### **Juntharsri (1977)**

ได้ทำการศึกษาค่า potential evapotranspiration (PET) ซึ่งคำนวณมาจากสมการของ Penman , Ivanov , Papadakis , Jensen-Haise , Christiansen-Hargreaves , Truc , Thornwaite และ Blany-Criddle ซึ่งอ้างอิงจากค่า mean monthly meteorological data สำหรับ 16 สถานีของ อุตุนิยมหาวิทยาลัยในประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ.1965 –1975 การคำนวณค่า PET ของแต่ละสถานีและพื้นที่นั้นจะเกี่ยวข้องกับการวัดค่า pan evaporation โดยวิธี U.S. Class-A โดยใช้สมการถดถอย

ในช่วงอากาศเปียก (เมษายน-กรกฎาคม) และตลอดทั้งปี (มกราคม-ธันวาคม) จากสมการถดถอยนี้ แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่า PET จากสมการของ Penmen จะใช้ค่า correlation coefficient สูงสุด และค่า standad error ต่ำสุดในการประมาณค่า การศึกษาในครั้งนี้จะใช้ความสัมพันธ์ของสมการของ Penmen สำหรับการหาค่า pen evaporation โดยวิธี U.S Class-A สำหรับการหาค่า PET โดยสมการของ Penmen นี้ใช้ในการออกแบบระบบ irrigation ในระดับท้องถิ่น

#### จิรวัตร จิรจรรยาเวช (2546)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบกำจัดน้ำเสียแบบก่อสร้างอยู่กับแหล่งกำเนิดด้วยกระบวนการซึมลงดินและการระเหยโดยใช้พืช โดยทำการศึกษาอัตราการซึมน้ำของดิน อัตราการระเหยน้ำ อัตราการระเหยน้ำของพืช ความเหมาะสมในการใช้งานของระบบ และเกณฑ์การออกแบบระบบกำจัดน้ำเสีย

ผลการศึกษาพบว่าอัตราการใช้น้ำประปาเท่ากับ 192 ลิตร/คน-วัน น้ำเสียที่ออกจากบ่อเกรอะจากบ้านพักอาศัยมีพีเอช 6.59 มก./ล., บีโอดี 181 มก./ล., ของแข็งแขวนลอย 64 มก./ล., ทีเคเอ็น 20 มก./ล., ไนมันและน้ำมัน 34 มก./ล. และซัลไฟด์ 3.4 มก./ล. ระบบ evapotranspiration system มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า บีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ทีเคเอ็น, ไนมันและน้ำมัน และซัลไฟด์ เท่ากับร้อยละ 46, 77, 49, 25 และ 53 ตามลำดับโดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำจากผิวดินประมาณ 0.5 เมตร อัตราการซึมน้ำของดินเท่ากับ 38 นาทีต่อเซนติเมตร อัตราการระเหยน้ำอยู่ในช่วง 1.5-3.6 มิลลิเมตรต่อวัน อัตราการดูดซึมน้ำไปใช้ของต้นเข็มอยู่ในช่วง 2.7-3.4 มิลลิเมตรต่อวัน ค่า evapotranspiration rate ของระบบมีค่าประมาณ 5.1 มิลลิเมตรต่อวัน ทำให้ระบบ evapotranspiration system สามารถกำจัดน้ำเสียได้ประมาณ 6 ล./ตร.ม.-วัน

#### สุประพล วัตตะสิริชัย (2542)

ได้ทำการศึกษาการวัดอัตราการระเหยจากถาดวัดการระเหยแบบ เอ สามารถนำมาใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณจัดสรรน้ำของโครงการชลประทาน จึงได้ทำการศึกษาวิธีการพยากรณ์อัตราการระเหยจากถาดวัดการระเหยแบบ เอ โดยใช้พื้นที่บริเวณลุ่มน้ำมูลตอนบนเป็นกรณีศึกษา จากการศึกษาวิธีการพยากรณ์อัตราการระเหยรายสัปดาห์โดยวิธีการทางสถิติคลาสสิกในรูปแบบของแบบจำลอง autoregressive (AR) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง AR ลำดับที่ 2 ที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลามีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ได้ดี โดยจากการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราการระเหยจริงกับค่าพยากรณ์ทางสถิติ Z-test จำนวน 20 ชุดข้อมูล พบว่ายอมรับค่าพยากรณ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จำนวน 17 ชุดข้อมูล และยอมรับค่าพยากรณ์ในระดับนัยสำคัญ 0.025 ,0.01 ,0.005 จำนวน 3 ชุดข้อมูลตามลำดับ และเมื่อทำการทดสอบการพยากรณ์ข้อมูลในระยะสั้น (1 สัปดาห์

ล่งหน้า) พบว่าค่าพยากรณ์ใกล้เคียงค่าจริงกว่าการพยากรณ์ในระยะยาว (1 ฤดูกาลล่งหน้า) ในขณะที่เดียวกันได้ทำการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของถดถอยการระเหยแบบ เอ(Kp) กับค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแปลงอัตราการระเหยจากถดถอยการระเหยแบบ เอ เป็นอัตราการระเหยจากอ่างเก็บน้ำ (Kress) ซึ่งผลการทดลองวัดค่าปริมาณการใช้น้ำของหญ้าเทียบกับอัตราการระเหยจากถดถอยพบว่าค่า Kp มีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 ถึง 0.97 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.78 ( $r = 0.28$ ) หรือ  $E_{tp} = 0.2237 E_{pan} + 2.8098$  ( $r = 0.84$ ) และผลการทดลองวัดค่า Kress พบว่า Kress มีค่าเท่ากับ 0.78 ( $r = 0.89$ ) หรือ  $E_{pan} - 0.7098$  ( $r = 0.98$ )

### สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยที่สามารถนำระบบบึงประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและใช้งานร่วมกับระบบการระเหยโดยพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานมีประสิทธิภาพในการบำบัดในโตรเจนมากกว่าการใช้บึงประดิษฐ์แบบที่มีการไหลในแนวตั้งหรือแนวนอนเพียงอย่างเดียว ส่วนระบบการระเหยเหมาะสำหรับใช้ในเมืองไทยเพราะว่าเมืองไทยมีอากาศที่ค่อนข้างร้อนซึ่งทำให้อัตราการระเหยน้ำเสียออกจากระบบมีปริมาณที่มากกว่าบริเวณที่มีอากาศเย็นกว่า โดยที่อุณหภูมิของอากาศที่มีค่าสูงจะสามารถระเหยน้ำออกจากระบบได้มากกว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

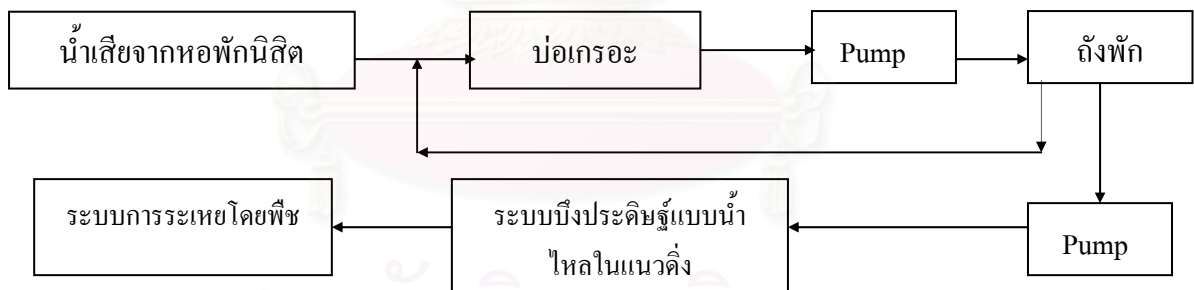
### บทที่ 3

#### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยทำโดยใช้น้ำเสียจากหอพักนิสิตหญิง(เฟื่องฟ้า)จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะ โดยทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

##### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินใน แนวโค้งที่ปลูกต้นก้ามกุ้งโดยตัวกลางที่ใช้เป็นกรวดหยาบขนาด 1-2 ซม. และทรายขนาด 1-2 มม. ส่วนระบบการระเหยโดยพืชทำการปลูกต้นเข็ม โดยตัวกลางที่ใช้คือกรวดหยาบขนาด 2-2.5 ซม. และทรายขนาด 1-2 มม. ใช้ทดลองบำบัดน้ำเสียจากหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงผังการไหลของน้ำเสีย ในรูปที่ 3.1

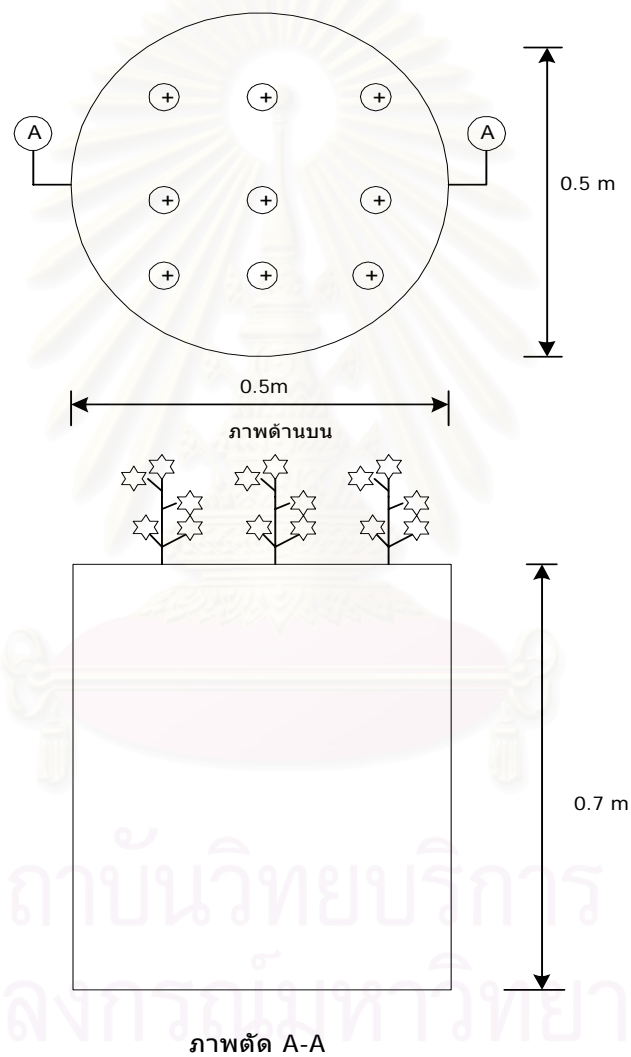


รูปที่ 3.1 ผังการไหลของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวโค้งตามด้วยระบบระเหยโดยพืช



### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 บึงประดิษฐ์ ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวตั้ง โดยใช้ถังพลาสติกกลมจำนวน 1 ถังแต่ละถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร สูง 0.7 เมตร มีลักษณะการไหลในแนวตั้ง ดังแสดงรายละเอียดรูปแบบแปลนด้านบนซึ่งแสดงตำแหน่งของการปลูกพืชและภาพตัดดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

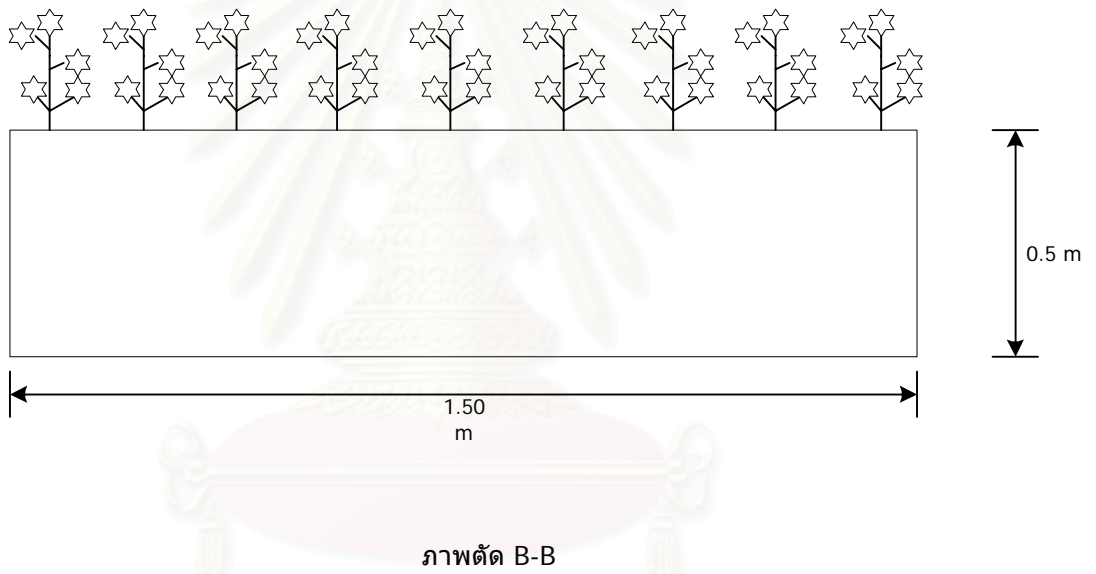
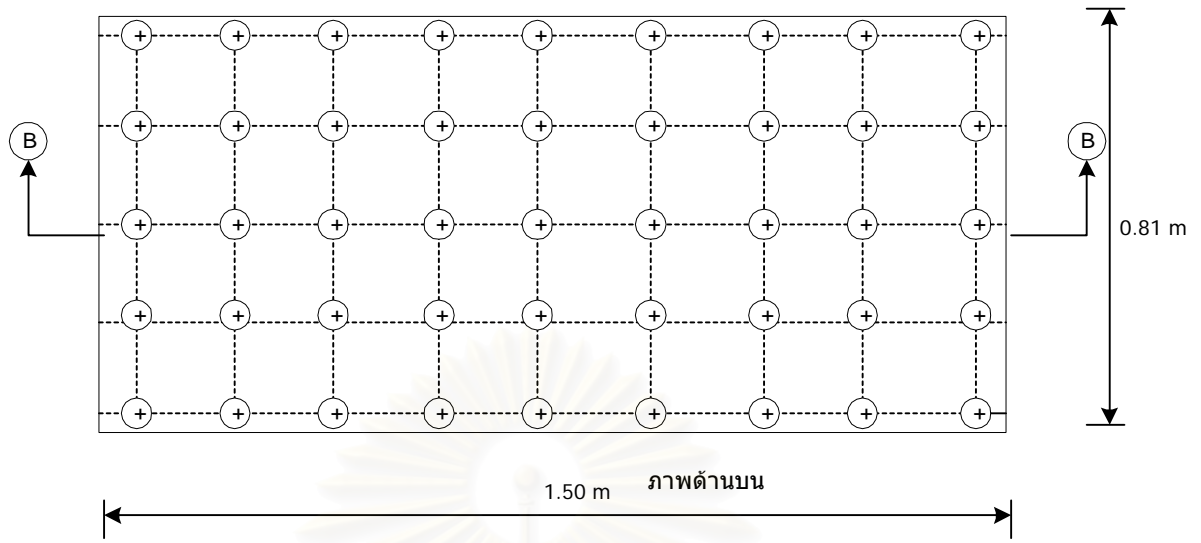


รูปที่ 3.2 ขนาดของถังที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง



รูปที่ 3.3 ถังที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง

**3.2.2 ระบบการระเหยโดยพืช** ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้กระบะพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด กว้าง 0.81 เมตร ยาว 1.50 เมตร ลึก 0.5 เมตร จำนวน 2 ถัง ดังแสดงรายละเอียดของถังแบบจำลอง แพลนด้านบนซึ่งแสดงตำแหน่งของการปลูกพืชและภาพตัด ในรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ขนาดของถังที่ใช้ในระบบการระเหยโดยพืชม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ถังที่ใช้ในระบบการระเหยโดยพืช

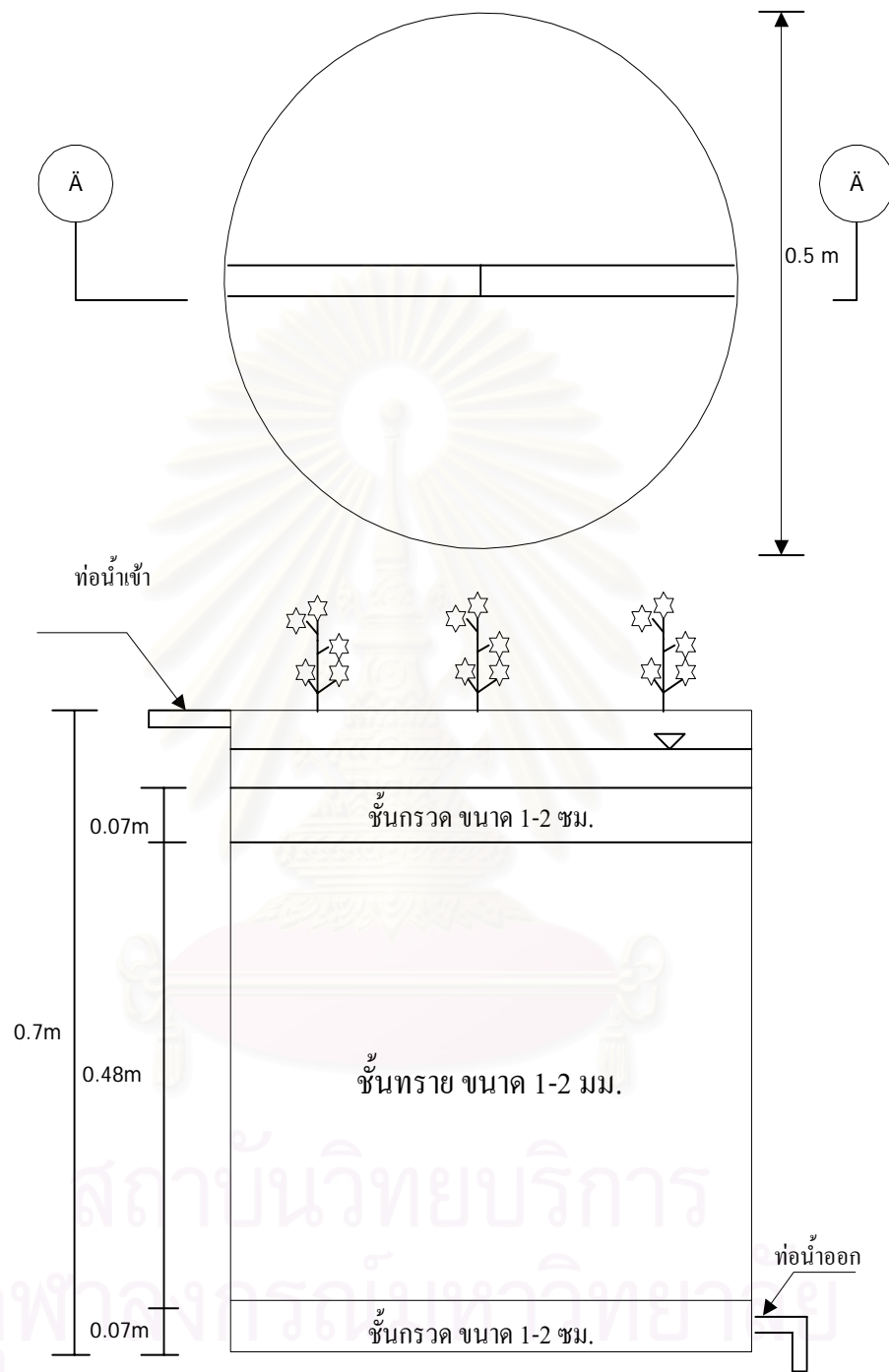
### 3.2.3 ตัวกลาง ที่ใช้ประกอบด้วย

#### 3.2.3.1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง

มีชั้นตัวกลางเรียงจากล่างขึ้นบน ประกอบด้วย ทรายขนาด 1-2 ซม.หนา 0.07 เมตร เพื่อรวบรวมน้ำออกต่อนั้นเป็นชั้นตัวกลางทรายหยาบ ขนาด 1-2 มม.หนา 0.48 เมตร และปิดทับด้วยชั้นกรวดขนาด 1-2 ซม. หนา 0.07 เมตร เพื่อช่วยกระจายน้ำที่เข้าสู่ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

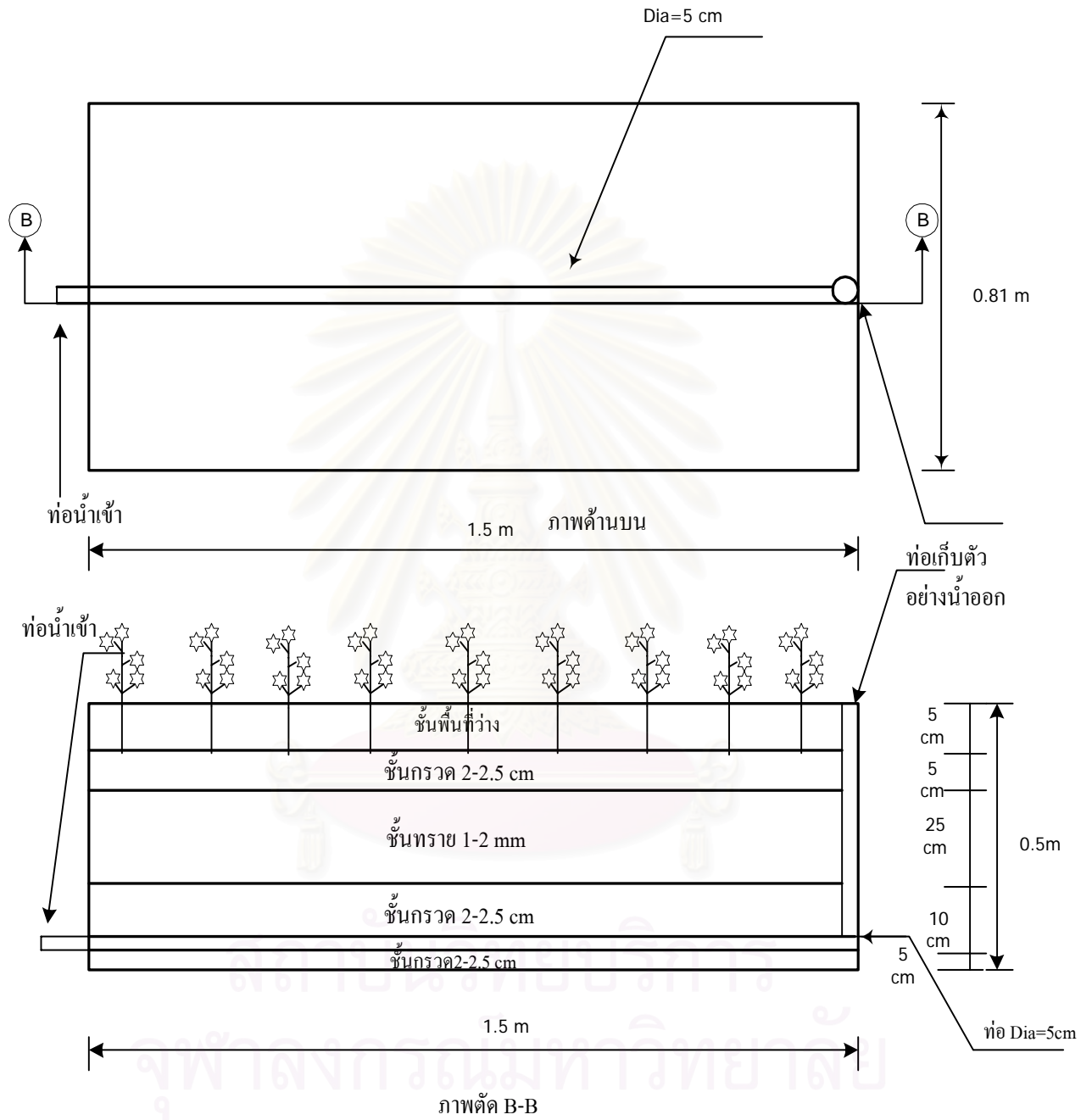
#### 3.2.3.2 ระบบการระเหยโดยพืช

ชั้นตัวกลางเรียงตัวจากล่างขึ้นบนประกอบด้วย กรวด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-2.5 ซม. ลงไปในกระบะพลาสติกให้สูงขึ้นมาจากก้นกระบะพลาสติกประมาณ 5 ซม. แล้วเทกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-2.5 ซม. จนมีความสูงขึ้นมาจากก้นกระบะพลาสติกประมาณ 15 เซนติเมตร เพื่อช่วยในการกระจายน้ำ แล้วจึงเททรายละเอียดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 มม. ลงไปในกระบะพลาสติกจนชั้นทรายมีความหนา 25 ซม. ปิดทับด้วยชั้นกรวดหนา 5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.7



ภาพตัด A-A

รูปที่ 3.6 ภาพตัดถึงแบบจำลองที่มีการไหลในแนวตั้ง



รูปที่ 3.7 ภาพตัดถังแบบจำลองระบบการระเหยโดยพืช

### 3.2.4 ระบบท่อ

#### 3.2.4.1 ถังที่มีการไหลในแนวตั้ง

ท่อน้ำเข้าเป็นท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3/4$  นิ้ว เจาะรูขนาด 0.5 ซม. โดยเว้นระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูที่เจาะเท่ากับ 2 ซม. วางอยู่ด้านบนใกล้ผิวของตัวกลางปล่อยให้ให้น้ำไหลลงสู่ส่วนบน ส่วนที่รับน้ำออกเป็นท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3/4$  นิ้ว เจาะรูขนาด 0.5 ซม. โดยเว้นระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูที่เจาะเท่ากับ 2 ซม. วางไว้บนชั้นกรวดด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.6

#### 3.2.4.2 ระบบที่มีการระเหยโดยพืช

ทำการวางท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. เจาะรูขนาด 1 ซม. และระยะห่างแต่ละรู เท่ากับ 10 ซม. ตามแนวเส้นท่อ ลงไปบนกรวดชั้นแรกที่อยู่ใต้ชั้นกระบะพลาสติก และท่อสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำในระบบระเหยโดยพืชซึ่งมีขนาด 5 ซม. เจาะรูขนาด 2 ซม. เว้นระยะห่างแต่ละรู เท่ากับ 2 ซม. โดยเจาะตามแนวความสูงของท่อทั้งหมด 4 แถว รอบท่อ ดังรูปที่ 3.7

### 3.2.5 พืชที่ปลูกในแปลงทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้พืชทั้งหมด 2 ชนิด คือ

1. ในระบบบึงประดิษฐ์ ถังที่มีการไหลในแนวตั้ง จะทำการปลูกต้นก้ามกุ้งจำนวน 9 ต้น ตัดให้มีความสูงเท่าๆ กัน ความหนาแน่น 47 ต้น ต่อ ตารางเมตร
2. ในระบบการระเหยโดยพืช จะทำการปลูกต้นเข็ม จำนวน 45 ต้น โดยวางแนวต้นเข็มเป็น 5 ต้นตามแนวความกว้าง และ 9 ต้น ตามแนวความยาว โดยที่ตามแนวความกว้างต้นเข็มจะห่างกันต้นละ 20 ซม. และตามแนวความยาวต้นเข็มจะห่างกันต้นละ 19 ซม. ความหนาแน่น 37 ต้น ต่อ ตารางเมตร

### 3.3 ตัวแปรศึกษา

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรศึกษาที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรกำหนด	ตัวแปรตาม
1. ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	1.ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบใน 1 วัน 2. ขนาดของระบบ 3.ชนิดและขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 4. ตัวกลาง 5. ความสูงของชั้นตัวกลาง	1. พารามิเตอร์ต่างๆ, ได้แก่ -พีเอช -โออาร์พี -อุณหภูมิ -ซีโอดี -บีโอดี -ทีเคเอ็นในโตรเจน -ฟอสฟอรัส -ปริมาณของแข็งทั้งหมด -แอมโมเนียไนโตรเจน 2.ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ 3. อัตราการเติบโตของต้นไม้ เช่น ความสูง

โดยที่ตัวแปรอิสระ คือตัวแปรที่ต้องการศึกษา และสนใจในงานวิจัยนี้

ตัวแปรกำหนด คือตัวแปรที่มีการควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการวิจัยนี้

ตัวแปรตาม ที่ต้องวิเคราะห์หาค่าในน้ำออกจากระบบ



### 3.4 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.4.1 สร้างแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองวางระบบท่อและอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งจัดเรียงชั้นตัวกลางกรวดทรายดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.8 แสดงระบบที่ใช้ทำการทดลอง

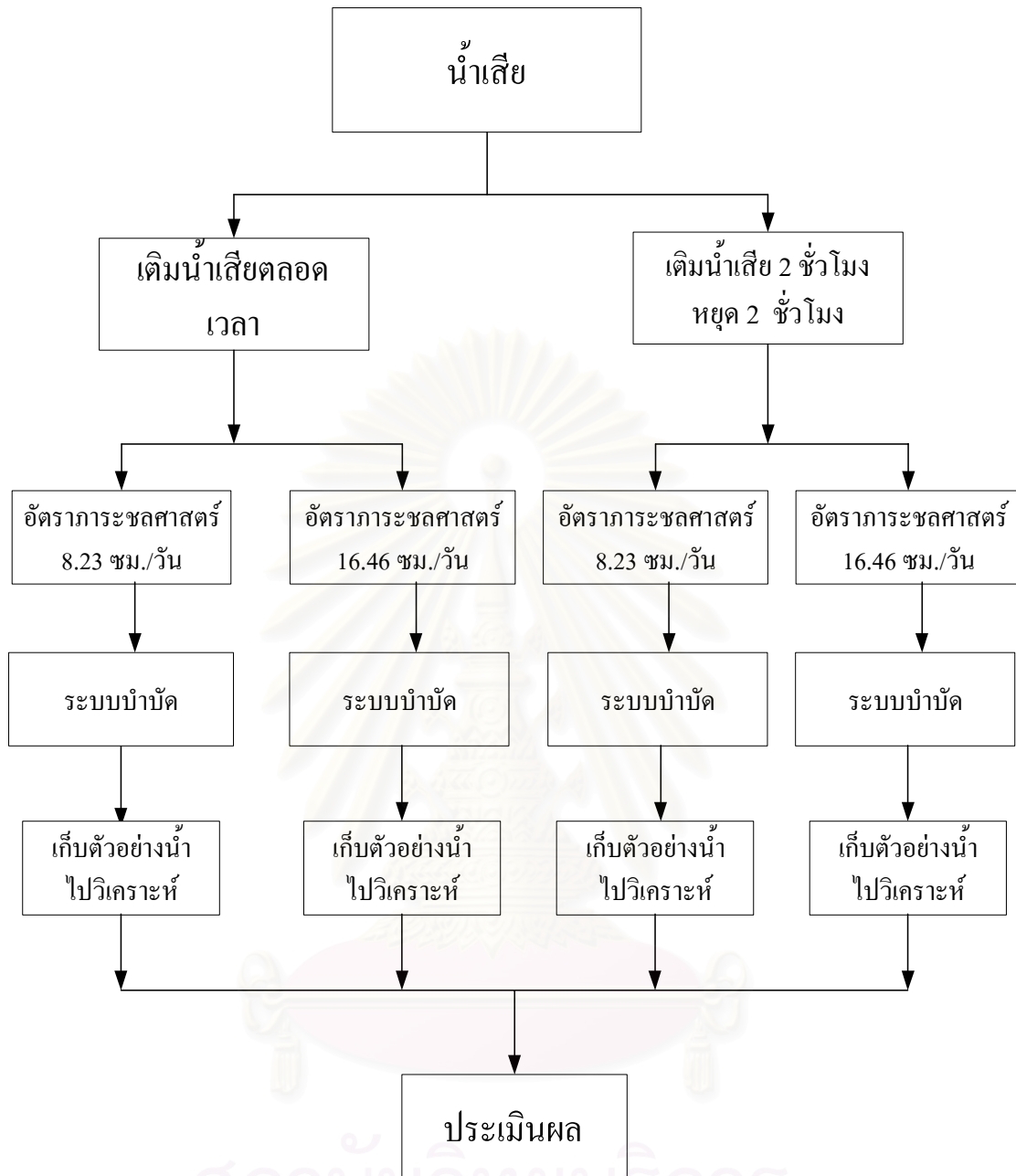
### 3.4.2 พืชที่ใช้ในการทดลอง

พืชที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ต้นก้ามกุ้ง และต้นเข็ม โดยคัดเลือกพืชที่มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกันอายุประมาณ 2 เดือน นำมาปลูกใหม่ในภาชนะที่เตรียมไว้ ซึ่งในช่วงนี้จะมีการเติมน้ำเสียปนกับน้ำประปาธรรมดา เพื่อให้พืชคุ้นเคยโดยค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียขึ้นจนพืชสามารถเจริญเติบโตด้วยน้ำเสียจริงที่ไม่ได้เจือจางได้ดี หลังจากนั้นจึงย้ายต้นพืชจากภาชนะเดิม ลงปลูกโดยต้นก้ามกุ้งปลูกไว้ส่วนบนในถังที่มีการไหลในแนวดิ่ง จำนวน 9 ต้น ตัดให้มีความสูงเท่าๆ กัน ส่วนต้นเข็มให้ปลูกในกระบะที่เตรียมไว้ในระบบการระเหยโดยพืช จะปลูกต้นเข็มจำนวน 45 ต้น โดยวางแนวต้นเข็มเป็น 5 ต้นตามแนวความกว้าง และ 9 ต้น ตามแนวความยาว โดยที่ตามแนวความกว้างต้นเข็มจะห่างกันต้นละ 20 ซม. และตามแนวความยาวต้นเข็มจะห่างกันต้นละ 19 ซม.

### 3.4.3 วิธีการเดินระบบทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานมีแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.9

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการดำเนินการ

## 1. การป้อนน้ำเสียที่อัตราการไหลคงที่

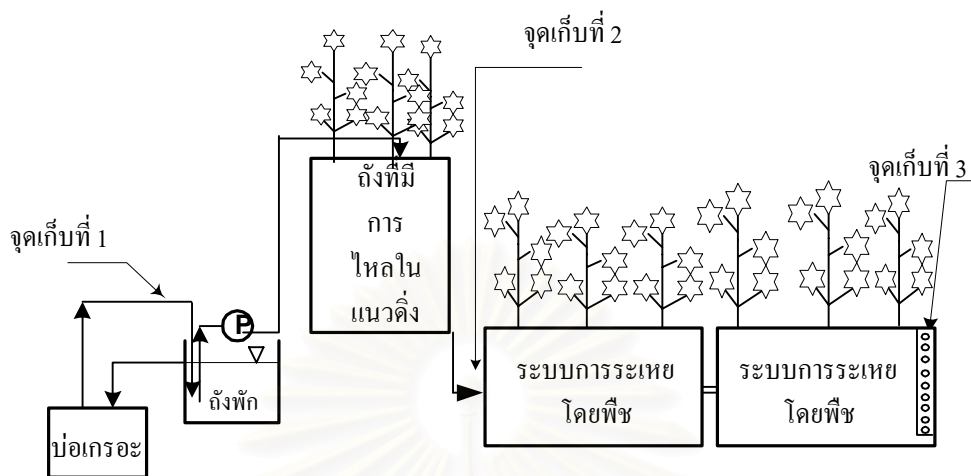
ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง โดยปรับเปลี่ยนอัตราการระเหยของน้ำเสียแตกต่างกัน 2 ค่าซึ่งได้แก่ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน) และ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน) และทำการเดินระบบจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงเดินระบบต่อที่ค่าอัตราการไหลหนึ่งๆ เป็นเวลา 1 เดือนหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ในช่วงแรกของการทดลองได้ทำการเดินระบบโดยใช้น้ำประปาแทนน้ำเสียเป็นเวลาประมาณ 1 เดือนและหลังจากนั้นจึงใช้น้ำเสียจริงในการทดลองเพื่อเป็นการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสีย (Start up) โดยแต่ละช่วงมีขั้นตอนดังนี้

### การทดลองที่ 1 อัตราการระเหย 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน)

ในช่วงนี้จะใช้ อัตราการระเหย 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน) โดยที่ระบบการระเหยโดยพืชใช้กระบะพลาสติก 2 ถัง โดยเริ่มจากการสูบน้ำเสียจากบ่อเกรอะที่รับน้ำเสียจากหอพักนิสิตมาไว้ในถังพักน้ำที่เตรียมไว้แล้วทำการป้อนเข้าสู่ระบบ โดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำจากถังพักน้ำให้เข้าด้านบนของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ส่วนน้ำที่ไม่ได้เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์จะถูกหมุนเวียนกลับไปบ่อเกรอะ น้ำที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์จะปล่อยให้เกิดกลไกการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะออกมาจากระบบอย่างอิสระโดยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลเข้าสู่ถังบำบัดระบบการระเหยโดยพืช ดังแสดงในรูปที่ 3.10

### การทดลองที่ 2 อัตราการระเหย 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน)

ในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มค่าอัตราการระเหยเป็น 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน) โดยที่ระบบการระเหยโดยพืชใช้กระบะพลาสติก 2 ถัง โดยเริ่มจากการสูบน้ำเสียจากบ่อเกรอะที่รับน้ำเสียจากหอพักนิสิตมาไว้ในถังพักน้ำที่เตรียมไว้แล้วทำการป้อนเข้าสู่ระบบโดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำจากถังพักน้ำให้เข้าด้านบนของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ส่วนน้ำที่ไม่ได้เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์จะถูกหมุนเวียนกลับไปบ่อเกรอะ น้ำที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์จะปล่อยให้เกิดกลไกการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะออกมาจากระบบอย่างอิสระโดยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลเข้าสู่ถังบำบัดระบบการระเหยโดยพืช ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำและแผนการทดลอง

## 2. การป้อนน้ำเสียทุก 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง โดยปรับเปลี่ยนอัตราการระชลดศาสตร์ของน้ำเสียแตกต่างกัน 2 ค่าซึ่งได้แก่ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน) และ 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน) และทำการเดินระบบจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงเดินระบบต่อที่ค่าอัตราการไหลหนึ่งๆ เป็นเวลา 1 เดือนหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ในช่วงแรกของการทดลองได้ทำการเดินระบบโดยใช้น้ำประปาแทนน้ำเสียเป็นเวลาประมาณ 1 เดือนและหลังจากนั้นจึงใช้น้ำเสียจริงในการทดลองเพื่อเป็นการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสีย (Start up) โดยแต่ละช่วงมีขั้นตอนดังนี้

### การทดลองที่ 3 อัตราการระชลดศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน)

ในช่วงนี้จะใช้ อัตราการระชลดศาสตร์ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน)โดยที่ระบบการระเหยโดยพืชใช้กระบะพลาสติก 2 ถังโดยเริ่มจากการสูบน้ำเสียจากบ่อเกรอะที่รับน้ำเสียจากหอพักนิสิตมาไว้ในถังพักน้ำที่เตรียมไว้แล้วทำการป้อนเข้าสู่ระบบโดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำจากถังพักน้ำให้เข้าด้านบนของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ส่วนน้ำที่ไม่ได้เข้าสู่ระบบบึง

ประคิษฐ์จะถูกหมุนเวียนกลับไปบ่อเกรอะ น้ำที่เข้าระบบบึงประคิษฐ์จะปล่อยให้เกิดกลไกการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะออกมาจากระบบอย่างอิสระ โดยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลเข้าสู่ถังบำบัดระบบการระเหยโดยพืช เมื่อครบกำหนด 2 ชั่วโมงแล้วทำการหยุดการป้อนน้ำเสียเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้วจึงทำการป้อนน้ำเสียอีก 2 ชั่วโมงทำซ้ำไปเรื่อย ๆ ในระยะเวลา 1 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

**การทดลองที่ 4** อัตราการระเหยของน้ำเสีย 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน)

ในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มค่า อัตราการระเหยของน้ำเสียเป็น 16.46 เซนติเมตรต่อวัน(อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน) โดยที่ระบบการระเหยโดยพืชใช้กระบะพลาสติก 2 ถัง โดยเริ่มจากการสูบน้ำเสียจากบ่อเกรอะที่รับน้ำเสียจากหอพักนิสิตมาไว้ในถังพักน้ำที่เตรียมไว้แล้วทำการป้อนเข้าสู่ระบบโดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำจากถังพักน้ำให้เข้าด้านบนของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ส่วนน้ำที่ไม่ได้เข้าสู่ระบบบึงประคิษฐ์จะถูกหมุนเวียนกลับไปบ่อเกรอะ น้ำที่เข้าระบบบึงประคิษฐ์จะปล่อยให้เกิดกลไกการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะออกมาจากระบบอย่างอิสระ โดยแรงโน้มถ่วงของโลก และไหลเข้าสู่ถังบำบัดระบบการระเหยโดยพืช เมื่อครบกำหนด 2 ชั่วโมงแล้วทำการหยุดการป้อนน้ำเสียเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้วจึงทำการป้อนน้ำเสียอีก 2 ชั่วโมงทำซ้ำไปเรื่อย ๆ ในระยะเวลา 1 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

### 3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์

#### 3.5.1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

การวิจัยจะดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากบ่อเกรอะก่อนเข้าระบบในถังพักน้ำเสีย ซึ่งให้เป็นจุดที่ 1 และน้ำที่ออกมาจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ซึ่งให้เป็นจุด ที่ 2 และจุดสุดท้ายของกระบะที่มีการระเหยโดยพืชซึ่งให้เป็นจุดที่ 3 รวมทั้งสิ้น 3 จุด ดังรูปที่ 3.10

โดยที่ภายในระยะเวลา 1 เดือนแรกของการเดินระบบทดลองจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังนี้ คือ ค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอย พีเอช และอุณหภูมิ และเมื่อระบบคงที่ (Steady) ก็จะมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทุกพารามิเตอร์

### 3.5.2 จุดเก็บตัวอย่างตัวแปร และความถี่ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 จุดเก็บตัวอย่าง ตัวแปร และความถี่ในการวัด

ตัวแปร	จุดเก็บที่ 1	จุดเก็บที่ 2	จุดเก็บที่ 3
pH	X	X	X
Temperature	X	X	X
ORP	X	X	X
COD	X	X	X
BOD	/	/	/
TKN	X	X	X
TP	X	X	X
SS	X	X	X
NH <sub>4</sub> -N	X	X	X

หมายเหตุ 1.) X คือ เก็บตัวอย่าง 2 ครั้งต่อสัปดาห์  
2.) / คือ เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละครั้ง

### 3.5.3 วิธีที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
pH	Electrometric pH meter Method
Temperature	Thermometer ( Mercury Filled Thermometer )
ORP	Electronic ORP meter with platinum electrode method
COD	Dichromate closed reflux method
BOD	Azide Modification Method
TKN	Macro Kjeldahl method
TP	Vanadomolybdophosphoric Acid Method
SS	Dried at 103-105 °C
NH <sub>4</sub> -N	Titrimetric method

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียบ้านเรือน โดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ ผิดกันร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยใช้อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน (อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 20 ลิตรต่อวัน) และอัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน (อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 40 ลิตรต่อวัน) โดยการทดลองชุดที่ 1 จะทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ส่วนการทดลองชุดที่ 2 จะทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 2 ชั่วโมง หยุดป้อน 2 ชั่วโมงสลับกัน โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะแล้ว

พืชที่ใช้ในการทดลองคือ ต้นธรรมรักษา (ก้ามกุ้ง) ใช้สำหรับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง และต้นเข็มใช้สำหรับกระเบระเหยน้ำ โดยพืชทั้ง 2 ชนิดมีอายุประมาณ 2 เดือน และแต่ละชนิดมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยก่อนเริ่มปลูกลงในระบบ ได้มีการเติมน้ำเสียที่เจือจางจากหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อให้พืชคุ้นเคยโดยค่อยๆเพิ่มความเข้มข้นจนพืชสามารถโตด้วยน้ำเสียจริงที่ไม่ได้เจือจางได้

#### 4.1 ลักษณะทั่วไปในการทดลอง

##### 4.1.1 สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

พื้นที่ที่ทำการศึกษารั้วนี้เป็นพื้นที่ที่มีแสงแดดจัดปานกลาง-มาก มีอุณหภูมิของอากาศโดยเฉลี่ยค่อนข้างสูง (22.8-30.4 องศาเซลเซียส) โดยในช่วงการทดลองมีอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยประมาณ 28.11 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 49.00-80.88 เปอร์เซ็นต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 65.34 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาพภูมิอากาศในช่วงทำการทดลองมีฝนตกเพียงเล็กน้อยแต่เนื่องจากระบบมีหลังคาพลาสติกใสที่ป้องกันน้ำฝนได้ ดังนั้นปริมาณน้ำฝนจึงไม่มีผลกระทบต่อโดยตรงต่อการทดลอง แต่จะมีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์

##### 4.1.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะแล้ว โดยมีลักษณะดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

คุณลักษณะ	ช่วงของน้ำเสีย	ค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย	S.D.	มาตรฐานน้ำ* ที่ประเภท ก.
1. พีเอช <sup>a</sup>	7.40-7.89	7.67	0.17	5-9
2. อุณหภูมิ <sup>a</sup> (องศาเซลเซียส)	25.0-30.0	27.72	1.65	-
3. โออาร์พี <sup>b</sup> (มิลลิโวลต์)	(-338.4)-(-255.8)	-311.35	21.83	-
4. บีโอดี <sup>c</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	28.0-50.0	39.66	7.52	20
5. ซีโอดี <sup>a</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	160-1120	354.12	280.45	-
6. ของแข็งแขวนลอย <sup>a</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	18.0-46.0	35.58	5.29	30
7. ทีเคเอ็น <sup>b</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	127.68-156.24	141.54	8.54	35
8. แอมโมเนียไนโตรเจน <sup>b</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	109.76-147.84	134.26	10.24	-
9. ฟอสฟอรัสทั้งหมด <sup>b</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4.270-5.032	5.80	0.30	-

\*ที่มา : ข้อมูลจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

หมายเหตุ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำเสีย(ตัวอย่าง) <sup>a</sup> = 24 <sup>b</sup> = 16 <sup>c</sup> = 9

จากตารางพบว่าค่าน้ำเสียดิบที่เข้าสู่ระบบมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.40-7.89 (เฉลี่ย 7.67) มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25.0-30.0 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 27.72 องศาเซลเซียส) โออาร์พีมีค่าเป็นลบอยู่ในช่วง (-338.4)-(-255.8) มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย -311.35 มิลลิโวลต์) เนื่องจากน้ำเสียถูกย่อยสลายภายในบ่อเกรอะโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ มีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 28.0-50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 39.66 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 160-1120 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 354.12 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีอัตราส่วนของบีโอดี ต่อ ซีโอดี เท่ากับ 0.11 ของแข็งทั้งหมดมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 18-46 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบมีการพักในถังพักน้ำ

ก่อนที่จะปล่อยเข้าสู่ระบบ ค่าของแข็งแขวนลอยบางส่วนจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นถังและบางส่วนจะเวียนกลับไปสู่อุปกรณ์กรองอีกครั้งเพราะในถังพักน้ำมีการเวียนน้ำกลับสู่อุปกรณ์กรองตลอดเวลา ทีเคเอ็น มีค่าสูงมากอยู่ในช่วง 127.68-156.24 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 141.54 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่มาจากห้องน้ำของหอพักนิสิต โดยพบว่าไนโตรเจนเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 109.76-147.84 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 134.26 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในช่วง 5.032-4.270 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.80 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ก. พบว่ามีค่า บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด แม้ว่าจะผ่านการบำบัดด้วยบ่อเกรอะแล้วก็ยังคงมีค่าที่เคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ของน้ำออก สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้จึงต้องมีการบำบัดก่อนถ่ายทิ้งลงสู่สาธารณะ

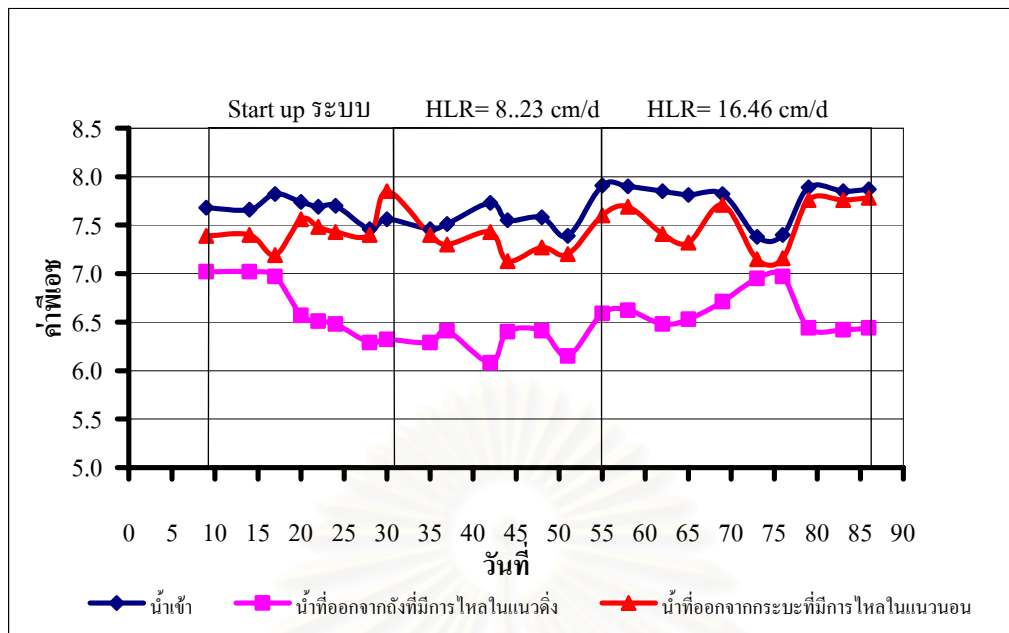
#### 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียสม่ำเสมอ

ทำการทดลองโดยป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่อัตราการชะลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน (อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ 20 ลิตรต่อวัน) ซึ่งเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่และปรับเปลี่ยนอัตราการชะลศาสตร์ เป็น 16.46 ชม./วัน(อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ 40 ลิตรต่อวัน) และเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบตลอดเวลาซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

##### 4.2.1 พีเอช

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้า(จุดที่ 1) และน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 2) และน้ำจากปลายกระบะของระบบ (จุดที่ 3) ที่อัตราการชะลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.39-7.91 (เฉลี่ย 7.59) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.08- 6.59 (เฉลี่ย 6.33) ส่วนน้ำจากปลายกระบะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.13-7.60 (เฉลี่ย 7.33)

สำหรับที่อัตราการชะลศาสตร์ 16.46 ชม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.38-7.89 (มีค่าเฉลี่ย 7.72) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.42- 6.97 (เฉลี่ย 6.64) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ 1 มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.15-7.78 (เฉลี่ย 7.52) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

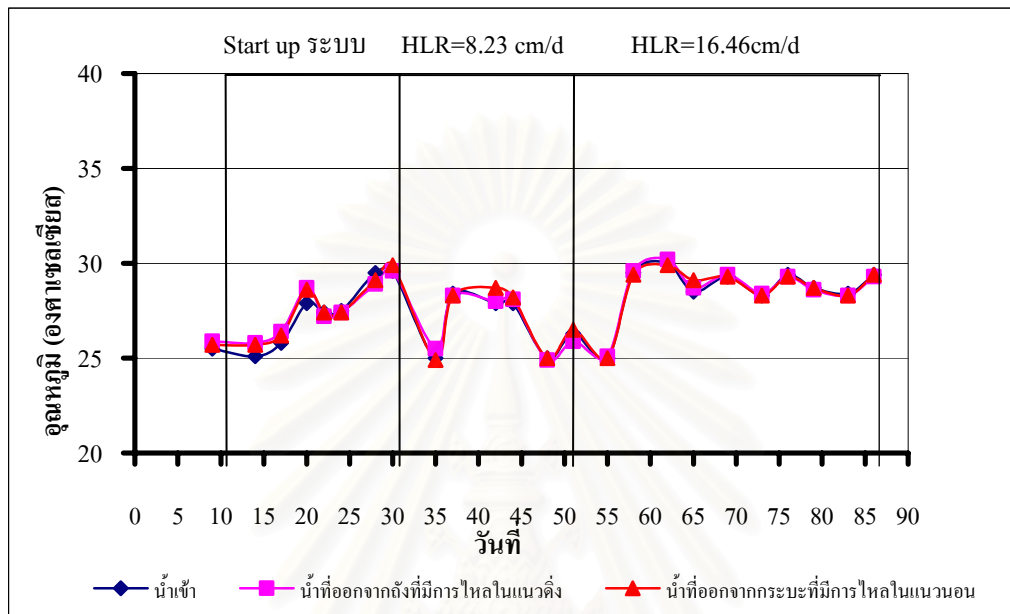
จากรูปที่ 4.1 จะพบได้ว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าสูง และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง จะมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่ออัตราการระเหยสูงค่าพีเอชจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านกระบะที่มีการไหลในแนวนอนน้ำเสียจะมีค่าพีเอชสูงกว่าถังที่มีการไหลในแนวตั้ง และสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เมื่ออัตราการระเหยสูงค่าพีเอชก็จะสูงขึ้น

#### 4.2.2 อุณหภูมิ

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 2) และน้ำจากปลายกระบะของระบบ (จุดที่ 3) ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าอุณหภูมิระหว่าง 25.0-28.4 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 26.50 องศาเซลเซียส) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 24.9-28.3 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 26.54 องศาเซลเซียส) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 24.9-28.7 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 26.66 องศาเซลเซียส)

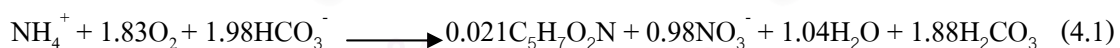
สำหรับที่อัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าอุณหภูมิระหว่าง 28.3-29.4 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ย 28.86 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 29.3-29.4 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28.86 องศาเซลเซียส) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28.3-29.4 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 28.91 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำเสียจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัด ส่วนน้ำเสียที่ผ่านถังที่มีกรไหลในแนวตั้งก็ยังมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันกับน้ำเสียจากกระบะที่มีกรไหลในแนวนอน ซึ่งอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้ตามปกติ



รูปที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

สำหรับน้ำจากถังที่มีกรไหลในแนวตั้งมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าน้ำเข้า เนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มีการปลดปล่อยไฮโดรเจนอออนในรูปของกรดคาร์บอนิก ทำให้ค่า พีเอช ลดลงดังสมการที่ (4.1) (ซีระ เกรอต , 2539)



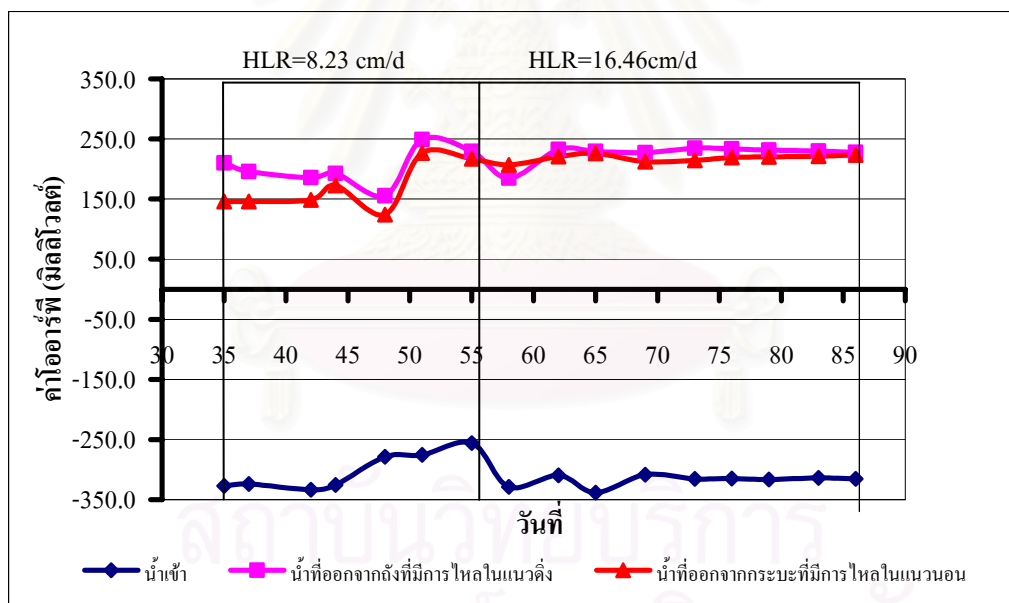
หลังจากนั้นเมื่อน้ำไหลผ่านกระบะที่มีกรไหลในแนวนอน ค่าพีเอชจะสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เกิดอนุมูลของไปคาร์บอนेटทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้นดังสมการที่ (4.3)

ระดับค่าพีเอชมีผลกระทบต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จะอยู่ในช่วง 7.5-8.6 อย่างไรก็ตามเมื่อเคซินก็สามารถทนได้ที่พีเอชต่ำกว่านี้ (Vymazal และคณะ, 1998) ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จะอยู่ในช่วง 7.0-8.0 เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6.0 และ มากกว่า 8.0 จะทำให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันลดลง (Kadlec และ Knight , 1996)

### 4.2.3 โออาร์พี

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 2) และน้ำจากปลายกระเบของระบบ (จุดที่ 3) ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าโออาร์พีระหว่าง (-333.4)-(-255.8) มิลลิโวลต์ และมีค่าเฉลี่ย (-303.0) มิลลิโวลต์ ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 155.3-248.8 มิลลิโวลต์(เฉลี่ย 202.6 มิลลิโวลต์) ส่วนน้ำจากปลายกระเบมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 124.1-226.6 มิลลิโวลต์(เฉลี่ย 168.6 มิลลิโวลต์)

สำหรับที่อัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าโออาร์พีระหว่าง (-338.4)-(-308.4) มิลลิโวลต์ และมีค่าเฉลี่ย (-317.53) มิลลิโวลต์ ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 227.4-234.5 มิลลิโวลต์(เฉลี่ย 230.56 มิลลิโวลต์) ส่วนน้ำจากปลายกระเบ มีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 212.4-225.9 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย 219.63 มิลลิโวลต์) ดังรูปที่ 4.3



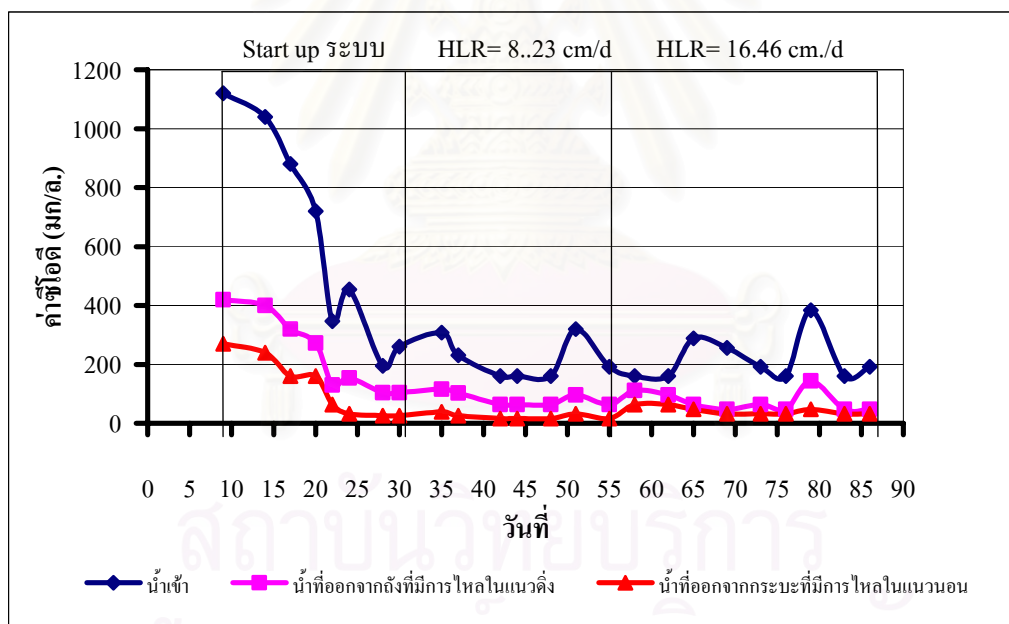
รูปที่ 4.3 ค่าโออาร์พีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

จากรูปที่ 4.3 ค่าโออาร์พีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าติดลบ และเมื่อน้ำเสียที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้งออกมาจะมีค่าโออาร์พีเป็นบวก และน้ำจากกระเบก็มีค่าโออาร์พีเป็นบวกซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง แสดงว่าในกระเบที่มีการไหลในแนวนอนเป็นการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

#### 4.2.4 ซีโอดี

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 2) และน้ำจากปลายกระบะของระบบ (จุดที่ 3) ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าซีโอดีระหว่าง 160-320 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 218.71 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าซีโอดีในช่วง 64-116 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 81.57 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ มีค่าซีโอดีในช่วง 16-39 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 23.0 มิลลิกรัมต่อลิตร)

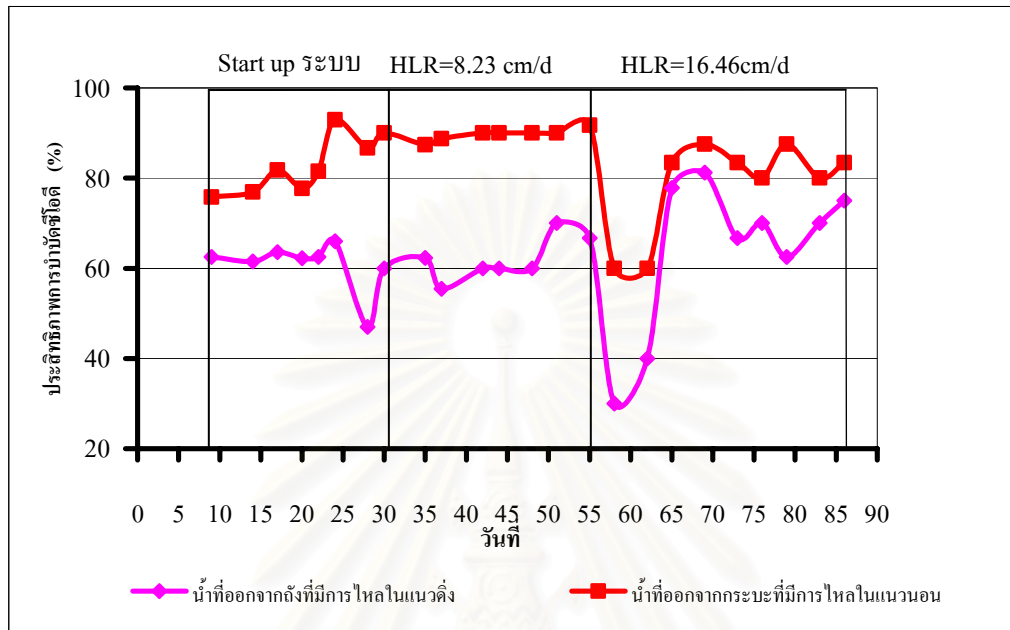
สำหรับที่อัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าซีโอดีระหว่าง 160-384 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 233.14 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าซีโอดีในช่วง 48-144 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 66.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ มีค่าซีโอดีในช่วง 32-48 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 36.57 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าซีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 55.40-70.00 (เฉลี่ยร้อยละ 62.06) ส่วนน้ำจากปลายกระบะที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูง ขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 87.40-91.70 (เฉลี่ยร้อยละ 89.69) เมื่อเพิ่มอัตราการระเหยเป็น 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีประสิทธิภาพการบำบัด

ซีไอดีสูงขึ้นอยู่กับอยู่ในช่วงร้อยละ 62.50-81.25 (เฉลี่ยร้อยละ 71.89) ส่วนน้ำจากปลายกระบะที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 80.00-87.50 (เฉลี่ยร้อยละ 83.60) ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของถังที่มีการไหลในแนวตั้งเมื่อเริ่มเดินระบบในตอนแรกประสิทธิภาพการบำบัดยังไม่คงที่ และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 60) และเมื่อเปลี่ยนอัตราการระชลดศาสตร์ให้มากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้น

ในช่วงแรกมีค่าซีไอดีสูงเนื่องจากแบคทีเรียในชั้นตัวกลางยังไม่สามารถปรับตัวได้ เมื่อเวลาผ่านไปเข้าสู่สภาวะคงที่ประมาณ 30 วันหลังจากการเริ่มเดินระบบ น้ำเสียที่ออกมาจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าซีไอดีลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อเปลี่ยนอัตราการระชลดศาสตร์มากขึ้น ค่าซีไอดีก็จะสูงขึ้นในช่วงแรกและคงที่ในเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งทำให้อัตราส่วน บีไอดี ต่อ ซีไอดี มีค่าลดลง

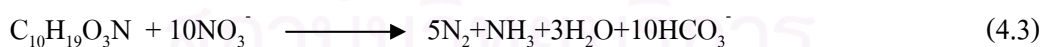
ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดของกระบะที่มีการไหลในแนวนอน เมื่อเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพจะค่อยๆ สูงขึ้น และคงที่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่(มากกว่าร้อยละ 90) และเมื่อเปลี่ยนอัตราการระชลดศาสตร์ให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี มีค่าลดลง จากร้อยละ 90 เหลือร้อยละ 83

ปฏิกิริยาการบำบัดของระบบซึ่งเป็นการไหลได้ผิวดินในแนวตั้งมีค่าซีโอดีลดลงได้ เนื่องจากน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางพวกกรวดทรายผ่านชั้นตัวกลางต่างๆ จะทำให้เกิดการกรอง การตกตะกอนและการย่อยสลายในสภาวะแอโรบิกโดยค่าไออาร์พีที่ได้เป็นบวกตลอดการทดลอง

เมื่อน้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบที่มีลักษณะการไหลในแนวนอนสามารถลดค่าซีโอดีได้ เนื่องจาก เกิดกลไกในการกรอง ตกตะกอน เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางพวกกรวด ทราย ที่มีการไหลในแนวนอนจากจุดน้ำเข้าผ่านชั้นตัวกลางต่างๆ จะทำให้เกิดเกิดการกรอง และการตกตะกอน (Howard et al., 1999) ซึ่งทั้งกรวดและทรายมีคุณสมบัติในการกรองและทำให้มีการตกตะกอน มลสารเหมือนถังกรองที่มีชั้นกรองสารทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนการนำสารอาหารไปใช้โดยรากพืชเพื่อนำไปใช้ในการสร้างอาหารและเพื่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ค่าซีโอดีลดลงได้ส่วนหนึ่ง (Brix.H. , 1997) อีกเหตุผลหนึ่งคือน้ำเสียจะถูกบำบัดซีโอดีได้โดยการทำงานของแอโรบิกเฮเทอโรโทรฟิคแบคทีเรียที่เกาะอยู่ตามกรวด ทรายและรากพืช แบคทีเรียชนิดนี้มีหน้าที่ในการกำจัดสารละลายอินทรีย์ซึ่งมีการย่อยสลายแบบแอโรบิกและได้รับออกซิเจนโดยตรงจากบรรยากาศ โดยการแพร่และการส่งผ่านออกซิเจนมายังรากพืชและบริเวณรอบๆ ที่รากพืชแทรกอยู่ การย่อยสลายแบบแอโรบิกนี้เป็นไปดังสมการที่ (4.2) (Vymazal และคณะ, 1998)



นอกจากนี้ค่าซีโอดีส่วนหนึ่งลดลงได้ เนื่องมาจากในระบบที่มีการไหลในแนวนอนนี้มีซีโอดีบางส่วนถูกใช้ไปเป็นแหล่งคาร์บอน โดยแบคทีเรียในระบบวนการดีไนตริฟิเคชันซึ่งมีสารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนคือ Substrate Nitrate Denitrification ซึ่งใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งใดก็ได้ที่ไม่ใช่คาร์บอนในเซลล์จุลินทรีย์ สารอินทรีย์คาร์บอนอาจเป็นซีโอดี / บีโอดี ที่อยู่ในน้ำเสีย (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ดังสมการที่ (4.3)



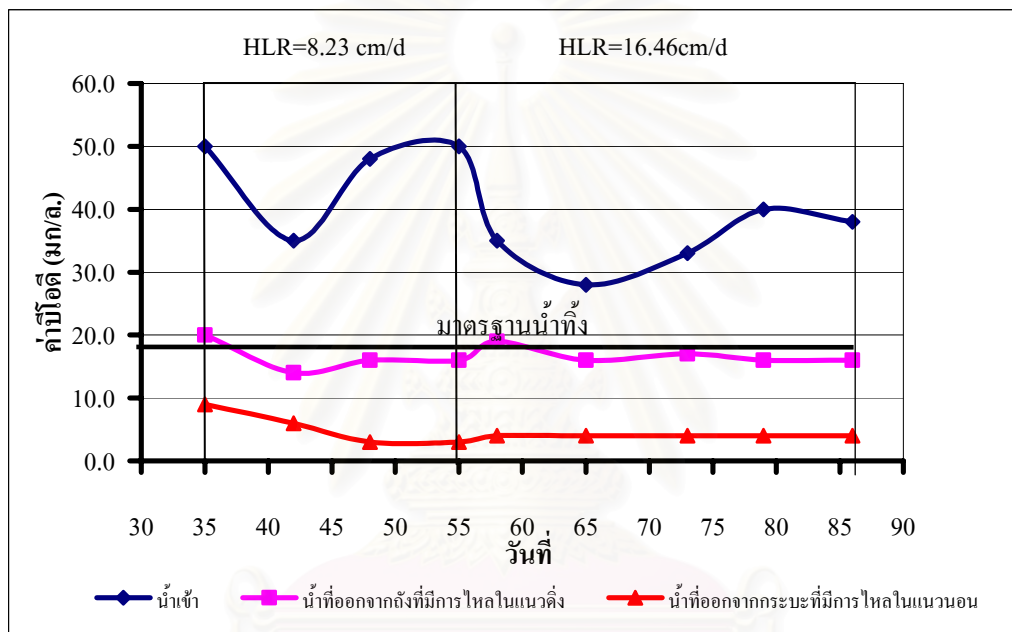
#### 4.2.5 บีโอดี

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 2) และน้ำจากปลายกระบะของระบบ (จุดที่ 3) ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าบีโอดีระหว่าง 35-50 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 45.75 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 14-20 มิลลิกรัม



ต่อลิตร(ค่าเฉลี่ย 16.50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะ มีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 3-9 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 5.25 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สำหรับที่อัตราภาระชลศาสตร์ 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบ มีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 28-40 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 34.75 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 16-17 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 16.25 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 4.0-4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 4.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.6



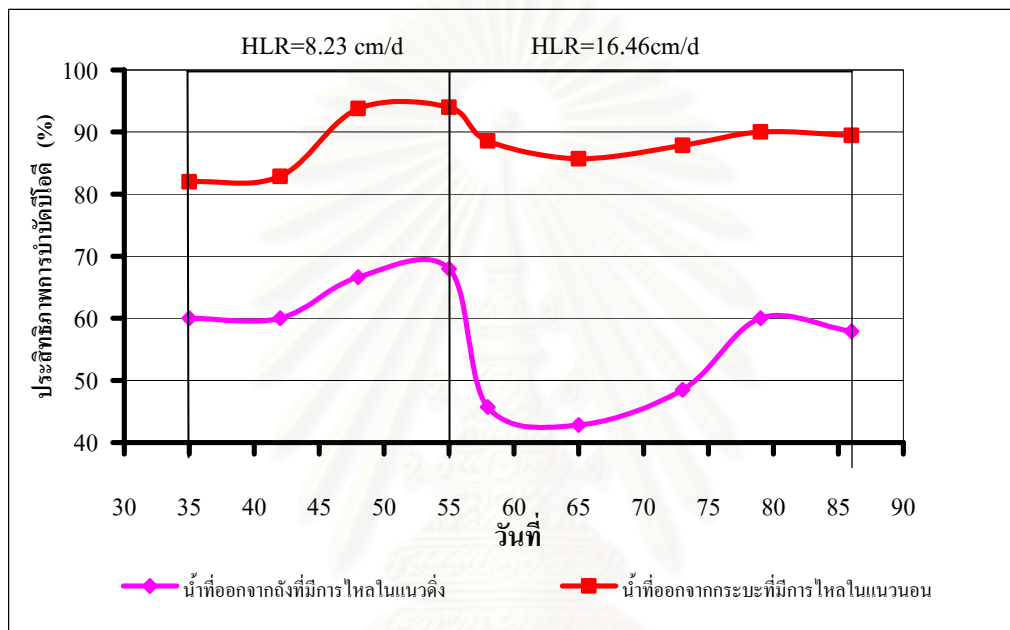
รูปที่ 4.6 ค่าบีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

ค่าบีโอดีของน้ำเสียจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งในตอนแรกมีค่าบีโอดีต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. และเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์สูงขึ้น ค่าบีโอดีจะสูงขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. สำหรับค่าบีโอดีจากกระบะที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าบีโอดีน้อยกว่า 10 มก./ล. ตลอดการทดลองและมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก.

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีที่อัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ

60.00-68.00 (เฉลี่ยร้อยละ 63.67) ส่วนน้ำจากปลายกระเบที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 82.00-94.00 (เฉลี่ยร้อยละ 88.15)

ที่อัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 42.85-60.00 (เฉลี่ยร้อยละ 52.31) ส่วนน้ำจากปลายกระเบที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 85.71-90.00 (เฉลี่ยร้อยละ 88.26) ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งเปลี่ยนอัตราการระเหยสูงขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง สำหรับกระเบที่มีการไหลในแนวนอนประสิทธิภาพในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลามากขึ้น และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการระเหย และมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบเกิดขึ้นในชั้นตัวกลางแบบใช้อากาศ ที่จะถูกกำจัดด้วยปริมาณอากาศที่ถ่ายเทลงสู่ชั้นตัวกลาง ซึ่งจะมีค่าคงที่ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงลดลงเมื่ออัตราการระเหยทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น (Howard และคณะ, 1999)

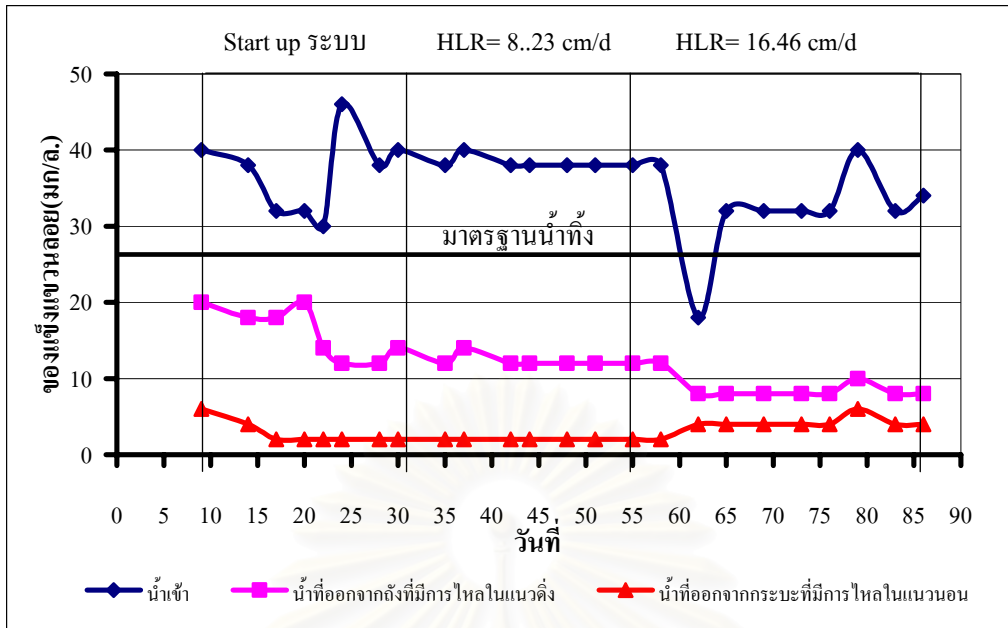
ค่าบีโอดีมีค่าลดลงเนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบต้องการก๊าซออกซิเจน โดยมีแหล่งออกซิเจนที่สำคัญในระบบรากพืชนอกจากนี้ยังมีส่วนในการเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการสะสมและเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์และธาตุอาหาร (Brix , 1993a)

#### 4.2.6 ของแข็งแขวนลอย

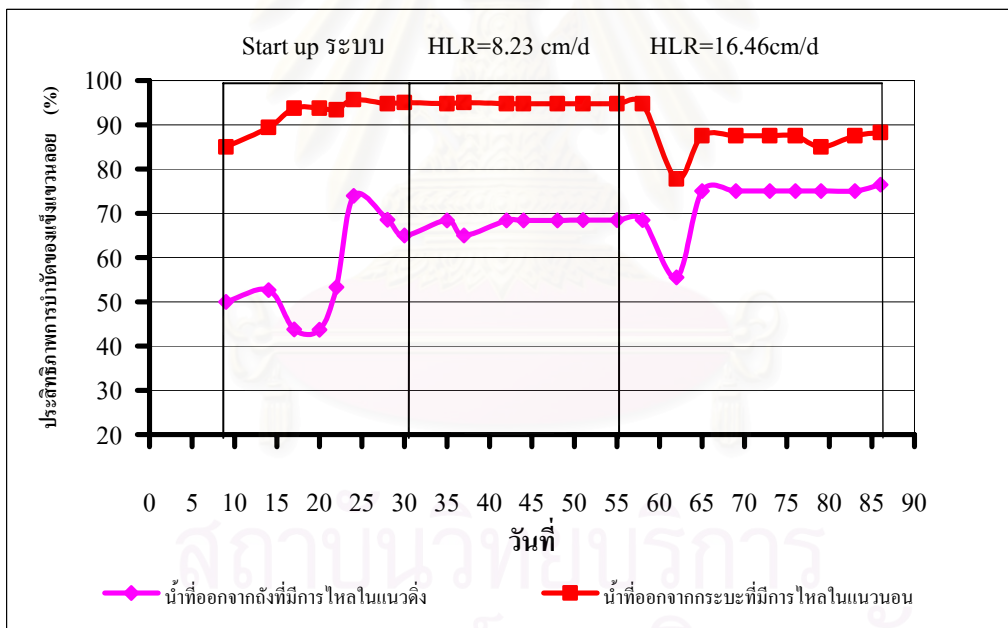
จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและน้ำที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้ง (จุดที่ 1) และน้ำจากปลายกระบะของระบบ (จุดที่ 2) ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยก่อนข้างต่ำระหว่าง 38-40 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 38.29 มิลลิกรัมต่อลิตรเนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 12-14 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 12.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะมีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำมากอยู่ในช่วง 2-2 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 65.00-68.42 (เฉลี่ยร้อยละ 67.92) ส่วนน้ำจากปลายกระบะที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 94.73-95.00 (เฉลี่ยร้อยละ 94.77)

สำหรับที่อัตราการระเหย 16.46 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระหว่าง 32-40 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 33.43 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้ง มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 8-10 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 8.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนน้ำจากปลายกระบะมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 4-6 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 4.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

จากรูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยสำหรับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ในตอนเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในวันที่ 30 ของการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะคงที่เท่ากับร้อยละ 67.92 เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียให้สูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงระยะหนึ่งและกลับเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้งหนึ่งประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นและคงที่(เฉลี่ย

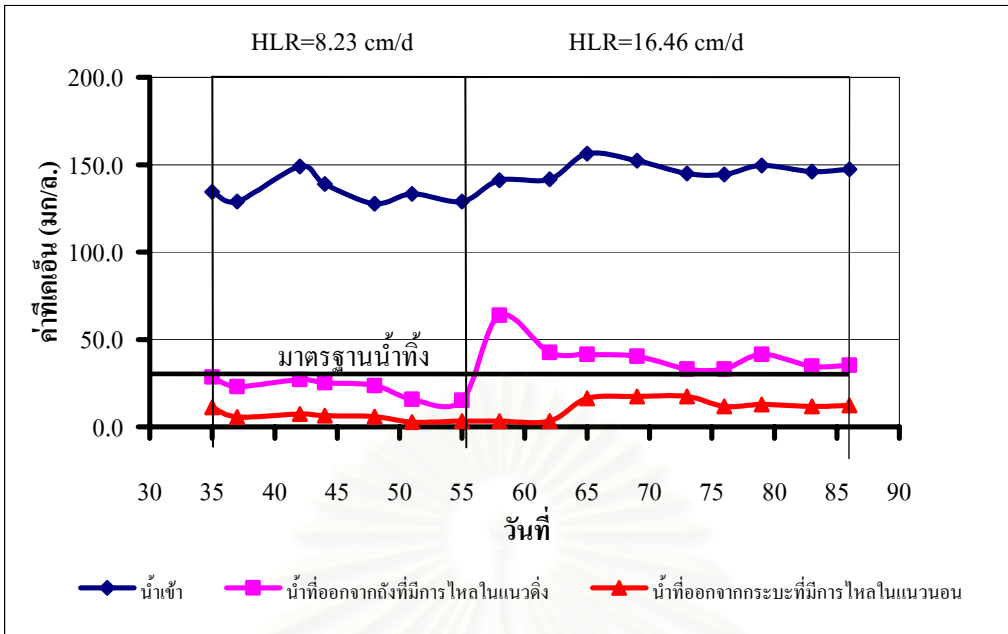
เท่ากับร้อยละ 75.21) ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่ออัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระบอกที่มีการไหลในแนวนอน ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเดินระบบและคงที่ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน และเมื่อเพิ่มเป็น 16.46 ซม./วัน ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าลดลง

ของแข็งแขวนลอยมีค่าลดลงเนื่องจากกลไกในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเกิดจากการตกตะกอนและการกรอง และการจับติดกับชั้นฟิล์มของจุลินทรีย์ ยิ่งไปกว่านั้นต้นพืชมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของน้ำเสียที่เข้ามาต่ำลง และช่วยกระจายน้ำเข้าได้ทั่วระบบ ซึ่งไปช่วยเสริมการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้นทำให้ของแข็งแขวนลอยเกิดการตกตะกอนได้อย่างรวดเร็วและตกค้างระหว่างเม็ดทราย (Gray, 1989)

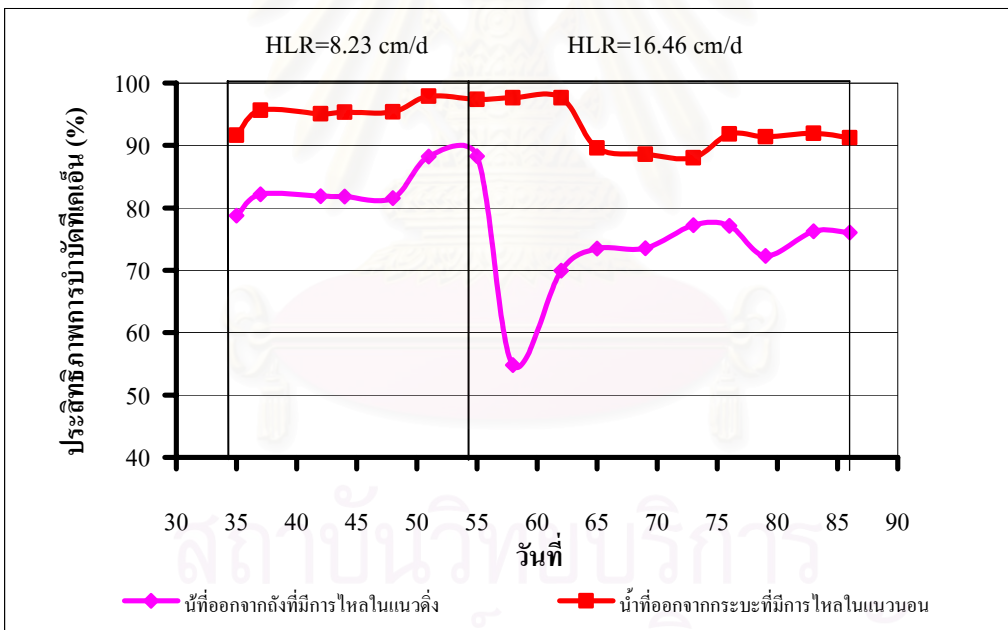
#### 4.2.7 ทีเคเอ็น

น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าทีเคเอ็นสูงมากอยู่ระหว่าง 127.68-148.96 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 134.40 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในบ่อเกรอะแล้วทำให้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียสูงอยู่ในช่วง 109.76-139.44 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 125.28 มิลลิกรัมต่อลิตร) คิดเป็นไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียไนโตรเจนร้อยละ 93.21 การทดลองที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังที่มีการไหลในแนวตั้งพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดในถังนี้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จะมีค่าทีเคเอ็นลดต่ำลงมาก ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียเฉลี่ยเท่ากับ 22.58 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 83.24 และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนพบว่าสามารถบำบัดทีเคเอ็นได้อีกคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวมของระบบทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 95.50 และมีค่าทีเคเอ็นในน้ำทิ้งเฉลี่ยเท่ากับ 6.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ก. มาก

เมื่อเปลี่ยนอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นเป็น 16.46 ซม./วัน พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดในถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นลดต่ำกว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน เล็กน้อยโดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 75.13 และค่าทีเคเอ็นในน้ำทิ้งยังมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ก. อยู่ แต่เมื่อน้ำเสียไหลผ่านกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนพบว่าน้ำเสียมีค่าทีเคเอ็นลดต่ำลงมากและต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งประเภท ก. (เฉลี่ย 14.23 มิลลิกรัมต่อลิตร) คิดเป็นประสิทธิภาพรวมของระบบพบว่ามีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 90.38 รายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการบำบัดแสดงรายละเอียดในกราฟรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ค่าที่เคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

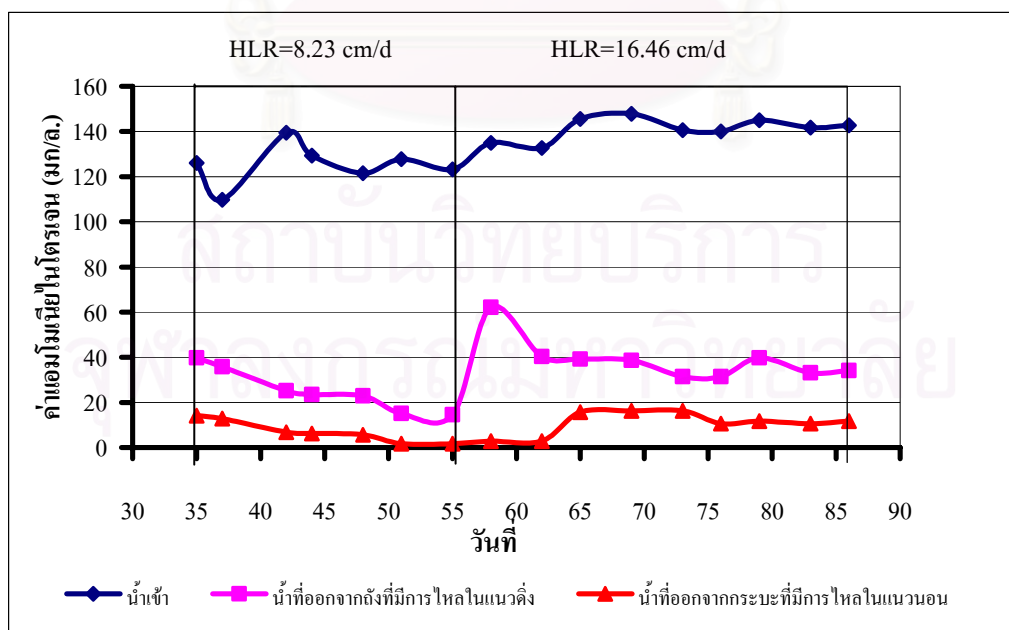


รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

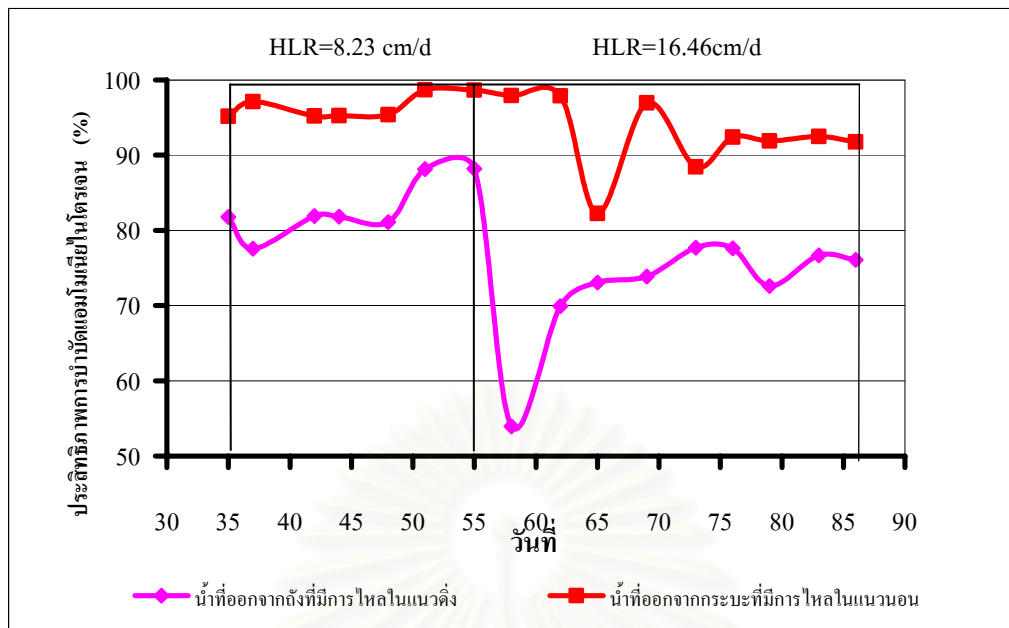
#### 4.2.8 แอมโมเนียไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.12 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของถังที่มีการไหลในแนวตั้งในตอนแรกจะมีค่าลดลงเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่อัตราการระเหยศาสตร์ 8.23 ซม./วัน มีค่าเฉลี่ยของน้ำออกอยู่ในช่วง 14.56-25.20 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 21.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ) และเมื่อเพิ่มอัตราการระเหยศาสตร์ให้สูงขึ้นค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำออกจะสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 31.36-39.76 มิลลิกรัมต่อลิตร(เฉลี่ย 35.36 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนจะมีแนวโน้มเหมือนกับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ก็จะมีค่าลดลงเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยที่อัตราการระเหยศาสตร์ 8.23 ซม./วัน มีค่าอยู่ในช่วง 1.68-6.72 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 4.44 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อเพิ่มอัตราการระเหยศาสตร์ให้สูงขึ้นค่าแอมโมเนียไนโตรเจนจะสูงขึ้น อยู่ในช่วง 10.64-16.24 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 13.28 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากรูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้งเมื่อเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพก็จะเริ่มคงที่(มากกว่าร้อยละ 80 ) และจะลดลงเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการระเหยศาสตร์ให้สูงขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนมีแนวโน้มเหมือนกับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง คือ เมื่อเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพจะเริ่มสูงขึ้น(มากกว่าร้อยละ 90) และประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่ออัตราการระเหยศาสตร์สูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา



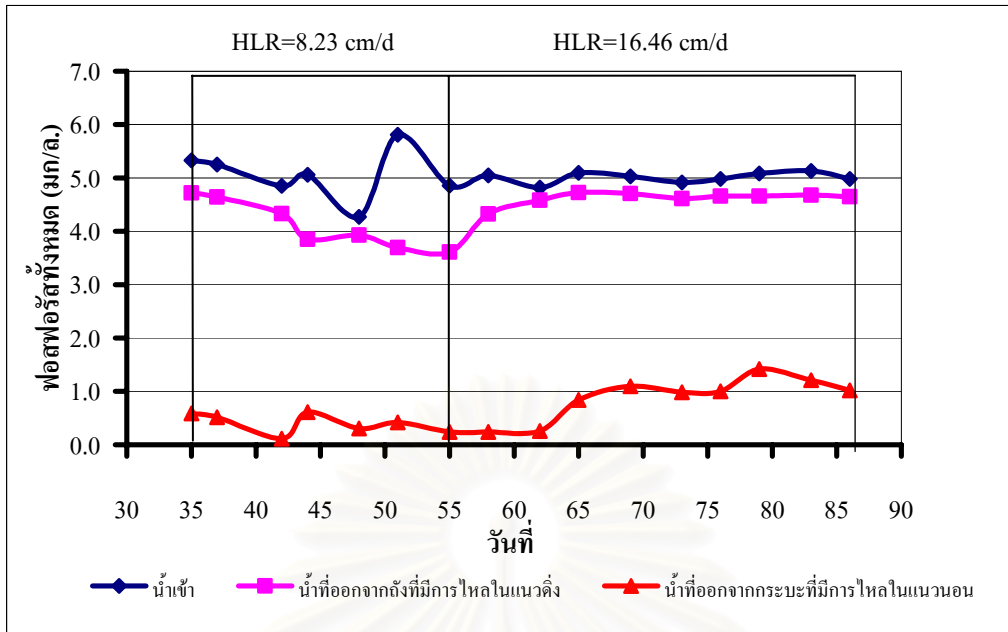
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

กลไกในการลดค่าไนโตรเจนในน้ำออกของระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีหลายแบบ ทั้งการดูดไนโตรเจนไปสะสมไว้ในพืชอยู่ในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน หรือกลายเป็นไอของแอมโมเนียที่ละลายน้ำไปเป็นแอมโมเนียในรูปก๊าซ การดูดไนโตรเจนติดไว้กับชั้นตะกอน รวมทั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน (Rogers และคณะ, 1985)

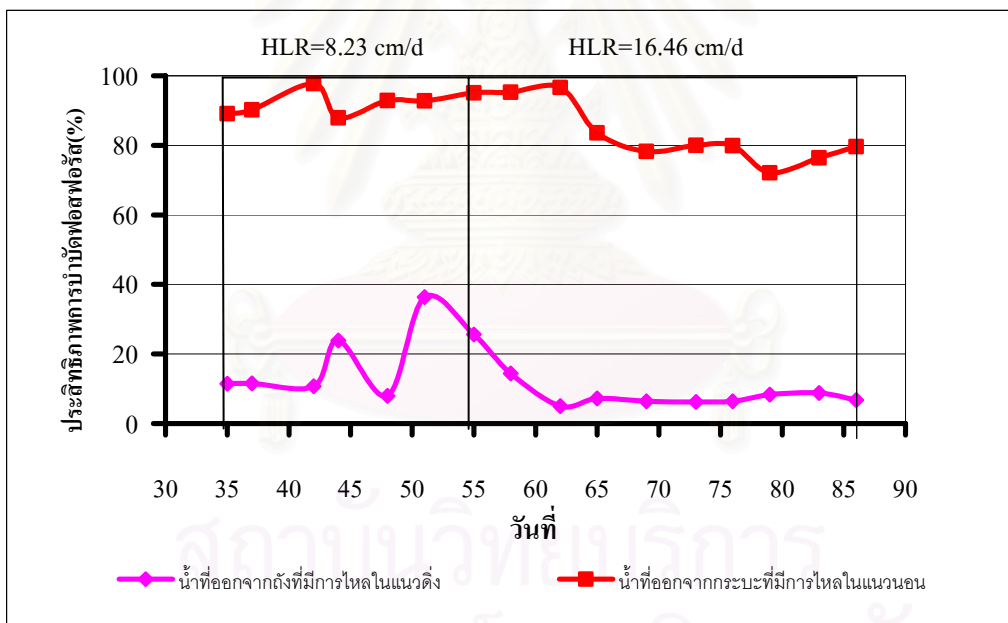
#### 4.2.9 ฟอสฟอรัส

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 4.27-5.80 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.06 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าลดลงมาจากค่าน้ำเข้าน้อยมากโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.61-4.72 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 4.11 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อเพิ่มอัตราการชะลศาสตร์จะทำให้ค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 4.61-4.72 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 4.67 มิลลิกรัมต่อลิตร) และจะคงที่อีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ สำหรับกระบะที่มีการไหลในแนวนอนสามารถลดค่าฟอสฟอรัสได้มาก (ค่าฟอสฟอรัสต่ำกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) และจะมีค่าฟอสฟอรัสสูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนอัตราการชะลศาสตร์ให้สูงขึ้น และค่าฟอสฟอรัสจะคงที่อีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังรูปที่ 4.14





รูปที่ 4.14 ค่าฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลา

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส จากรูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ที่อัตราการระลอกศาสตร์ 8.23 ซม./วัน ในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลามากขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 7.96-36.39 (เฉลี่ยร้อยละ 18.23)และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเปลี่ยนอัตราการระลอกศาสตร์เพิ่มขึ้นเป็น 16.46 ซม./วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 6.24-8.81 (เฉลี่ยร้อยละ 7.19) และประสิทธิภาพจะคงที่อีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ สำหรับกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนใน

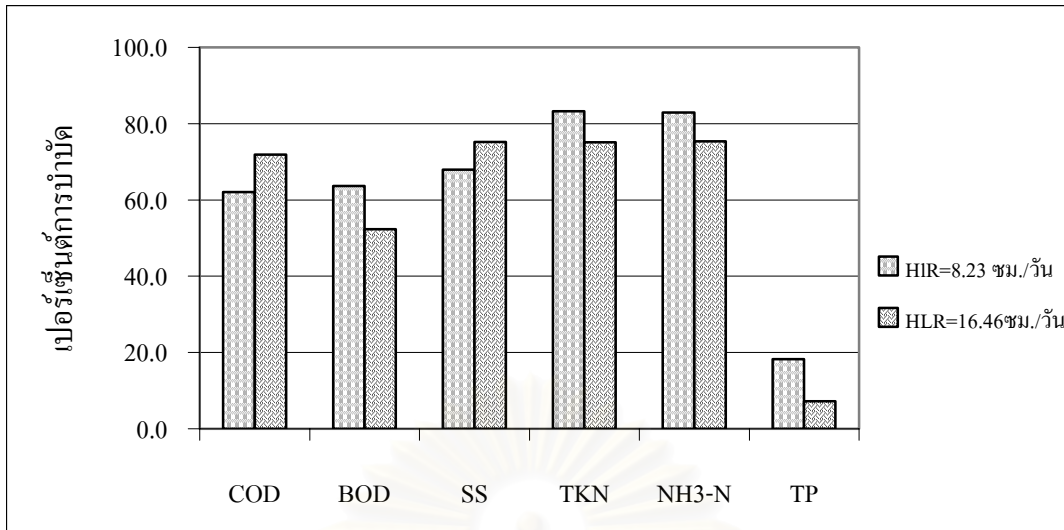
ช่วงแรกของอัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 87.90-97.69 (เฉลี่ยร้อยละ 92.21) และประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราภาระชลศาสตร์ขึ้น เป็น 16.46 ซม./วัน และประสิทธิภาพจะคงที่อีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 72.09-83.55 (เฉลี่ยร้อยละ 78.55)

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าฟอสฟอรัสลดลงเล็กน้อยเนื่องจากฟอสฟอรัสถูกดูดซับด้วยกรวด ทราชและพีช ส่วนน้ำจากปลายกระบะที่สองมีค่าฟอสฟอรัสลดลงมากเพราะพีชต้องการใช้ฟอสฟอรัส เพื่อนำไปเป็นสารอาหารในการเจริญเติบโต สำหรับระบบบำบัดทางชีวภาพฟอสฟอรัสจะถูกดัดแปลงให้อยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟตถึงร้อยละกว่า 90 ในระบบบำบัดทางชีวภาพปกติจะกำจัดฟอสฟอรัสได้ไม่มากนัก อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 10-30 เท่านั้น (ชงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) อาจเป็นเพราะพีชและจุลินทรีย์จะมีการใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณที่ไม่มากนัก และฟอสฟอรัสสามารถรวมตัวไปเป็นผลึกฟอสเฟตได้ง่ายเมื่อรวมตัวกับเหล็ก อลูมิเนียม แคลเซียม สามารถพบได้ในธรรมชาติทั่วไป ที่สำคัญผลึกฟอสเฟตสามารถละลายน้ำได้ง่ายทำให้มีการปนเปื้อน (ละลาย) สู่น้ำเสียหรือแหล่งน้ำได้อีก ค่าฟอสฟอรัสจึงมีค่าไม่คงที่ นอกจากนี้การปลูกพีชในระบบอาจมีผลต่อการบำบัดฟอสฟอรัสอันเนื่องจากการเกิดกระบวนการทางชีวภาพที่เปลี่ยนฟอสเฟตให้เป็นสาร อนินทรีย์ เช่น ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{3-}$ ) ที่พีชสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อพีชตายลงฟอสฟอรัสก็ยังคงสะสมอยู่ในรากพีชนั้น

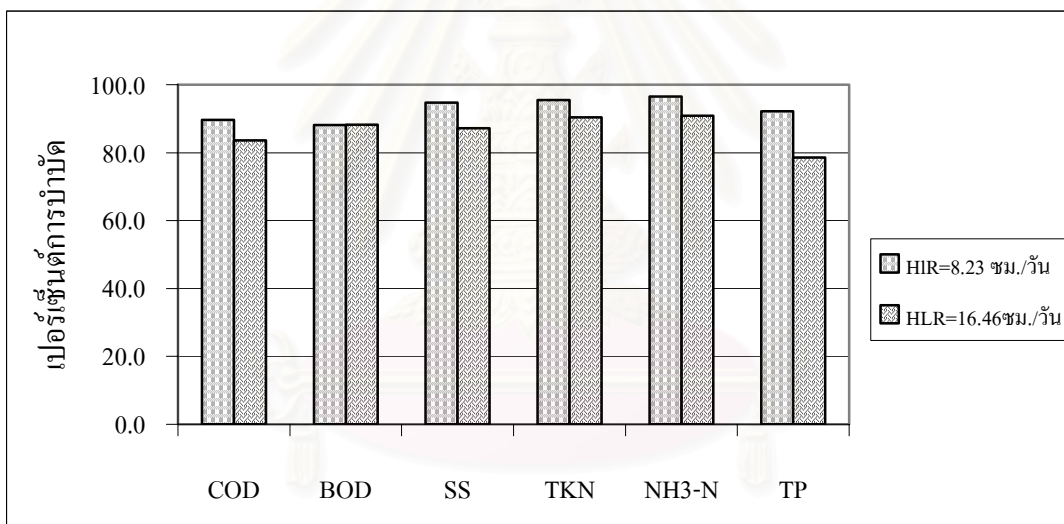
#### 4.2.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่อัตราภาระชลศาสตร์ (HLR) ต่างกัน

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียตลอดเวลาและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่อัตราภาระชลศาสตร์ต่างกันได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.16 4.17 4.18 และ 4.19

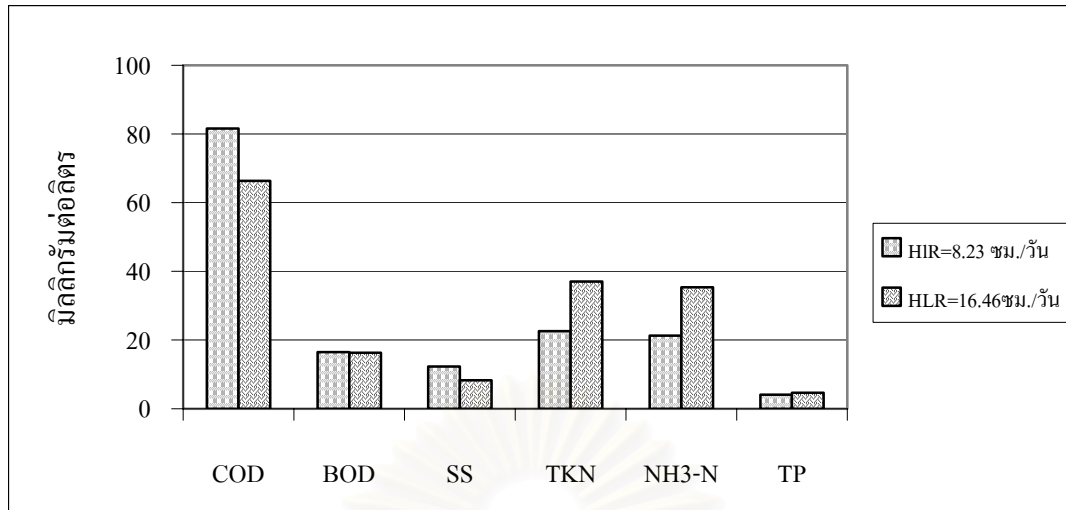
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



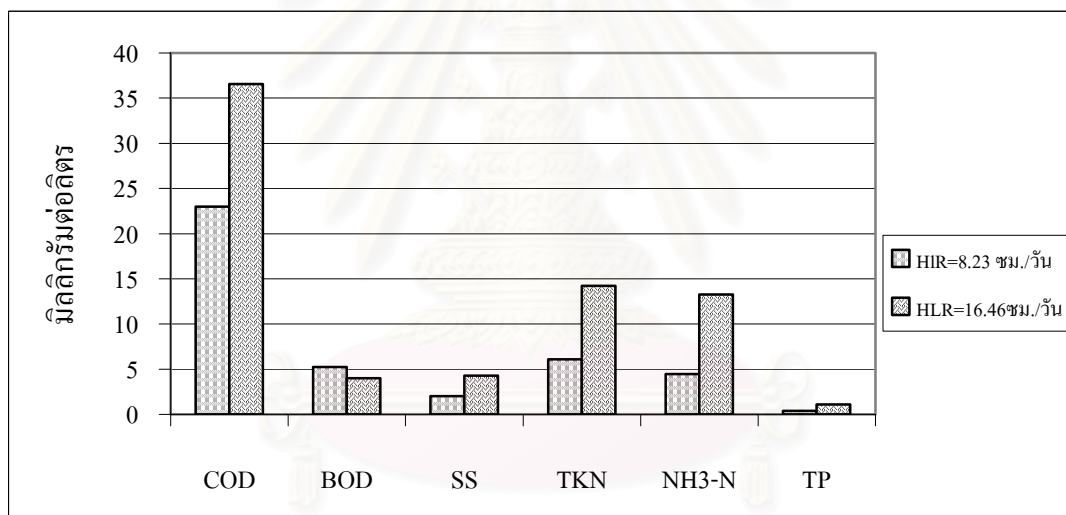
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังที่มีกรไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลาที่อัตราภาระศาสตร์ต่างกัน



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบรวมที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลาที่อัตราภาระศาสตร์ต่างกัน



รูปที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลาที่อัตราการระเหยแตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบตลอดเวลาที่อัตราการระเหยแตกต่างกัน

การทดลองแบบการป้อนน้ำเสียตลอดเวลาที่อัตราการระเหย 8.23 ชม./วัน และ 16.46 ชม./วัน สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ทั้ง 2 อัตราการระเหยโดยที่ อัตราการระเหย 8.23 ชม./วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส สูงกว่าที่ อัตราการระเหย 16.46 ชม./วัน เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 6.90 7.52 5.11 5.60 และ 13.66 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่อัตราการระเหย 8.43 ชม./วัน จะมีประสิทธิภาพการบำบัดของ บีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนีย

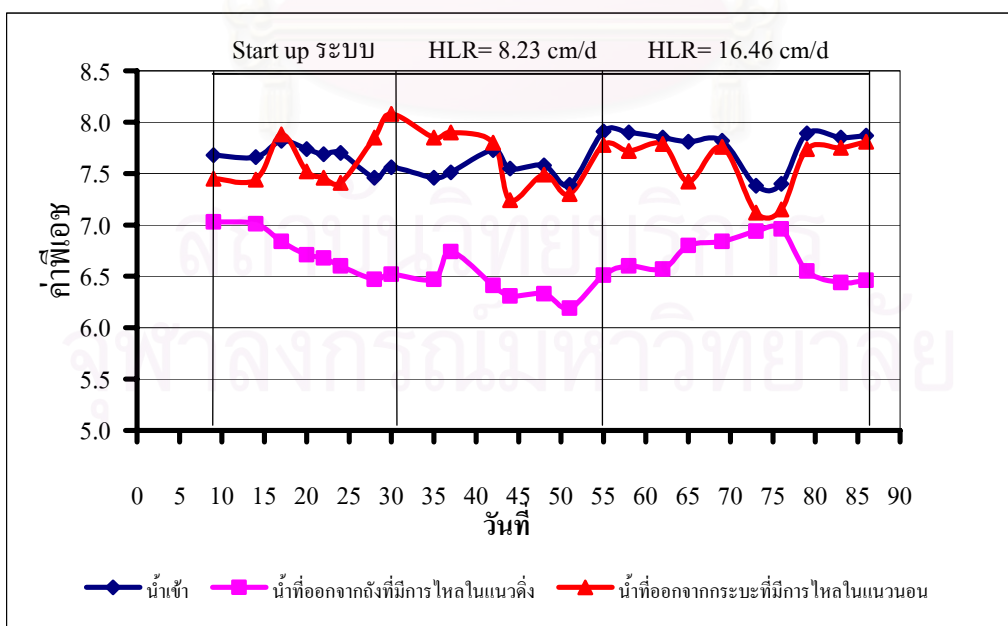
ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส มากกว่า ที่อัตราภาระชลศาสตร์ 16.46 ซม./วัน เท่ากับร้อยละ 11.36 8.12 7.56 และ 11.05 ตามลำดับ

### 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

ทำการทดลองโดยป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่อัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน (อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ 20 ลิตรต่อวัน) ซึ่งเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่และปรับเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์ เป็น 16.46 ซม./วัน (อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ 40 ลิตรต่อวัน) และเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 2 ชั่วโมง และหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ และไนโตรเจน (ทีเคเอ็นและแอมโมเนีย) ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.3.1 พีเอช

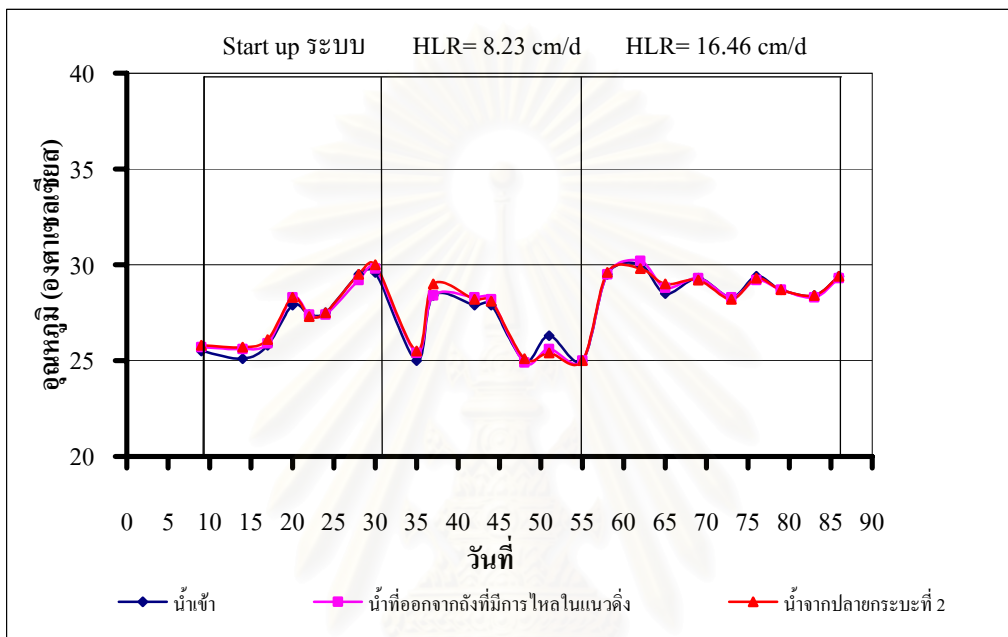
จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าสูง (เฉลี่ย 7.59) และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านถึงที่มีการไหลในแนวตั้ง จะมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (เฉลี่ย 6.42) เมื่ออัตราภาระชลศาสตร์สูงขึ้นค่าพีเอชจะมีค่าสูงขึ้น (เฉลี่ย 6.71) และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านกระบะที่มีการไหลในแนวอนน้ำเสียจะมีค่าพีเอชสูงกว่าถึงที่มีการไหลในแนวตั้ง (เฉลี่ย 7.62) และมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่ออัตราภาระชลศาสตร์สูงขึ้นค่าพีเอชก็จะลดลง (เฉลี่ย 7.54) ดังที่แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.2



รูปที่ 4.20 ค่าพีเอชของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

### 4.3.2 อุณหภูมิ

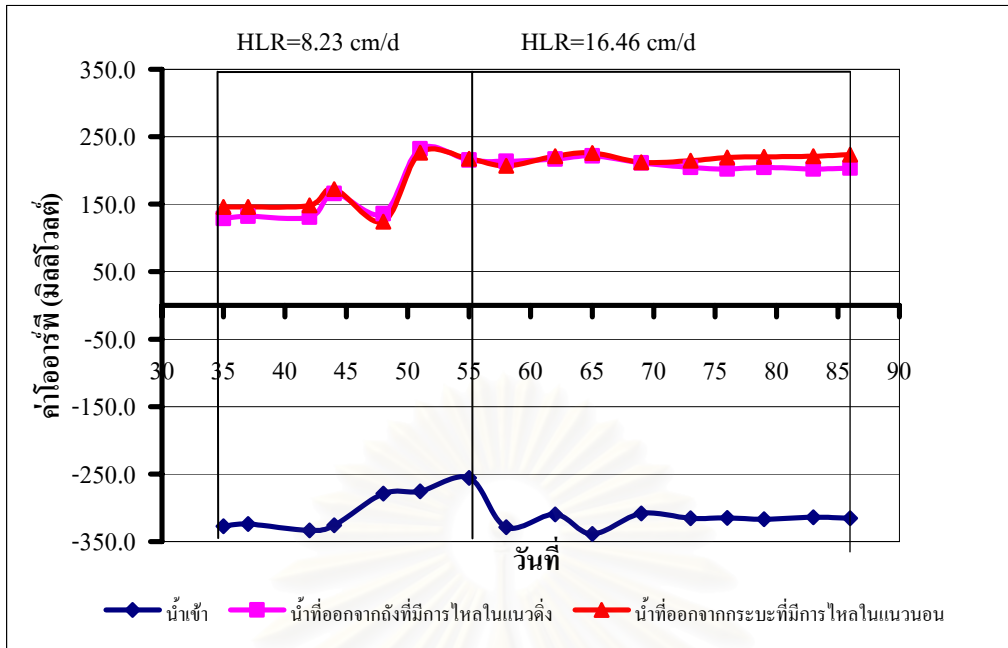
จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำเสียจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัด ส่วนน้ำเสียผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้งก็ยังมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันกับน้ำเสียจากกระบะที่มีการไหลในแนวนอน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.21 ค่าอุณหภูมิของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

### 4.3.3 โออาร์พี

จากรูปที่ 4.22 ค่าโออาร์พีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าติดลบ และเมื่อน้ำเสียที่ไหลผ่านถังที่มีการไหลในแนวตั้งออกมาจะมีค่าโออาร์พีเป็นบวก และน้ำจากกระบะก็มีค่าโออาร์พีเป็นบวกซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียเป็นแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย่อยโดย aerobic bacteria ทั้งถังที่มีการไหลในแนวตั้งและกระบะที่มีการไหลในแนวนอน ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.3



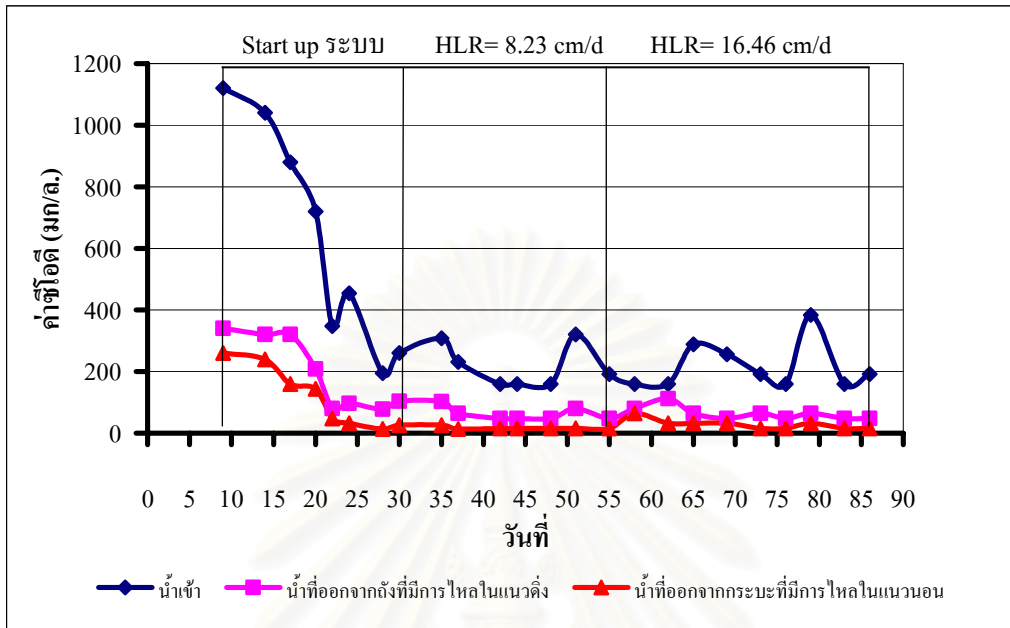
รูปที่ 4.22 ค่าไออาร์พีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

### 4.3.4 ซีโอดี

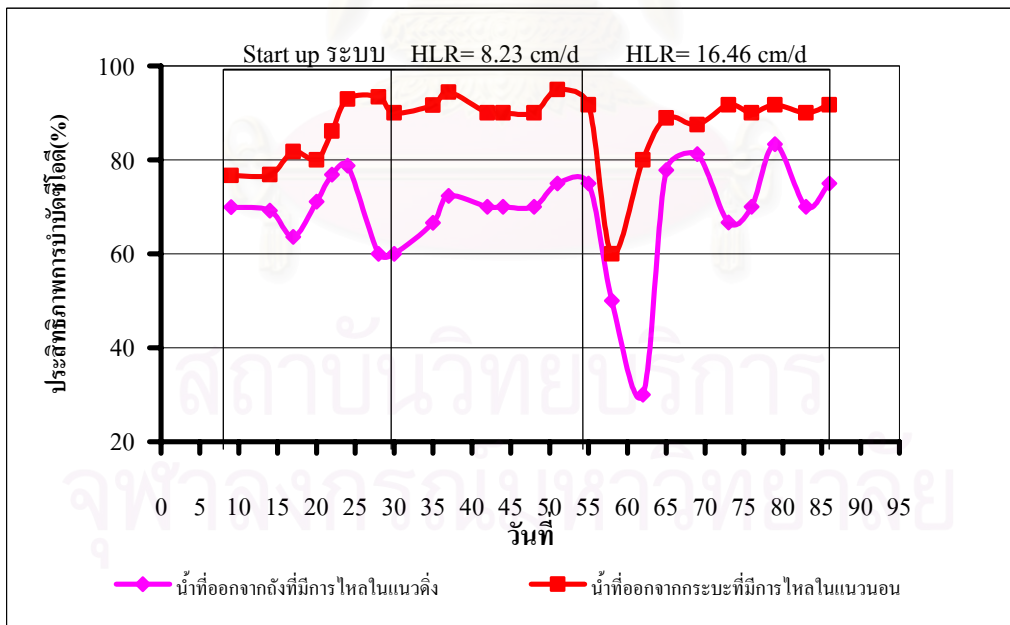
เมื่อระบบมีสภาวะคงที่ ที่อัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ค่าซีโอดีจะลดลง เหลือ 62.71 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์มากขึ้น ค่าซีโอดีของน้ำออกก็จะสูงขึ้นในช่วงแรกและ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าค่อนข้างจะคงที่ เหลือ 54.86 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับค่าซีโอดีของน้ำเสียในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนในช่วงแรกของการเดินระบบค่าซีโอดีมีค่าสูงและจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนเข้าสู่สภาวะคงที่(เหลือ 17.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์ให้มากขึ้นจากอัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน เป็น 16.46 ชม./วัน ค่าซีโอดีจะสูงขึ้น (เหลือ 22.86 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.23ซึ่งทำให้อัตราส่วน บีโอดี ต่อ ซีโอดี มีค่าลดลง

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่อัตราภาระชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน เมื่อเริ่มเดินระบบในตอนแรกประสิทธิภาพการบำบัดยังไม่คงที่ และเมื่อเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 60) และเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์มากขึ้นเป็น 16.46 ชม./วัน ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์ให้สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังที่มีการไหลในแนวตั้งแบบการให้น้ำแบบเป็นระยะมีค่าสูงขึ้นส่วนประสิทธิภาพการบำบัดของกระบอกที่มีการไหลในแนวนอน เมื่อเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพจะค่อยๆ สูงขึ้น และคงที่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่(มากกว่าร้อยละ 90 )

และเมื่อเปลี่ยนอัตราภาระชลศาสตร์ให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดี มีค่าลดลงน้อย ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งกลไกการบำบัดได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.4



รูปที่ 4.23 ค่าชีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

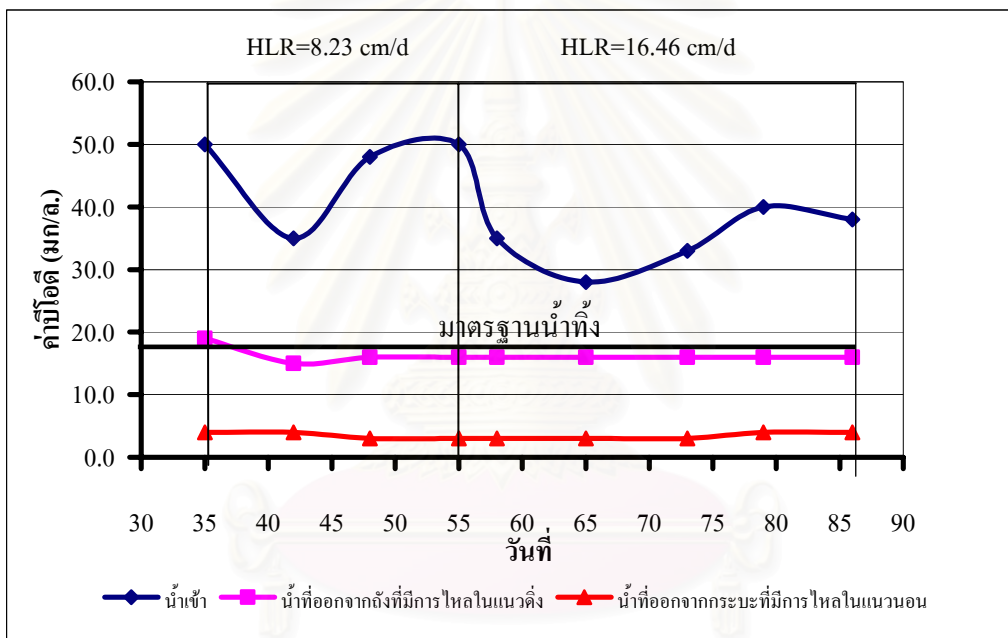


รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ



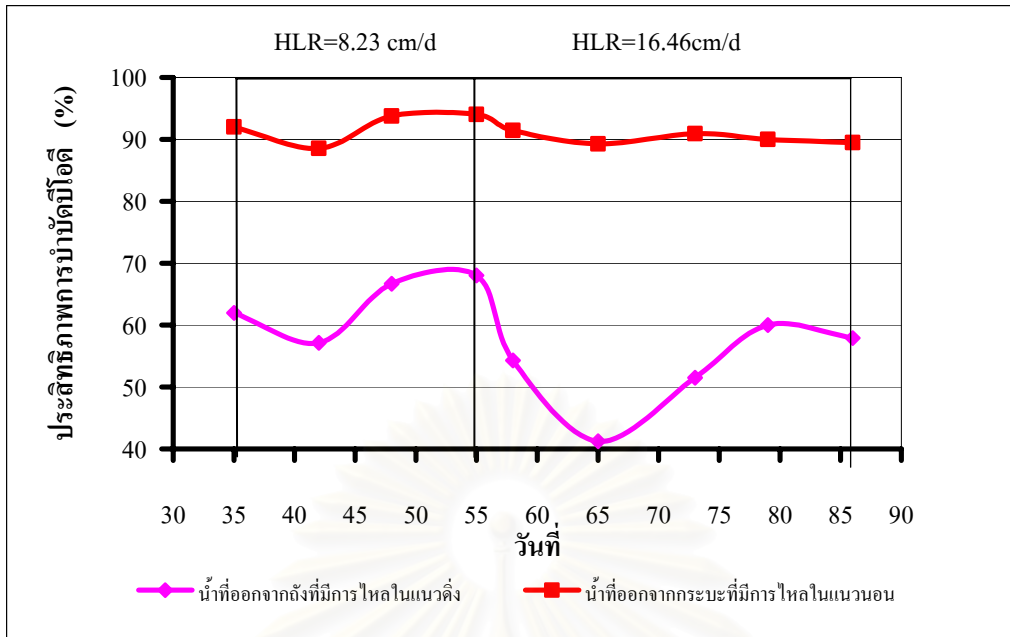
### 4.3.5 บีโอดี

ค่าบีโอดีของน้ำเสียจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งในตอนแรกมีค่าบีโอดีต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. เฉลี่ย 16.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลองแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยสูงขึ้น และค่าบีโอดีของน้ำเสียดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากกล่าวได้ว่าอัตราการระเหยไม่มีผลต่อการบำบัดบีโอดีแบบการให้น้ำเป็นระยะ สำหรับค่าบีโอดีจากกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าบีโอดีน้อยกว่า 10 มก./ล. ตลอดการทดลองและมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. ดังรูปที่ 4.25 แสดงว่าระบบบึงประดิษฐ์นี้จะสามารถบำบัดน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.25 ค่าบีโอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

จากรูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (เฉลี่ยร้อยละ 63.45) จนกระทั่งเปลี่ยนอัตราการระเหยสูงขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง(เฉลี่ยร้อยละ 52.66) เพราะว่าการเพิ่มอัตราการระเหยทำให้ระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในระบบน้อยลง สำหรับกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนประสิทธิภาพในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 92.08 เมื่อเวลามากขึ้น และมีค่าลดลง เฉลี่ยร้อยละ 89.91 เมื่อเพิ่มอัตราการระเหย และมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.2.5



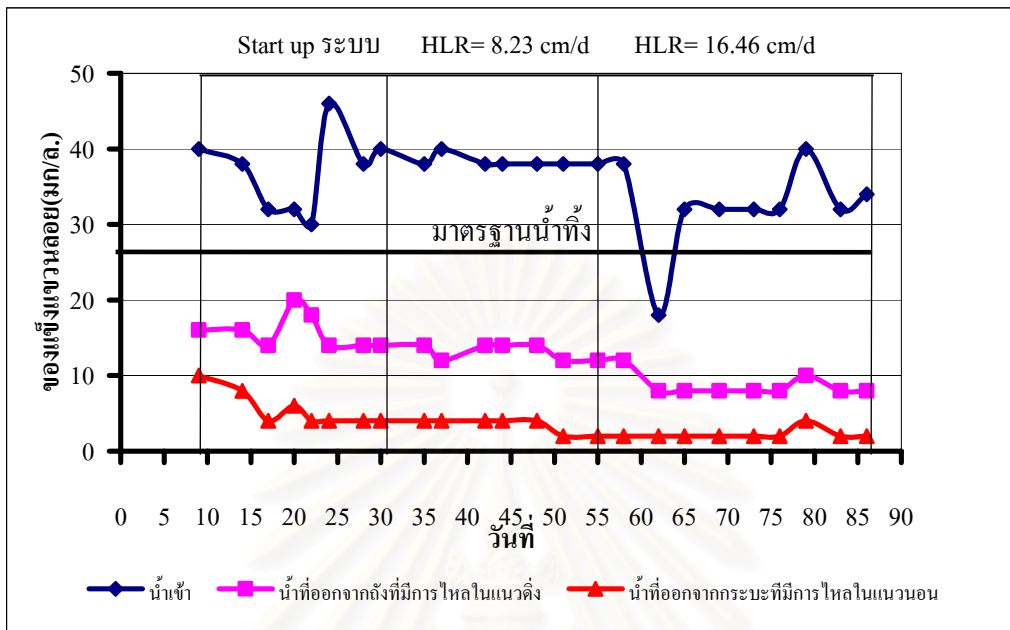
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการบำบัดปิไอดีของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

4.3.6 ของแข็งแขวนลอย

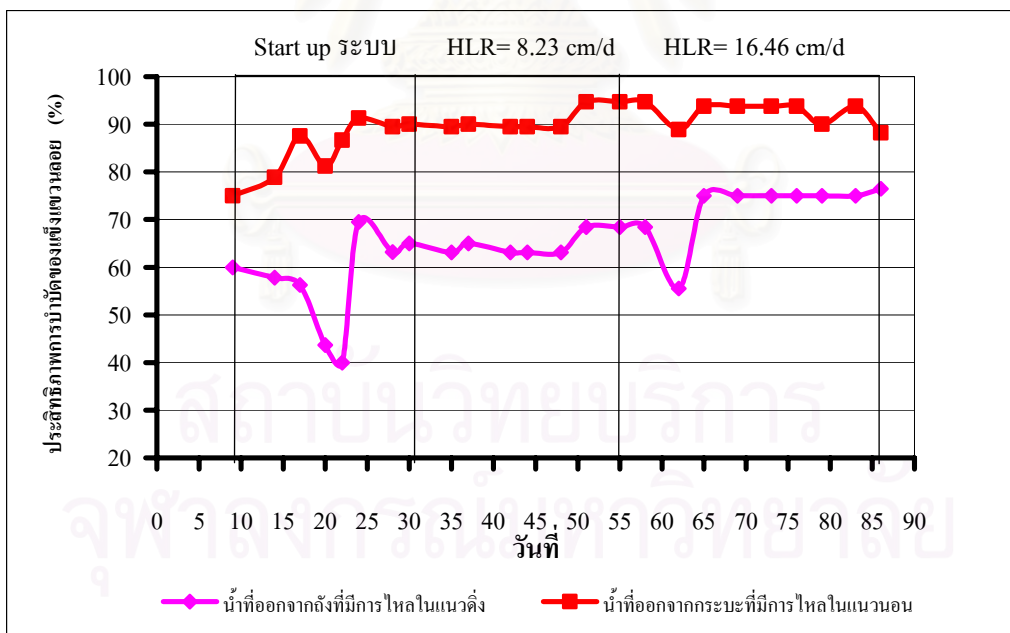
จากรูปที่ 4.27 ค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าน้อยเนื่องมาจากน้ำที่เข้าสู่ระบบเกิดการตกตะกอนในถังพักน้ำก่อนที่จะเข้าสู่ระบบ (เฉลี่ย 38.29 มิลลิกรัมต่อลิตร) สำหรับถังที่มีการไหลในแนวตั้งค่าของแข็งแขวนลอยค่อนข้างจะคงที่ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง (เฉลี่ย 13.14 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อเปลี่ยนอัตราการระเหยให้สูงขึ้น ค่าของแข็งแขวนลอยก็จะลดลงและมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. ซึ่งน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ส่วนน้ำจากกระบะที่มีการไหลในแนวนอนค่าของแข็งแขวนลอยจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น (ซึ่งน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง) เมื่ออัตราการระเหยสูงขึ้นค่าของแข็งแขวนลอยก็จะลดลงอีกเล็กน้อย ซึ่งค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในเกณฑ์ มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. เช่นเดียวกับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง

จากรูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยสำหรับถังที่มีการไหลในแนวตั้งค่อนข้างที่จะคงที่ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง (เฉลี่ยร้อยละ 64.92) และจะลดลงในช่วงที่เปลี่ยนอัตราการระเหยให้สูงขึ้นและเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้งหนึ่งประสิทธิภาพจะเริ่มเพิ่มขึ้นและคงที่(เฉลี่ยร้อยละ 75.21)ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่ออัตราการระเหยเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระบะที่มีการไหลในแนวนอนประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเดินระบบและคงที่ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน (เฉลี่ยร้อยละ

91.05) และเมื่อเพิ่มเป็น 16.46 ซม./วัน ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้น (เฉลี่ยร้อยละ 92.43) ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.2.6



รูปที่ 4.27 ค่าของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

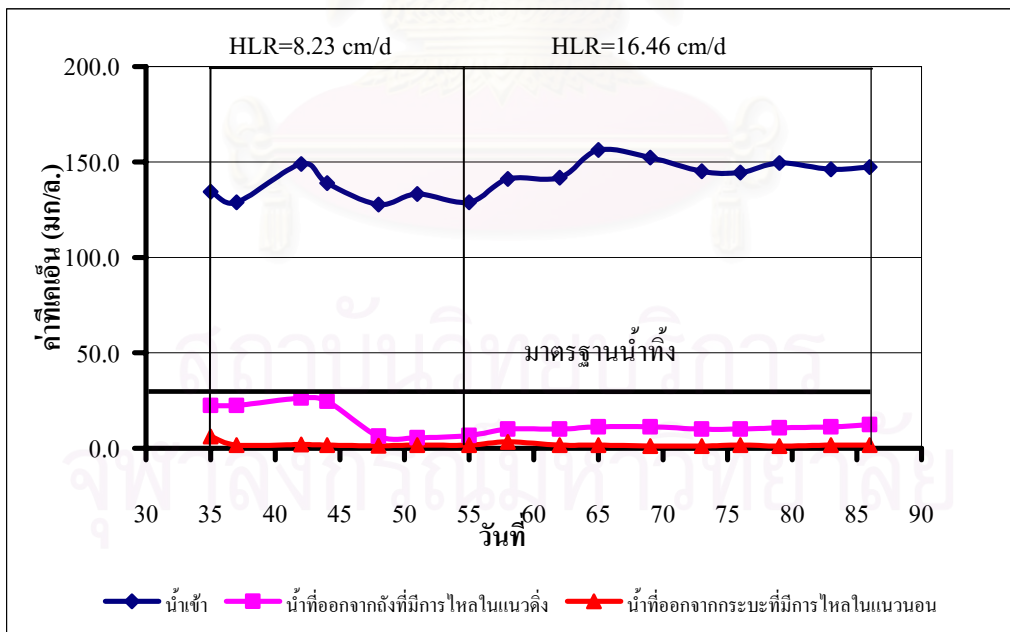


รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

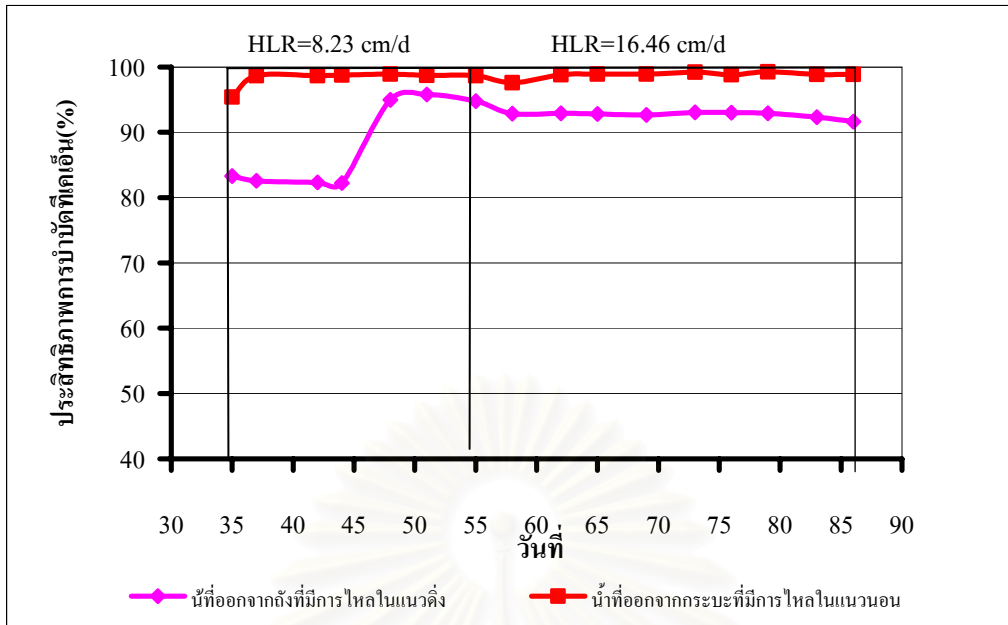
4.3.7 ทีเคเอ็น

ค่าทีเคเอ็นของน้ำที่ออกถังที่มีการไหลในแนวตั้งระยะที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5.60-26.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 16.36 มิลลิกรัมต่อลิตร)และเมื่ออัตราการระเหยศาสตร์เพิ่มขึ้นค่าทีเคเอ็นจะลดลง โดยที่ทั้ง 2 อัตราการระเหยศาสตร์ จะมีค่าทีเคเอ็น ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. ส่วนค่าทีเคเอ็นของน้ำเสียในกระเบที่มีการไหลในแนวนอนค่าทีเคเอ็นต่ำมากและค่อนข้างที่จะคงที่ ตลอดการทดลองแม้ว่าจะเปลี่ยนอัตราการระเหยศาสตร์ให้สูงขึ้นไม่มีผลต่อค่าทีเคเอ็น โดยที่ทั้ง 2 อัตราการระเหยศาสตร์จะมีค่าทีเคเอ็น ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. ดังรูปที่ 4.29

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นจากรูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพของถังที่มีการไหลในแนวตั้งเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 80) และจะสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 90) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการระเหยศาสตร์ให้มากขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นของกระเบที่มีการไหลในแนวนอน เมื่อเริ่มเดินระบบประสิทธิภาพจะสูงมากกว่าร้อยละ 90 ตลอดการทดลอง แสดงว่าอัตราการระเหยศาสตร์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นของกระเบที่มีการไหลในแนวนอนแบบการให้น้ำแบบเป็นระยะซึ่งสรุปได้ว่าการให้น้ำแบบเป็นระยะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นดีกว่าการให้น้ำแบบตลอดเวลา



รูปที่ 4.29 ค่าทีเคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

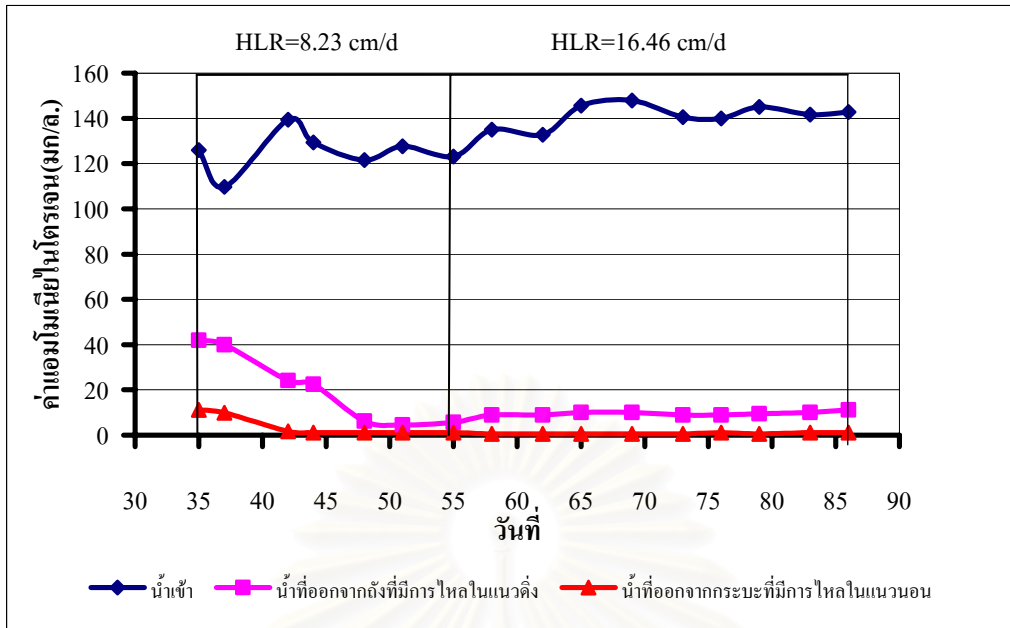


รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

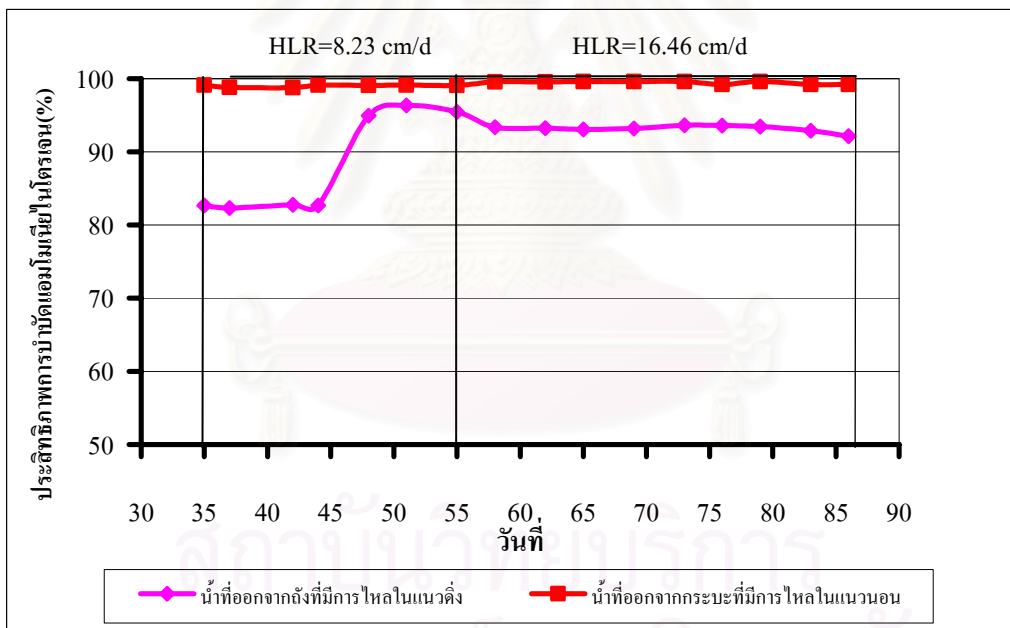
#### 4.3.8 แอมโมเนียไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.31 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อัตราการระเหย 8.23 ซม./วัน ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (เฉลี่ย 14.85 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่ออัตราการระเหยเพิ่มขึ้น ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำออกจะสูงขึ้นเล็กน้อย และมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง (เฉลี่ย 9.84 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของกระเบที่มีการไหลในแนวนอนมีแนวโน้มเหมือนกับน้ำที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งโดยกระเบที่มีการไหลในแนวนอนสามารถบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดีมากและมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในกระเบที่มีการไหลในแนวนอนตลอดการทดลองเฉลี่ยต่ำมากเท่ากับ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับร้อยละ 99.44 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการให้น้ำแบบเป็นระยะสามารถบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าการให้น้ำแบบตลอดเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ

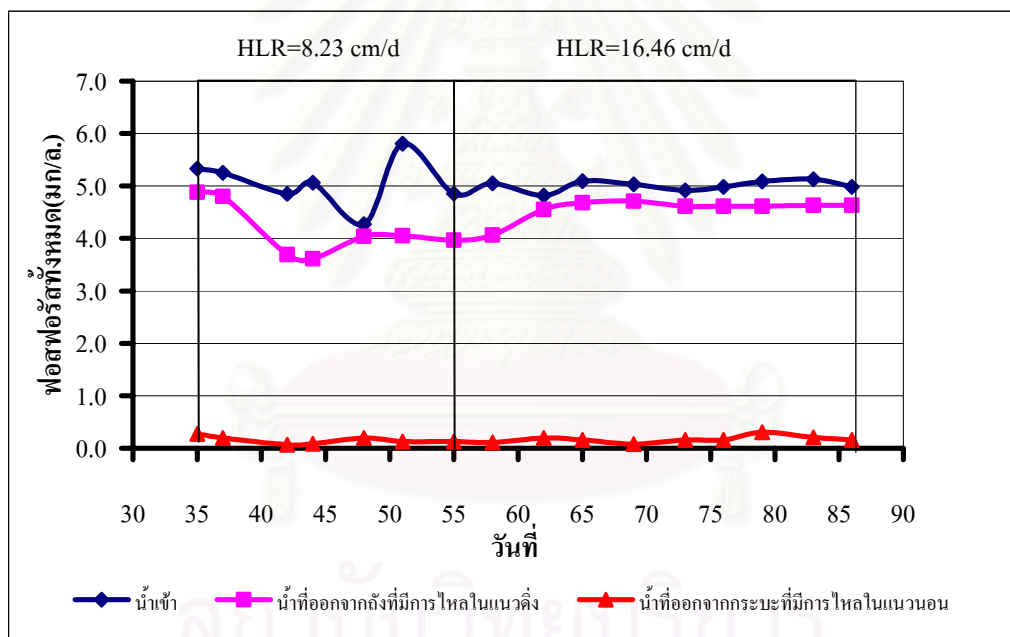


รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

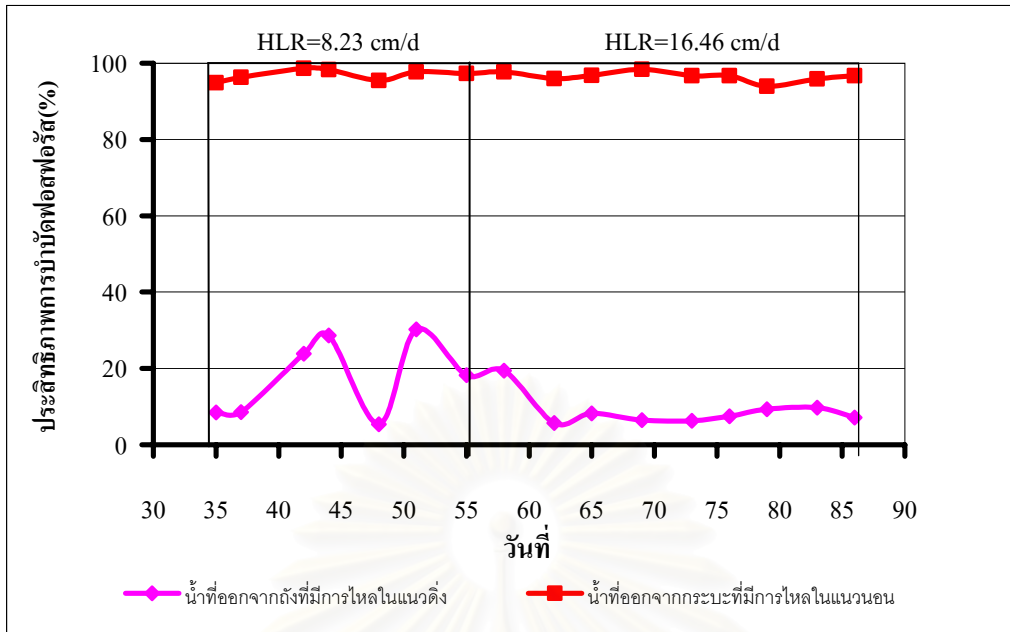
### 4.3.9 ฟอสฟอรัส

ที่อัตราการชะลวด 8.23 ซม./วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ค่าฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งจะมีค่าลดลงมาจากค่าน้ำเข้าเล็กน้อย เฉลี่ย 4.148 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนอัตราการชะลวดเพิ่มขึ้นและจะคงที่อีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (เฉลี่ย 4.640 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากกราฟจะเห็นว่าถังที่มีการไหลในแนวตั้งสามารถลด

ค่าฟอสฟอรัสได้น้อยมากเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 7.78 สำหรับระบบที่มีการไหลในแนวนอนสามารถลดค่าฟอสฟอรัสได้มากโดยพบว่าน้ำในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าฟอสฟอรัสต่ำคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 96.48 ค่าฟอสฟอรัสในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนค่อนข้างที่จะคงที่แม้ว่าจะปรับอัตราภาระชลศาสตร์เพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราภาระชลศาสตร์ไม่มีผลต่อการบำบัดฟอสฟอรัสในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนแบบการให้น้ำเป็นระยะ เพราะว่าในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนมีระยะเวลาเก็บกักมากกว่าถึงที่มีการไหลในแนวตั้งจึงเกิดการดูดติดและจับตัวกับชั้นของตัวกลางทรายและกรวด และต้นพืชยังมีส่วนสำคัญในการบำบัดฟอสฟอรัส โดยที่พืชสามารถนำฟอสฟอรัสไปใช้เป็นธาตุอาหารในการเจริญเติบโตของพืช จึงทำให้ค่าฟอสฟอรัสในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าลดลงมากกว่าค่าฟอสฟอรัสน้ำเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4.33



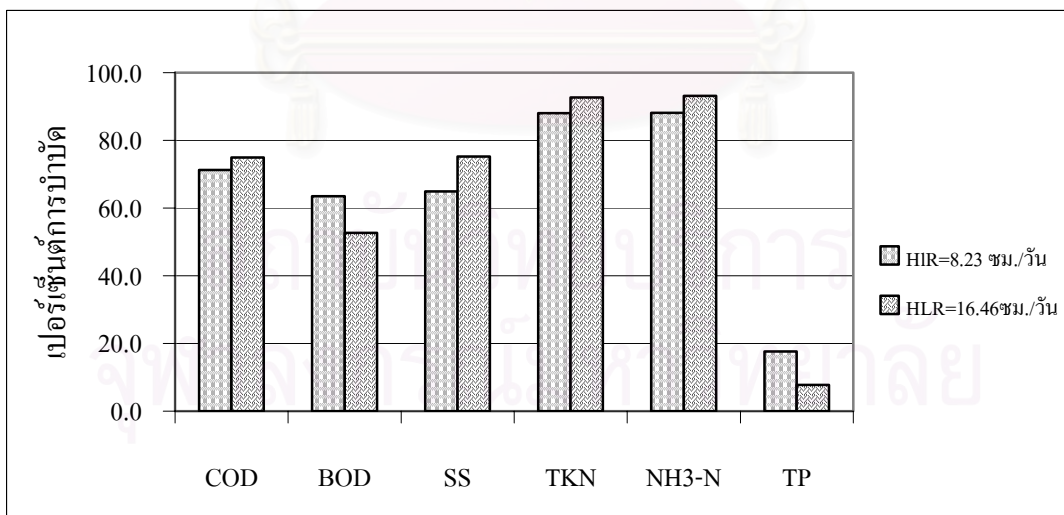
รูปที่ 4.33 ค่าฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะ



รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ

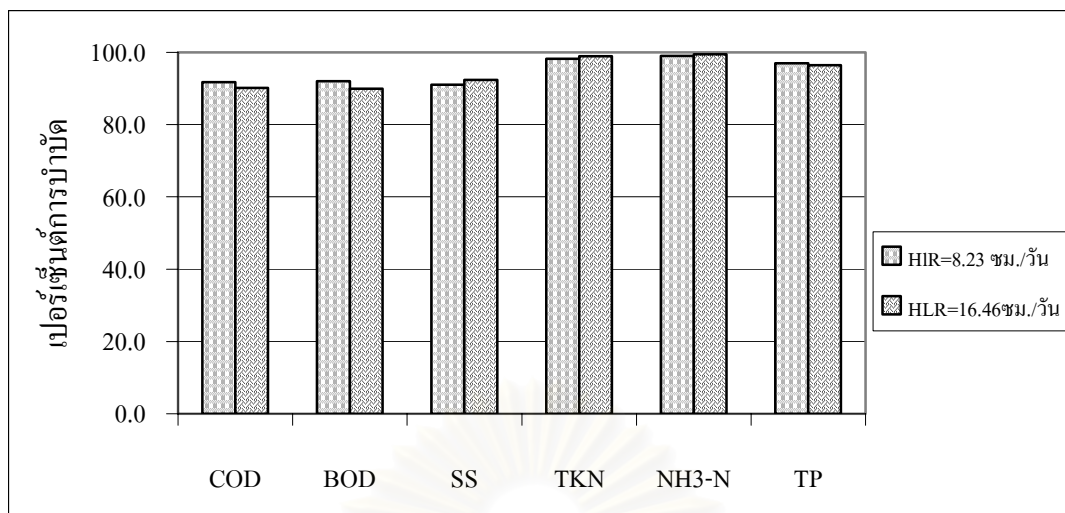
#### 4.3.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่อัตราภาระชลศาสตร์ (HLR) ต่างกัน

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่มีการป้อนน้ำเสียเป็นระยะและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่อัตราภาระชลศาสตร์ต่างกัน ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.35 4.36 4.37 และ 4.38

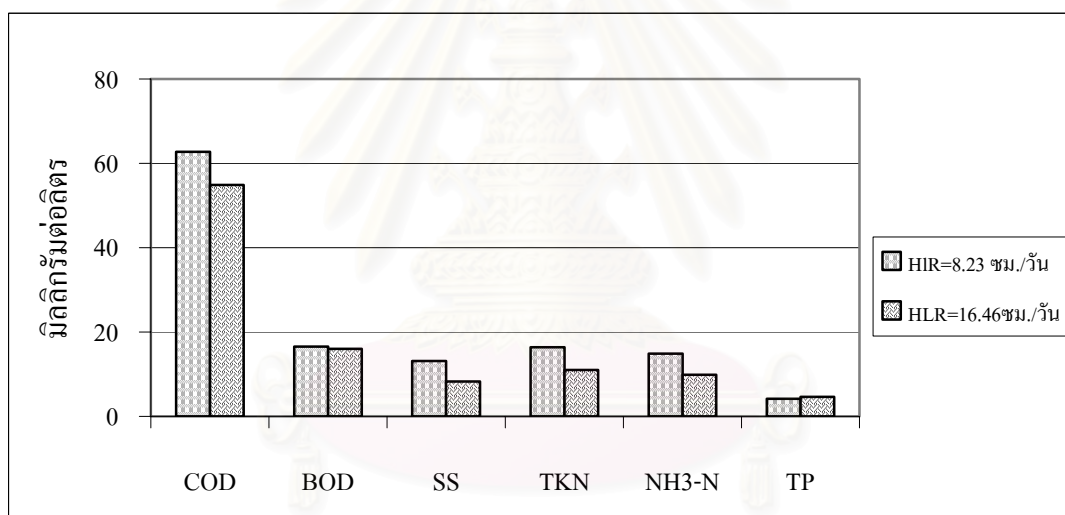


รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่อัตราภาระชลศาสตร์ต่างกัน

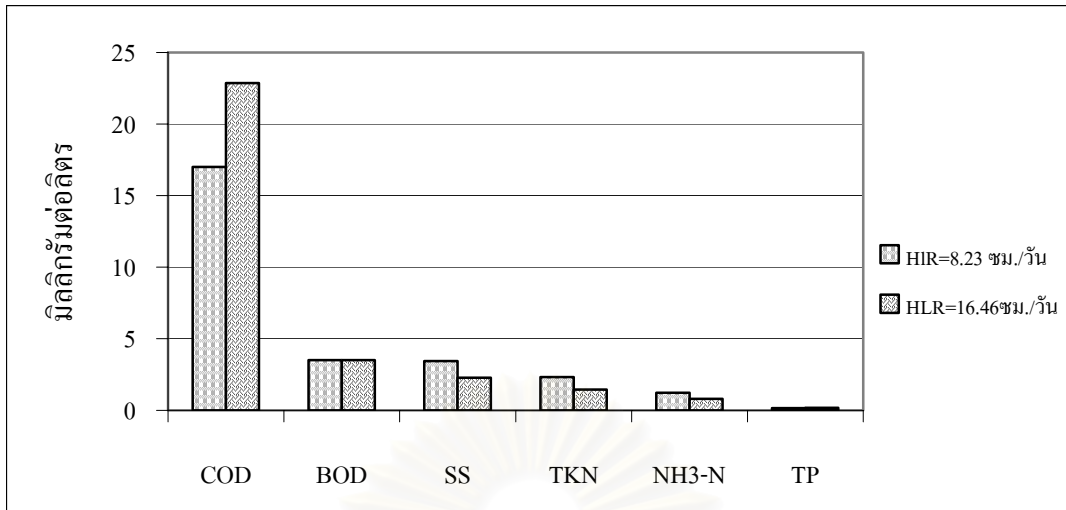




รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่อัตราภาระ  
ชลศาสตร์ต่างกัน



รูปที่ 4.37 ค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากถังที่มีการไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะ  
ที่อัตราภาระชลศาสตร์ต่างกัน



รูปที่ 4.38 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะที่อัตราการชะลศาสตร์ต่างกัน

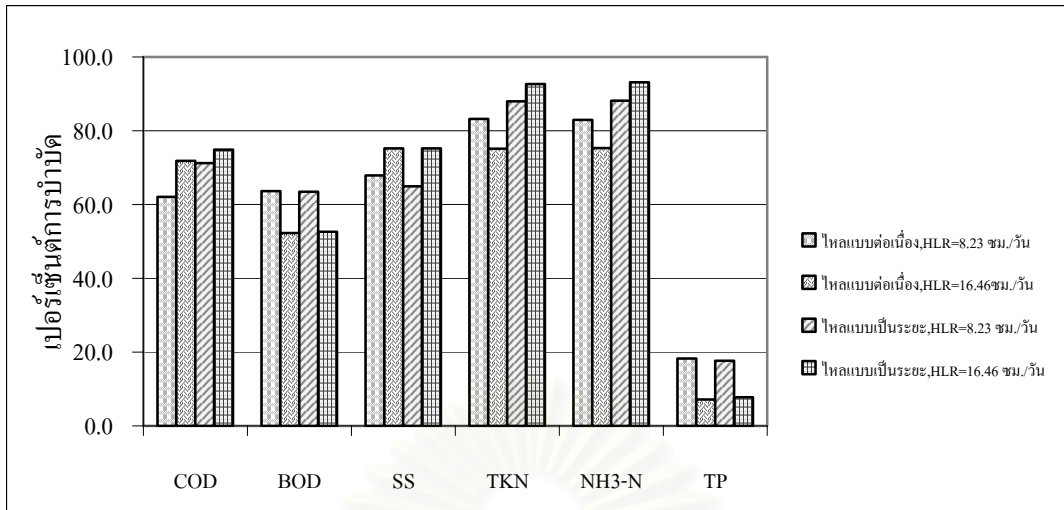
การทดลองแบบการป้อนน้ำเสียเป็นระยะทั้ง 2 อัตราการชะลศาสตร์สามารถบำบัดน้ำเสียได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน ที่อัตราการชะลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดี บีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ของระบบรวมมากกว่า ที่อัตราการชะลศาสตร์ 16.46 ชม./วัน เท่ากับร้อยละ 91.81 92.08 99.02 และ 96.67 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัด ของแจึงแวนลอยและทีเคเอ็นที่อัตราการชะลศาสตร์มากกว่า เท่ากับร้อยละ 92.43 และ 98.98 ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดของถังที่มีกรไหลในแนวตั้งที่ทำการป้อนน้ำเสียเป็นระยะพบว่าที่อัตราการชะลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน และ 16.46 ชม./วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันมากที่อัตราการชะลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ประสิทธิภาพการบำบัด บีโอดี และฟอสฟอรัส มากกว่า ที่อัตราการชะลศาสตร์ 16.46 ชม./วัน เท่ากับร้อยละ 17.67 และ 52.66 ตามลำดับ ซึ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดได้ตามมาตรฐานทุกพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา แสดงว่าระบบที่ทำการให้น้ำแบบเป็นระยะสามารถรับสารอินทรีย์ได้ดี และการให้น้ำแบบเป็นระยะยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนแก่ระบบได้มากกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดียิ่งขึ้น และยังสามารถรับภาระลศาสตร์ที่มีค่าสูงได้

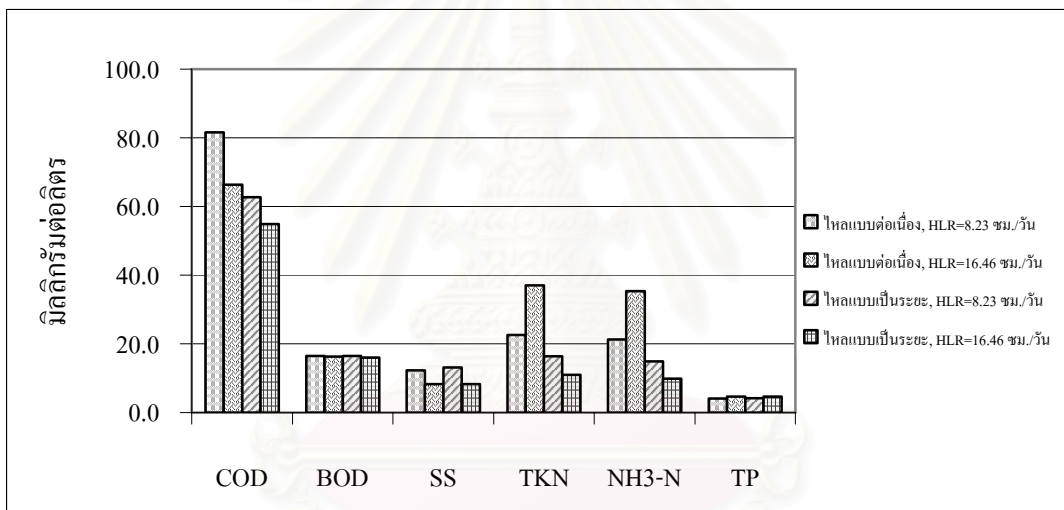
#### 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

##### 4.4.1 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีกรไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยที่ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดดังรูปที่ 4.39 และค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.40 ค่าพารามิเตอร์ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวดิ่ง

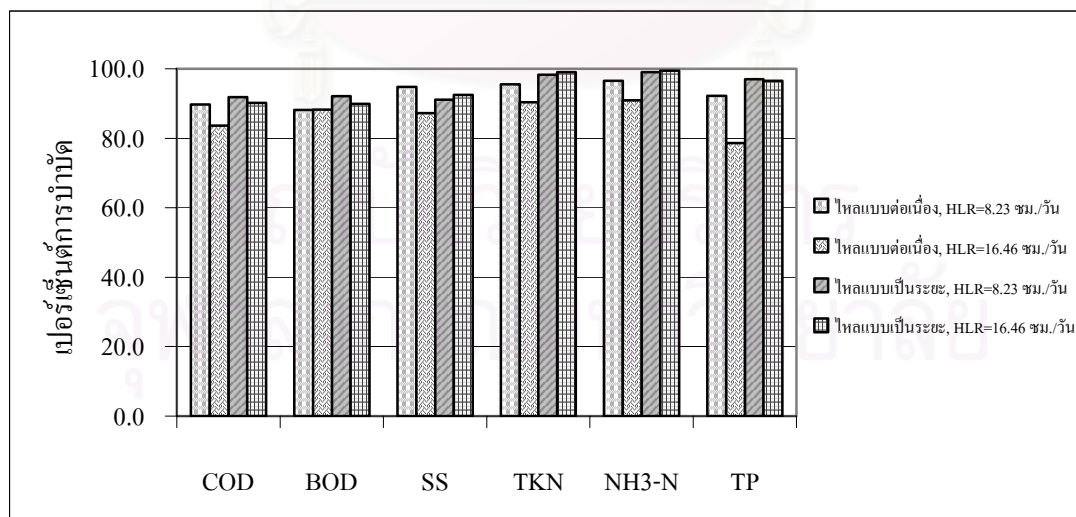
ระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบต่อเนื่องและระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ (ซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย) ใกล้เคียงกันโดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและบีโอดีอยู่ในช่วงระหว่าง ร้อยละ 66.60-83.34 และ 41.25-68.00 ตามลำดับแต่ระบบที่ทำการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน (ทีเคเอ็นและแอมโมเนีย) สูงกว่าเล็กน้อย เพราะว่าการให้น้ำแบบเป็นระยะทำให้ระบบมีออกซิเจนมากกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Roger และคณะ,1985) ส่วนการบำบัดซีโอดีนั้นส่วนใหญ่เป็นการกำจัดโดยการย่อยสลายแบบใช้อากาศ ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงถูกควบคุมโดยปริมาณอากาศที่เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Kartin และ Sabine, 1997) ดังนั้นการให้น้ำเป็นระยะจึงทำให้ปริมาณออกซิเจนเข้าสู่ระบบมากกว่าการให้น้ำ

แบบต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราภาระชลศาสตร์เดียวกัน การให้น้ำแบบเป็นระยะจะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมากกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Laber และคณะ (1996) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลได้ผิวดินชนิด แนวคิ่งโดยทดลองใช้ระบบ 2 แบบ คือระบบ A ซึ่งเป็นบึงประดิษฐ์บ่อเดียว ส่วนระบบ B เป็นบึงประดิษฐ์ 2 บ่อติดตั้งต่อเนื่องกันผลการศึกษาพบว่าระบบที่มีการให้น้ำแบบเป็นระยะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดซีโอดี บีโอดี และช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์

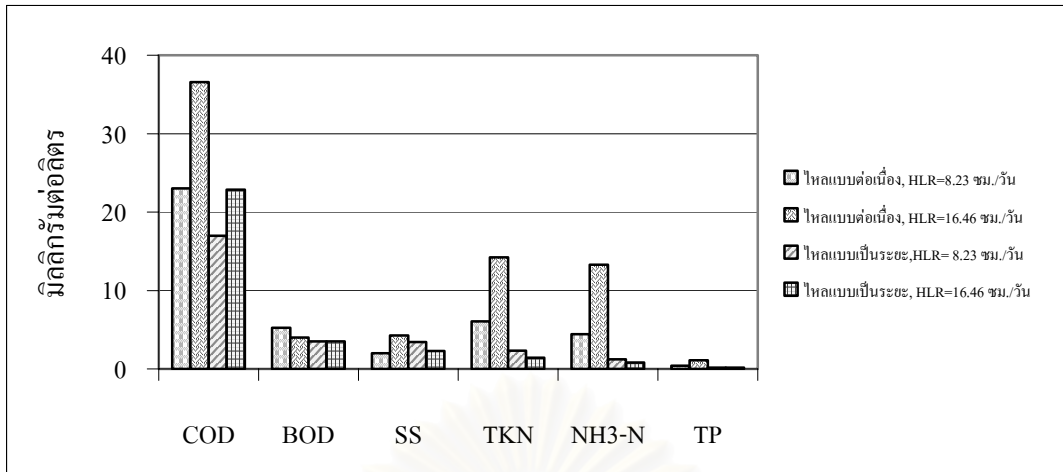
ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในถังที่มีการไหลในแนวคิ่งมีค่าน้อยเพราะกลไกการบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์เกิดจากการดูดติดผิวดักกลางและด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ฟอสฟอรัสถูกเปลี่ยนเป็นรูปไฮโดรเจนฟอสเฟตที่พืชสามารถใช้ได้ (Kadlec และ Knight,1996) ด้วยกระบวนการนี้ถังที่มีการไหลในแนวคิ่งจึงสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ แต่เนื่องจากตัวกลางในระบบเป็นกรวดและทรายและเวลาเก็บกักในถังที่มีการไหลในแนวคิ่งมีน้อย ดังนั้นการจับติดผิวจึงมีน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของถังแนวคิ่งมีค่าน้อย

**4.4.2 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช**

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยที่ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดดังรูปที่ 4.41 และค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช



รูปที่ 4.42 ค่าพารามิเตอร์ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช

จากรูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพการบำบัดรวมของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันทุกระบบ แต่ระบบที่มีการป้อนน้ำเสียแบบเป็นระยะจะบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้สูงกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่องเล็กน้อย (มากกว่าร้อยละ 9.06 และ 4.46 ตามลำดับ) และประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระเหย ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดยังสูงเหมือนเดิม แสดงว่าระบบที่มีการให้น้ำแบบเป็นระยะ สามารถรับอัตราการระเหยได้ดีกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่อง

#### 4.5 ระบบบำบัดที่ไม่มีการถ่ายเทน้ำเสียสำหรับบ้านเรือน

##### 4.5.1 รายละเอียดของระบบ

ในการออกแบบระบบสำหรับบ้านเรือนนั้น การเลือกอัตราการไหลของน้ำเสีย (อัตราการระเหย) ที่เข้าสู่ระบบนั้น พิจารณาจากค่า Evapotranspiration rate ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า evaporation rate รวมกับค่า transpiration rate โดยเมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำเสียที่กำจัดได้ใน 1 วัน ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข. มีค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 17.2 ลิตรต่อวัน และเลือกใช้ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 20 ลิตรต่อวัน เมื่อทำการทดลองแล้วระบบสามารถระเหยน้ำได้มากกว่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทุกพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งทุกพารามิเตอร์ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40 ลิตรต่อวัน โดยที่ถ้ามีน้ำที่ล้นออกจากระบบก็จะสามารถปล่อยออกสู่ธรรมชาติได้เพราะค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สรุปคือในตอนเริ่มเดินระบบใช้อัตราการไหลที่ 20 ลิตรต่อวัน (อัตราการระเหย 8.23 ชม./วัน) และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 40 ลิตรต่อวัน (อัตราการระเหย 16.46 ชม./วัน) เพื่อศึกษาความสามารถของระบบในการรับอัตราการระเหยและอัตราการ

บรรทุกสารอินทรีย์ และไนโตรเจนในน้ำเสียซึ่งอาจมีค่าแปรปรวนในน้ำเสียดิบจริงที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย

##### 4.5.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช

สำหรับการบำบัดน้ำนั้นจะใช้เพื่อในกรณีที่มีฝนตกลงมาสู่ระบบเมื่อนำไปใช้งานจริงและปริมาณน้ำเสียที่มีปริมาณมากเข้าสู่ระบบและระบบเกิดการระเหยไม่ทัน โดยที่มีกลไกการทำงานของระบบบำบัดคือ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะแล้วจะไหลเข้ามาที่ถังพักน้ำแล้วใช้ปั๊มสูบน้ำจากถังพักเข้าสู่ระบบโดยเข้าสู่ถังที่มีการไหลในแนวตั้งและปล่อยให้มีการไหลลงสู่กระบะที่มีการไหลในแนวนอนอย่างอิสระโดยแรงโน้มถ่วงของโลก และเมื่อเข้าสู่กระบะที่มีการไหลในแนวนอนแล้วน้ำเสียจะเกิดกลไกการบำบัดในกระบะและเกิดการระเหยออกสู่ธรรมชาติ โดยกลไกการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้

ซึ่งสรุปได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียได้สูงมากโดยสามารถบำบัดพารามิเตอร์ทุกพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. ทุกพารามิเตอร์ ในกรณีปกติจะไม่มีการถ่ายเทน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมแต่ในกรณีที่มีฝนตกหนักอาจมีการไหลล้นของน้ำเสียในถังออกสู่สิ่งแวดล้อม ระบบนี้สำหรับบ้านเรือนก็สามารถที่จะปล่อยน้ำเสียออกสู่ธรรมชาติได้โดยที่ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

##### 4.5.2.1 การระเหยน้ำของระบบ

สำหรับอัตราการระเหยน้ำของระบบจะทำการศึกษาโดยวัดความสูงของระดับน้ำในกระบะที่มีการไหลในแนวนอนทุกวันแล้วนำมาคำนวณหาเป็นอัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ โดยที่อัตราการระเหยน้ำเสียคิดจากการระเหยของแสงแดดรวมกับการระเหยของพืช(ต้นเข็ม) ที่เหลือเป็นการสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งในตอนเริ่มเดินระบบจะใช้อัตราการไหลที่ 20 ลิตรต่อวัน

สรุปได้ว่าในช่วงที่ใช้อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวันอัตราการระเหยน้ำเสียจากระบบแบ่งเป็น ระเหยจากแสงแดดเฉลี่ยเท่ากับ 9.91 ลิตรต่อวัน ระเหยจากต้นไม้ เฉลี่ยเท่ากับ 6.60 ลิตรต่อวัน โดยที่เหลือเป็นการสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ เฉลี่ยเท่ากับ 3.49 ลิตรต่อวัน โดยที่น้ำสูญหายไปจากระบบคิดเป็นร้อยละ 17.45 อาจเนื่องมาจากเพราะกระแสลม และค่าอัตราการระเหยของแสงแดดโดยค่า evaporation rate ที่นำมาคำนวณนั้นนำข้อมูลมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งอาจเกิดการแปรปรวนอยู่บ้างในการมาใช้กับบริเวณที่ทำการทดลองดังแสดงในสมคูลมวรูปที่ 4.43

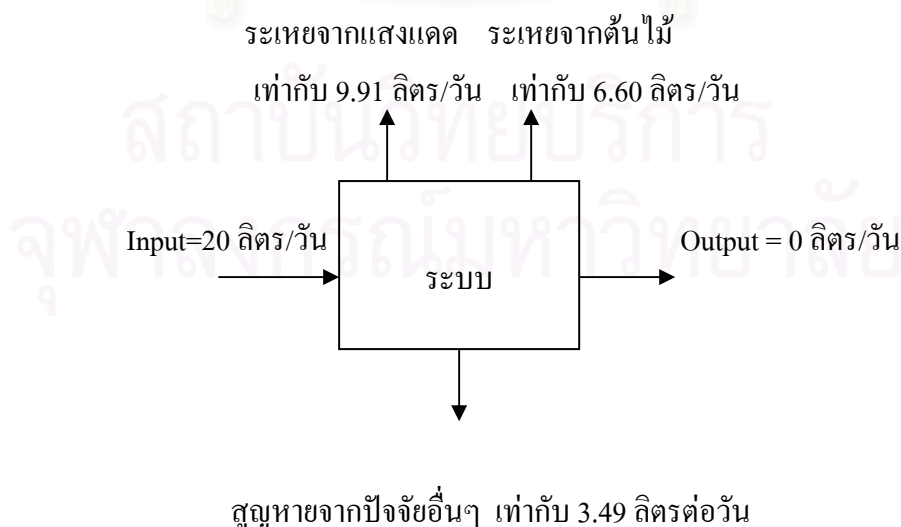
อัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ = อัตราการระเหยจากแสงแดด + อัตราการระเหยจากต้นไม้ + การสูญเสียจากปัจจัยอื่นๆ

20 ลิตรต่อวัน = 9.91 ลิตรต่อวัน + 6.60 ลิตรต่อวัน + การสูญเสียจากปัจจัยอื่นๆ

∴ ปริมาณน้ำที่ออกสู่ธรรมชาติ = อัตราการไหลเข้าระบบ - อัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ

โดยที่ค่าอัตราการระเหยจากแสงแดดคิดจากค่า evaporation rate ของกรมอุตุนิยมวิทยา ในช่วงเวลาที่ใช้อัตราการไหลเข้าสู่ระบบ 20 ลิตรต่อวัน แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าอัตราการระเหยจากแสงแดด ดังภาคผนวก ข. ส่วนค่าอัตราการระเหยจากต้นไม้จะนำค่า transpiration rate ที่ทดลองได้ ดังรายละเอียดดังภาคผนวก ซ. มาคำนวณหาค่าอัตราการระเหยน้ำจากต้นไม้ ดังรายละเอียด ในภาคผนวก ข. โดยในช่วงแรกนี้ค่าการสูญเสียจากปัจจัยอื่น คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยได้ต่อวันและหักลบกับค่าอัตราการระเหยจากแสงแดดรวมกับค่าอัตราการระเหยจากต้นไม้ เพราะค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบสามารถแบ่งได้ 3 อย่าง คืออัตราการระเหยจากแสงแดด อัตราการระเหยจากต้นไม้ และที่เหลือคือสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ ดังนั้น เมื่อรู้ ค่าอัตราการระเหยจากแสงแดด อัตราการระเหยจากต้นไม้ ก็สามารถหาค่าน้ำสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ ได้ดังสมการข้างต้น

โดยเมื่อได้อัตราการระเหยน้ำของระบบแล้วนำมาหักลบกับค่าอัตราการไหลที่เข้าสู่ระบบก็จะทำให้รู้ว่าในแต่ละวันมีน้ำเหลือในกระบะเพิ่มหรือลดเท่ากับเท่าไรเพราะว่าในกระบะยังมีพื้นที่ว่างในการเก็บกักปริมาณน้ำในกรณีที่ระเหยไม่ถึง 20 ลิตรต่อวันได้



รูปที่ 4.43 สมดุลมวลอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน

ในส่วนของอัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน จะมีปริมาณน้ำเสียที่ออกสู่ธรรมชาติ โดยที่จะคำนวณหาจากการวัดระดับความสูงของน้ำในกระบอกที่มีการไหลในแนวนอนแล้วคิดเป็นอัตราการระเหยน้ำเสียของระบบซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราการระเหยจากแสงแดดรวมกับการระเหยจากพืชและรวมกับการสูญเสียจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่ง การระเหยจากปัจจัยอื่นๆ หาได้โดยนำอัตราการระเหยน้ำเสียของระบบมาหักลบกับอัตราการระเหยจากแสงแดดและอัตราการระเหยจากต้นไม้ ดังนั้นเมื่อ นำอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบมาหักลบกับปริมาณน้ำเสียที่ระเหยได้ในระบบจะได้ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกสู่ธรรมชาติ ดังแสดงในสมคูลมวดังรูปที่ 4.44

$$\text{อัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ} = \text{อัตราการระเหยจากแสงแดด} + \text{อัตราการระเหยจากต้นไม้} + \text{อัตราการระเหยจากปัจจัยอื่นๆ}$$

$$40 \text{ ลิตรต่อวัน} = 9.91 \text{ ลิตรต่อวัน} + 6.60 \text{ ลิตรต่อวัน} + \text{การสูญเสียจากปัจจัยอื่นๆ}$$

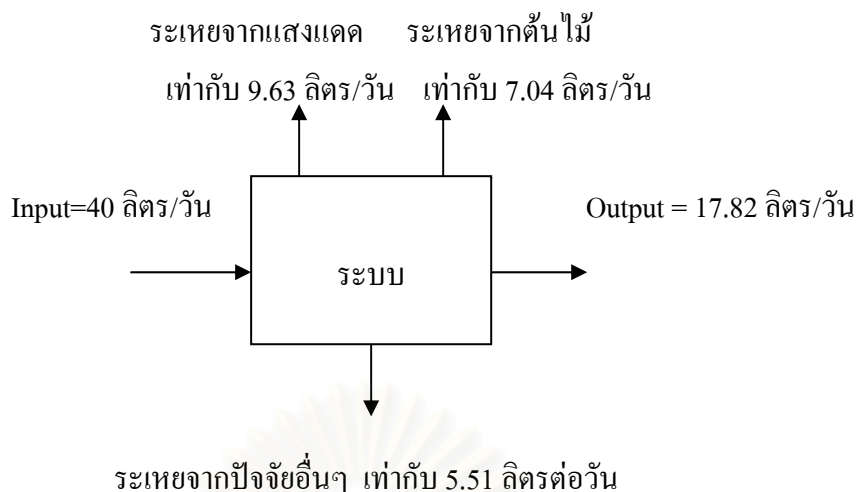
$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่ออกสู่ธรรมชาติ} = \text{อัตราการไหลเข้าระบบ} - \text{อัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ}$$

สรุปได้ว่าในช่วงที่ใช้อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวันอัตราการระเหยน้ำเสียจากระบบแบ่งเป็น ระเหยจากแสงแดดเฉลี่ยเท่ากับ 9.63 ลิตรต่อวัน ระเหยจากต้นไม้ เฉลี่ยเท่ากับ 7.04 ลิตรต่อวัน ซึ่งการระเหยจากปัจจัยอื่นๆ เฉลี่ยเท่ากับ 5.51 ลิตรต่อวัน และปล่อยออกสู่ธรรมชาติเท่ากับ 17.82 ลิตรต่อวัน ดังแสดงในสมคูลมวด ในรูปที่ 4.44

โดยที่ค่าที่นำมาคำนวณเหมือนกับช่วงที่ใช้อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน แต่ ที่ 40 ลิตรต่อวัน จะมีน้ำที่ออกสู่ระบบโดยที่ปริมาณน้ำที่ออกสู่ระบบนั้นจะหาได้โดยที่อัตราการไหลเข้าสู่ระบบ ลบกับอัตราการระเหยน้ำเสียของระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.44 สมดุลมวลอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อวัน

#### 4.5.3 การระเหยจากปัจจัยอื่น

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่ปลูกในระบบ ทั้งต้นธรรมรักษา และต้นเข็ม โดยที่อัตราการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการระเหยน้ำเสียออกสู่ระบบและข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา ค่าของอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีผลต่อการระเหยน้ำเสียออกสู่ระบบทั้งหมดได้อธิบายไว้แล้วในภาคผนวก ข.

โดยที่เมื่อเวลามากขึ้น การเจริญเติบโตของต้นไม้จะมากขึ้น ทำให้ต้นไม้มีการใช้น้ำมากขึ้น และทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำออกสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้น ส่วนอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์มีผลคือเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงทำให้เวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้อัตราการระเหยน้ำออกจากระบบน้อยกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 การศึกษาความเหมาะสมในการใช้ระบบเป็นระบบสำหรับบ้านเรือนต่างๆ ไป

ในการศึกษาความเหมาะสมในการใช้ระบบเป็นระบบสำหรับบ้านเรือนนั้น ได้แสดงไว้ในรายละเอียดการคำนวณด้านล่าง สรุปได้ว่าถ้าต้องการบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนทั่วไปต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดประมาณ 78 ตารางเมตร โดยที่ค่าบีโอดีของน้ำเสียที่เข้าในระบบมีค่าไม่เกิน 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตรและเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยบ่อเกรอะก่อนเข้าสู่ระบบ

การหาพื้นที่สำหรับบำบัดน้ำเสียสำหรับครอบครัว 1 ครอบครัว

กำหนดให้ครอบครัว 1 ครอบครัวมีคนอาศัยอยู่ 4 คน มีอัตราการใช้น้ำ 200 ลิตรต่อคนต่อวันและเกิดเป็นน้ำเสียประมาณ 80 % ของอัตราการใช้น้ำ

$$\begin{aligned}\text{ซึ่งน้ำเสียมี่ค่า} &= 200 \times (80/100) \text{ ลิตรต่อคนต่อวัน} \\ &= 160 \text{ ลิตรต่อคนต่อวัน}\end{aligned}$$

กำหนดให้ใน 1 ครอบครัวมีคนอาศัย 4 คน

$$\text{ปริมาณน้ำเสียแต่ละครอบครัว} = 160 \times 4 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

$$\text{อัตราการไหล} = 640 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

จากการทดลองใช้เวลาเก็บกักน้ำเสียของระบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.3 วัน

- จากการทดลองจะได้ขนาดความลึกของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.45 เมตร
- จากการทดลองที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน ใช้พื้นที่ เท่ากับ 2.43 ตารางเมตร ซึ่งใช้ที่ความลึกเดียวกัน เทียบอัตราการไหลสามารถหาพื้นที่ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ

$$A = (640 \times 2.43)/20$$

$$= 77.76 \text{ ตารางเมตร}$$

ดังนั้น สำหรับครอบครัว 1 ครอบครัวใช้พื้นที่ในการบำบัดน้ำเสีย ประมาณ 78 ตารางเมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่สภาวะ ที่มีการป้อนน้ำเป็นระยะ ที่อัตราการระเหยศาสตร์ เท่ากับ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน สามารถบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแฉังแวนลอย ทีเคเอ็น แอม โมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้ร้อยละ 91.81 92.08 91.05 98.27 99.02 และ 96.67 ตามลำดับ ส่วนค่าพีเอช อุณหภูมิ และไออาร์พี อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมในการทดลอง

2. สำหรับถังที่มีการไหลในแนวตั้ง สภาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ระบบที่มีการป้อนน้ำเป็นระยะ ที่อัตราการระเหยศาสตร์ เท่ากับ 8.23 เซนติเมตรต่อวัน สามารถบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแฉังแวนลอย ทีเคเอ็น แอม โมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้ร้อยละ 71.27 63.45 64.92 88.00 88.16 และ 17.64 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพรวมของระบบ มีค่าลดลงเมื่ออัตราการระเหยศาสตร์สูงขึ้น

3. ระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืชมีอัตราการระเหยน้ำเสียเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 21.68 ลิตร และอัตราการควบน้ำไปใช้ของต้นเข็มเฉลี่ย เท่ากับ 2.82 มิลลิเมตรต่อวัน โดยที่เป็นการระเหยจากต้นไม้อื่นเฉลี่ย เท่ากับ 9.74 ลิตรต่อวัน ระเหยจากแสงแดดเฉลี่ยเท่ากับ 6.92 ลิตรต่อวัน และระเหยจากปัจจัยอื่นเฉลี่ย เท่ากับ 5.02 ลิตรต่อวัน

4. จากการทดลองพบว่าอัตราการควบน้ำไปใช้ของต้นเข็มจะมีค่าสูงขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตทั้งต้นธรรมชาติ (ก้ามกุ้ง) และต้นเข็มจะสูงขึ้นด้วย เมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้ระบบสามารถระเหยน้ำเสียได้มากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำไปทดลองกับน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมอาหารเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารกับน้ำเสียชุมชน
2. ศึกษาระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดิน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด
3. ศึกษาการสะสมปริมาณของธาตุอาหารในพืช และตัวกลาง เพื่อให้ทราบถึงกลไกในการบำบัด
4. ศึกษาการใช้ตัวกลางชนิดอื่นๆ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช
5. ควรทำการทดลองโดยไม่ปลูกพืชในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. เล่ม 2. เกณฑ์การออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำของชุมชน. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สยามสเตชันเนรีซ์พหลายส์, 2539.
- เกรียงศักดิ์ ปิงกุล. การกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินแบบไหลขึ้นตามด้วยแบบไหลลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- จรีวัตร จิรจรียาเวช. การศึกษาระบบกำจัดน้ำเสียแบบก่อสร้างอยู่กับแหล่งกำเนิดโดยระบบการซึมลงดินและการระเหยโดยใช้พืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- ธีระ เกรอด. วิศวกรรมน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- บุญส่ง ไช้เกษ และคณะ. แนวทางการออกแบบระบบบำบัดและการกำจัดน้ำเสียชนิดติดกับที่สำหรับอาคารขนาดเล็กในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2534.
- ภิญญาดา เนียมคำ. การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียมูลสุกรโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวคั้งและถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- วรากร เกิดทรัพย์. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำชะมูลฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- สุชาลินี กุ่มสุก. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินเป็นระบบบำบัดขั้นที่สามในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

- สุประพล วัตตะศิริชัย. การคาดคะเนอัตราการระเหยจากผิวดินและการวิเคราะห์ค่าการระเหยจากอ่างเก็บน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
- สุภสิริ กุลวิฑิต. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- สุรพล สายพานิช. วิศวกรรมน้ำเสีย. (ม.ป.ท., ม.ป.ป.)
- โตมณัส สมประเสริฐ. การเปรียบเทียบการกำจัดไนโตรเจนโดยพืชน้ำสองชนิดในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งอยู่เหนือถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวราบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.

### ภาษาอังกฤษ

- Arif, M. 1987. Sensitivity analysis of selected methods predicting reference crop evapotranspiration. Thesis No. WA-87-4, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Bavor, H.J., D.J. and Mackersic, S. 1987. Nutrient Removal Using Shallow Lagoobsolid Matrix Macrophyte Systems, in Ready K.R. & Smith W.H.(eds). Aquatic Plants for wastewater Treatment and Resource Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Bennett, E.R. and Linstedt, K.D. 1978. Pollutional Characteristics of Stormwater Runoff. Colorado Water Resources Research Institute.
- Brix H. 1997. Do macrophytes play arole in constructed wetlands?. Water Science and Technology. 35(5):11-17
- Brix, H. 1993a. Wastewater Treatment in constructed wetlands: System design, removal processes and treatment performance. In G. A. Moshiri (ed), Constructed wetland for water quality Improvement.: 9-19. Michigan: Lewis Publisher.
- Campbell, C.S. and Ogden, M.H. 1999. Constructed Wetlands Sustainable Landscape. Canada: John Wiley & Sons.
- Christopher Dickenson. 1988. Pumping Manual, 8<sup>th</sup> Edition. London: Technical Press Limited.

- Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bisson, G. and Skusen, J. 2001. Treatment of Domestic Wastewater by Three Plant Species in Constructed Wetlands. Water Air and Soil Pollution Control. 128(3-4):285-295
- Cooper, P.F., and de Maseseneer, J. 1998. Hybrid system-What is the best way to arrange the vertical and horizontal-flowstages?. IAWQ Specialist group on use of macrophytes in water pollution control 15(December): 8-13.
- Cooper, P.E. and Boon, A.G. 1987. Aquatic Plants for wastewater Treatment and Resource Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. and Shutes, R.B.E. 1996. Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, RRC/Severn Trent.
- Cooper, P.F. and de Maseseneer, J. 1996. Hybrid system – What is the best way to arrange the vertical and horizontal-flowstages?. JAWQ Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. 15(December): 8-13
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J., and Smith, K. A. 2000. Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. Water Research. 34(9):2483-2490.
- Fly, J.C. and Humphrey, N.C.B. 1978. Assessment of the Activity of Epiphytic Bacteria. Techniques for the Study of Mixed Populations. New York: Academic Press.
- Gearheart, R.A. 1992. Metals literature Review with Integrated Site Metal Data and Implication for food Web Toxicity, Hayward, California, submitted by Woodward-Clyde Consultant and Humboldt State University.
- Gerberg, R.M., Brenner, S.R., Lyon, S.R. and Elkins, B.V. 1987. Literature Review with Integrated Site Metal Data and Implication for food Web Toxicity, Hayward Marsh, Hayward California, Submitted by Woodward Clyde Constructants and Humboldt State University.
- Gray, N.F. 1989. Biological of Wastewater treatment, Trinity College university of Dublin, Oxford University Press.
- Hammer, D.E. and Kadlec, R.h. 1983. Design Principles for Wetlands Treatment System, University of Michigan, National technical Information Service, Oklahma, U.S.A.
- House, C.H., Fredrick, D.J., Broome, S.W., and Rubin, A.R. 1996. Engineered environments : Combined treatment system design and performance. Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, Vienna.

- Howard, R., Gwyn, H., Martin, C., Mike, B., and Steve, L. 1999. The use of an engineering reed bed systems to treat leachate at monument hill landfill site, southern England. In G. Mulamoo, E.D.Mcbean, and F. Rovers (eds), Constructed wetlands for the treatment of landfill leachate. : 71-97. New York: Lewis Publisher.
- Hussain, Q. 1985. Comparison of reference crop evapotranspiration based on climatological data for Thailand Engineering. Thesis No. WA-85-35, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Johansen, H-H, and Brix, H. 1996. Design criteria for a two-stage constructed wetland. Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, Vienna.
- Juntharasri, S. 1977. Estimation of potential evapotranspiration climatological data and its relation to pan evaporation for Thailand. Thesis No. WA-85-22, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Kadlec, R.H. 1987. Nutrient Dynamics of Wetlands, in Reddy, K.R. and Smith, W.H.(eds). Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. 1996. Wetlands Treatments, Lewis Publishers, Newyork, U.S.A.
- Kartin, F., and Sabine, K. 1997. N-and COD-Removal in Vertical-Flow Systems. Water Science and Technology. 35(5):79-85.
- Kessomboon, S. 1990. Piggery Wastewater Treatment by Aquatic palnt System. Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Laber, J., Perfler, R., and Habel, R. 1996. Two stragies for advanced nitrogen elimination in vertical flow constructed wetlands. Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, Vienna.
- Metcraft and Eddy Inc. Wastewater Engineering: Treatment disposal and Reuse, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-hill, New York.
- Polprasert, C. 1989. Organic Waste Water Recycling. London: John Wiley & Sons.
- Platzer, C. 1996. Enchanced nitrogen elimination in subsurface flow artificial wetland-a multi stage concept. Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, Vienna.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. 1988. Natural system for waste management and treatment. New York: McGraw-Hill Book.



- Reedy, K.R. and Debusk, W.F., 1987. Nutrient Storage Capabilities of Aquatic and Wetland Plant, in Reddy, K.R. and Smith W.H. (eds). Aquatic Plant for Wastewater Treatment and Recovery. Orlando: Magnolia Public.
- Reed, S.C. and Brown, D. 1992. Constructed Wetland Design-The First Generation. Water Environmental Research. 64(6):776-781
- Roger, F.E.J., Roger, K.H. and Buzer, J.S. 1985. Wetlands for Wastewater Treatment, Witwatersrand University Press, Johannesburg, South Africa.
- Sanga, S., Kasem, C. and Choompol, N. 1968. Preliminary Study of evaporation and transpiration in Dry-Evergreen forest of Skaerat Experiment Station. Kasetsart University.
- Sintumongkolchai, S. 1996. Operational strategy in the removal of cadmium for constructed wetland. Master thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Stowell, R., Ludwig, R., Colt, J. and Tchobanoglous, G. 1981. Concepts in Aquatic Treatment System Design. Journal of the Environmental Engineering Division, Proceedings of the ASCE.(EE5), 16555-16569
- Syaranamual, F.J. 1986. Comparison of selected methods predicting reference crop evapotranspiration in Thailand. Thesis No. WA-86-20, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Thammarat, K., Chongrak, P., Nguyen, T.K.O., Udo, H., and Montanero, S. 2001. Potentials of Vertical-Flow Treatment in Tropical Regions. Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Thayalakumaran, N. 1994. Application of Constructed Wetland to the Treatment of a Heavy Metal Wastewater. Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B. and Harberl, R. 1998. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. London: Backhuys Publishers.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวกที่ ก. 1 ตารางบันทึกค่าพีเอชของอัตรากระชลดศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าพีเอช				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	9/12/2547	9	7.68	7.02	7.39	7.03	7.45
2	14/12/2547	14	7.66	7.02	7.40	7.01	7.44
3	17/12/2547	17	7.82	6.97	7.19	6.84	7.88
4	20/12/2547	20	7.74	6.57	7.56	6.71	7.52
5	22/12/2547	22	7.69	6.51	7.48	6.68	7.46
6	24/12/2547	24	7.70	6.48	7.43	6.60	7.41
7	28/12/2547	28	7.46	6.29	7.40	6.47	7.85
8	30/12/2547	30	7.56	6.32	7.85	6.52	8.08
9 *	4/1/2548	35	7.46	6.29	7.40	6.47	7.85
10 *	6/1/2548	37	7.51	6.41	7.30	6.74	7.90
11 *	11/1/2548	42	7.73	6.08	7.43	6.41	7.80
12 *	13/1/2548	44	7.55	6.40	7.13	6.31	7.24
13 *	17/1/2548	48	7.58	6.41	7.27	6.33	7.49
14 *	20/1/2548	51	7.39	6.15	7.20	6.19	7.30
15 *	24/1/2548	55	7.91	6.59	7.60	6.51	7.78
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			7.59	6.33	7.33	6.42	7.62

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก. 2 ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิของอัตราการระเหยศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบอกที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบอกที่ 2 การทดลองที่ 2
1	9/12/2547	9	25.5	25.9	25.7	25.7	25.8
2	14/12/2547	14	25.1	25.8	25.7	25.6	25.7
3	17/12/2547	17	25.8	26.4	26.2	25.9	26.1
4	20/12/2547	20	27.9	28.7	28.6	28.3	28.3
5	22/12/2547	22	27.4	27.2	27.4	27.4	27.3
6	24/12/2547	24	27.5	27.4	27.4	27.4	27.5
7	28/12/2547	28	29.5	28.9	29.1	29.2	29.5
8	30/12/2547	30	29.6	29.6	29.9	29.8	30.0
9 *	4/1/2548	35	25.0	25.5	24.9	25.4	25.5
10 *	6/1/2548	37	28.4	28.3	28.3	28.4	29.0
11 *	11/1/2548	42	27.9	28.0	28.7	28.3	28.2
12 *	13/1/2548	44	27.9	28.1	28.2	28.2	28.1
13 *	17/1/2548	48	25.0	24.9	25.0	24.9	25.1
14 *	20/1/2548	51	26.3	25.9	26.5	25.6	25.4
15 *	24/1/2548	55	25.0	25.1	25.0	25.0	25.0
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			26.50	26.54	26.66	26.54	26.61

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก. 3 ตารางบันทึกค่าซีไอดีของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าซีไอดี (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	9/12/2547	9	1120	420	270	340	260
2	14/12/2547	14	1040	400	240	320	240
3	17/12/2547	17	880	320	160	320	160
4	20/12/2547	20	720	272	160	208	144
5	22/12/2547	22	347	130	64	80	48
6	24/12/2547	24	454	154	32	96	32
7	28/12/2547	28	195	104	26	78	13
8	30/12/2547	30	260	104	26	104	26
9 *	4/1/2548	35	308	116	39	103	26
10 *	6/1/2548	37	231	103	26	64	13
11 *	11/1/2548	42	160	64	16	48	16
12 *	13/1/2548	44	160	64	16	48	16
13 *	17/1/2548	48	160	64	16	48	16
14 *	20/1/2548	51	320	96	32	80	16
15 *	24/1/2548	55	192	64	16	48	16
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			218.71	81.57	23.00	62.71	17.00

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก.4 ตารางบันทึกค่าของแข็งทั้งหมดของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	9/12/2547	9	40	20	6	16	10
2	14/12/2547	14	38	18	4	16	8
3	17/12/2547	17	32	18	2	14	4
4	20/12/2547	20	32	20	2	20	6
5	22/12/2547	22	30	14	2	18	4
6	24/12/2547	24	46	12	2	14	4
7	28/12/2547	28	38	12	2	14	4
8	30/12/2547	30	40	14	2	14	4
9 *	4/1/2548	35	38	12	2	14	4
10 *	6/1/2548	37	40	14	2	12	4
11 *	11/1/2548	42	38	12	2	14	4
12 *	13/1/2548	44	38	12	2	14	4
13 *	17/1/2548	48	38	12	2	14	4
14 *	20/1/2548	51	38	12	2	12	2
15 *	24/1/2548	55	38	12	2	12	2
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			38.29	12.29	2.00	13.14	3.43

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก.5 ตารางบันทึกค่าเจดาลไนโตรเจนของอัตรากระชลดศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าเจดาลไนโตรเจน(มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1 *	4/1/2548	35	134.40	28.56	11.20	22.40	6.16
2 *	6/1/2548	37	128.80	22.96	5.60	22.40	1.68
3 *	11/1/2548	42	148.96	27.02	7.28	26.32	1.96
4 *	13/1/2548	44	138.88	25.20	6.44	24.64	1.68
5 *	17/1/2548	48	127.68	23.52	5.86	6.44	1.40
6 *	20/1/2548	51	133.28	15.68	2.80	5.60	1.68
7 *	24/1/2548	55	128.80	15.12	3.36	6.72	1.68
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			134.40	22.58	6.08	16.36	2.32

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางภาคผนวกที่ ก.6 ตารางบันทึกค่าแอมโมเนียในโตรเจนของอัตราภาระชลศาสตร์

เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1 *	4/1/2548	35	134.40	28.56	11.20	22.40	6.16
2 *	6/1/2548	37	128.80	22.96	5.60	22.40	1.68
3 *	11/1/2548	42	148.96	27.02	7.28	26.32	1.96
4 *	13/1/2548	44	138.88	25.20	6.44	24.64	1.68
5 *	17/1/2548	48	127.68	23.52	5.86	6.44	1.40
6 *	20/1/2548	51	133.28	15.68	2.80	5.60	1.68
7 *	24/1/2548	55	128.80	15.12	3.36	6.72	1.68
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			125.28	21.28	4.44	14.85	1.23

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.7 ตารางบันทึกค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของอัตรากระชลดศาสตร์  
เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด(มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า การทดลองที่ 1	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1 *	4/1/2548	35	5.330	4.720	0.587	4.880	0.274
2 *	6/1/2548	37	5.250	4.640	0.517	4.800	0.194
3 *	11/1/2548	42	4.850	4.330	0.112	3.690	0.064
4 *	13/1/2548	44	5.060	3.850	0.612	3.610	0.085
5 *	17/1/2548	48	4.270	3.930	0.306	4.040	0.193
6 *	20/1/2548	51	5.806	3.693	0.422	4.049	0.129
7 *	24/1/2548	55	4.854	3.612	0.241	3.967	0.129
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			5.060	4.111	0.400	4.148	0.153

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.8 ตารางบันทึกค่าไออาร์พีของอัตราการระเหยศาสตร์เท่ากับ 8.23 ชม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าไออาร์พี (mv)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1 *	4/1/2548	35	-327.3	210.4	146.1	192.5	128.8
2 *	6/1/2548	37	-323.9	195.7	145.7	192.0	132.1
3 *	11/1/2548	42	-333.4	185.7	148.3	182.6	130.5
4 *	13/1/2548	44	-325.6	192.7	172.3	201.4	165.9
5 *	17/1/2548	48	-279.0	155.3	124.1	152.8	135.8
6 *	20/1/2548	51	-275.7	248.8	226.6	242.9	232.3
7 *	24/1/2548	55	-255.8	229.3	217.3	221.7	215.5
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			-303.0	202.6	168.6	198.0	163.0

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.9 ตารางบันทึกค่าบีโอดีของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 8.23 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าบีโอดี (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1 *	4/1/2548	35	50.0	20.0	9.0	19.0	4.0
2 *	11/1/2548	42	35.0	14.0	6.0	15.0	4.0
3 *	17/1/2548	48	48.0	16.0	3.0	16.0	3.0
4 *	24/1/2548	55	50.0	16.0	3.0	16.0	3.0
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			45.75	16.50	5.25	16.50	3.50

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก. 10 ตารางบันทึกค่าพีเอชของอัตรากระชลดศาสตร์เท่ากับ 16.46 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าพีเอช				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	7.90	6.62	7.69	6.60	7.72
2	31/1/2548	8	7.85	6.48	7.41	6.57	7.79
3*	3/2/2548	11	7.81	6.53	7.32	6.80	7.42
4*	7/2/2548	15	7.82	6.71	7.71	6.84	7.76
5*	11/2/2548	19	7.38	6.95	7.15	6.94	7.12
6*	14/2/2548	22	7.4	6.97	7.16	6.96	7.15
7*	17/2/2548	25	7.89	6.44	7.76	6.55	7.74
8*	21/2/2548	29	7.85	6.42	7.76	6.44	7.75
9*	24/2/2548	32	7.87	6.44	7.78	6.46	7.81
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			7.72	6.64	7.52	6.71	7.54

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก. 11 ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิของอัตรากระชลดศาสตร์เท่ากับ 16.46 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	29.5	29.6	29.4	29.5	29.6
2	31/1/2548	8	30.0	30.2	29.9	30.2	29.8
3*	3/2/2548	11	28.5	28.7	29.1	28.8	29.0
4*	7/2/2548	15	29.3	29.4	29.3	29.3	29.2
5*	11/2/2548	19	28.3	28.4	28.3	28.3	28.2
6*	14/2/2548	22	29.4	29.3	29.3	29.2	29.3
7*	17/2/2548	25	28.7	28.6	28.7	28.7	28.7
8*	21/2/2548	29	28.4	28.3	28.3	28.3	28.4
9*	24/2/2548	32	29.4	29.3	29.4	29.3	29.4
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			28.9	28.9	28.9	28.8	28.9

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก. 12 ตารางบันทึกค่าซีไอดีของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 16.46 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าซีไอดี (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	160	112	64	80	64
2	31/1/2548	8	160	96	64	112	32
3*	3/2/2548	11	288	64	48	64	32
4*	7/2/2548	15	256	48	32	48	32
5*	11/2/2548	19	192	64	32	64	16
6*	14/2/2548	22	160	48	32	48	16
7*	17/2/2548	25	384	144	48	64	32
8*	21/2/2548	29	160	48	32	48	16
9*	24/2/2548	32	192	48	32	48	16
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			233.14	66.29	36.57	54.86	22.86

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.13 ตารางบันทึกค่าของแข็งทั้งหมดของอัตราภาระชลศาสตร์

เท่ากับ 16.46 ชม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แหวดิ่ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แหวดิ่ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	38	12	2	12	2
2	31/1/2548	8	18	8	4	8	2
3*	3/2/2548	11	32	8	4	8	2
4*	7/2/2548	15	32	8	4	8	2
5*	11/2/2548	19	32	8	4	8	2
6*	14/2/2548	22	32	8	4	8	2
7*	17/2/2548	25	40	10	6	10	4
8*	21/2/2548	29	32	8	4	8	2
9*	24/2/2548	32	34	8	4	8	2
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			33.43	8.29	4.29	8.29	2.29

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางภาคผนวกที่ ก.14 ตารางบันทึกค่าเจดาคไนโตรเจนของอัตราระยะชลศาสตร์

เท่ากับ 16.46 ชม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าเจดาคไนโตรเจน(มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แหวดิ่ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แหวดิ่ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	141.12	63.84	3.36	10.08	3.36
2	31/1/2548	8	141.68	42.56	3.36	10.08	1.68
3 *	3/2/2548	11	156.24	41.44	16.24	11.20	1.68
4 *	7/2/2548	15	152.32	40.32	17.36	11.20	1.12
5 *	11/2/2548	19	145.04	33.04	17.36	10.08	1.12
6 *	14/2/2548	22	144.48	33.04	11.76	10.08	1.68
7 *	17/2/2548	25	149.52	41.44	12.88	10.64	1.12
8 *	21/2/2548	29	146.16	34.72	11.76	11.2	1.68
9 *	24/2/2548	32	147.28	35.28	12.28	12.32	1.68
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			148.72	37.04	14.23	10.96	1.44

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.15 ตารางบันทึกค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของอัตราภาระชลศาสตร์  
เท่ากับ 16.46 ชม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	134.96	62.16	2.80	8.96	0.56
2	31/1/2548	8	132.72	40.32	2.80	8.96	0.56
3 *	3/2/2548	11	145.60	39.20	15.68	10.08	0.56
4 *	7/2/2548	15	147.84	38.64	16.24	10.08	0.56
5 *	11/2/2548	19	140.56	31.36	16.24	8.96	0.56
6 *	14/2/2548	22	140.00	31.36	10.64	8.96	1.12
7 *	17/2/2548	25	145.04	39.76	11.76	9.52	0.56
8 *	21/2/2548	29	141.68	33.04	10.64	10.08	1.12
9 *	24/2/2548	32	142.80	34.16	11.76	11.20	1.12
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			143.36	35.36	13.28	9.84	0.80

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.16 ตารางบันทึกค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของอัตรากระชลดศาสตร์  
เท่ากับ 16.46 ชม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด(มก./ล.)				
			จุดที่1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แวนดิ่ง การทดลองที่1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แวนดิ่ง การทดลองที่2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่2
1	27/1/2548	4	5.048	4.322	0.241	4.064	0.112
2	31/1/2548	8	4.822	4.580	0.258	4.548	0.193
3 *	3/2/2548	11	5.096	4.725	0.838	4.677	0.161
4 *	7/2/2548	15	5.032	4.709	1.096	4.709	0.080
5 *	11/2/2548	19	4.919	4.612	0.983	4.612	0.161
6 *	14/2/2548	22	4.983	4.661	1.000	4.612	0.161
7 *	17/2/2548	25	5.085	4.661	1.419	4.612	0.306
8*	21/2/2548	29	5.129	4.677	1.209	4.629	0.209
9*	24/2/2548	32	4.983	4.645	1.016	4.629	0.161
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			5.032	4.670	1.080	4.640	0.177

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.17 ตารางบันทึกค่าไออาร์พีของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 16.46 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าไออาร์พี (mv)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	27/1/2548	4	-328.7	184.5	207.0	203.5	213.8
2	31/1/2548	8	-309.6	232.5	221.1	229.2	216.9
3 *	3/2/2548	11	-338.4	229.2	225.9	229.1	221.7
4 *	7/2/2548	15	-308.4	227.4	212.4	216.4	211.3
5 *	11/2/2548	19	-315.3	234.5	214.6	230.4	204.6
6 *	14/2/2548	22	-314.8	233.8	219.5	229.9	202.3
7 *	17/2/2548	25	-316.7	231.5	220.3	231.4	204.5
8 *	21/2/2548	29	-313.8	229.8	221.3	229.4	202.3
9*	24/2/2548	32	-315.3	227.7	223.4	228.9	203.5
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			-317.53	230.56	219.63	227.93	207.17

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.18 ตารางบันทึกค่าบีโอดีของอัตราภาระชลศาสตร์เท่ากับ 16.46 ซม./วัน

เก็บครั้งที่	วันที่	จำนวนวัน	ค่าบีโอดี (มก./ล.)				
			จุดที่ 1 น้ำเข้า	จุดที่ 2 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 1	จุดที่ 3 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 1	จุดที่ 4 น้ำจากถัง แนวตั้ง การทดลองที่ 2	จุดที่ 5 น้ำจากปลาย กระบะที่ 2 การทดลองที่ 2
1	31/1/2548	4	35.0	19.0	4.0	16.0	3.0
2 *	3/2/2548	11	28.0	16.0	4.0	16.0	3.0
3 *	11/2/2548	19	33.0	17.0	4.0	16.0	3.0
4 *	17/2/2548	25	40.0	16.0	4.0	16.0	4.0
5*	24/2/2548	32	38.0	16.0	4.0	16.0	4.0
ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงที่			34.75	16.25	4.00	16.00	3.50

หมายเหตุ : \* คือค่าที่วิเคราะห์ในสภาวะคงที่

การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.19 ตารางบันทึกอัตราความสูงของคันเข็ม (การทดลองที่ 1 แบบน้ำไหลเข้า ตลอดเวลา)

คันที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่1 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราภาระ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 1 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราภาระ ชลศาสตร์ 16.46ชม./ วัน ของ กระบะที่ 1 (ชม.) (24/02/48)	คันที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่1 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราภาระ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 1 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราภาระ ชลศาสตร์ 16.46ชม./ วัน ของ กระบะที่ 1 (ชม.) (24/02/48)
1	30.0	36.1	37.0	24	29.0	29.3	30.3
2	24.0	28.0	28.5	25	24.0	25.0	27.8
3	24.0	25.0	25.8	26	23.0	27.0	29.1
4	26.0	28.0	28.5	27	23.0	28.0	35.0
5	25.0	26.0	27.0	28	22.0	24.0	30.0
6	23.0	24.0	24.0	29	24.0	24.3	28.5
7	27.0	27.3	28.0	30	20.0	22.8	23.4
8	26.0	27.3	30.1	31	24.0	25.0	26.0
9	21.0	28.5	31.1	32	28.0	34.0	36.0
10	30.0	31.3	33.2	33	22.0	22.3	23.0
11	21.0	21.0	24.5	34	26.0	30.0	33.0
12	22.0	23.3	28.0	35	23.0	26.0	27.0
13	20.0	20.8	25.8	36	19.0	22.0	22.5
14	23.0	24.0	25.0	37	23.0	27.0	31.0
15	24.0	25.5	26.0	38	19.0	20.0	22.0
16	20.0	21.5	23.0	39	22.0	25.3	26.0
17	26.0	27.0	29.0	40	17.0	17.5	19.0
18	24.0	24.1	25.1	41	27.0	27.3	28.0
19	24.0	24.1	25.3	42	26.0	33.0	35.0
20	27.0	27.3	29.0	43	25.0	26.0	28.0
21	21.0	22.0	27.0	44	25.0	27.0	27.8
22	22.0	22.1	28.0	45	30.0	36.0	37.0
23	19.0	21.0	25.0				

ตารางภาคผนวกที่ ก.20 ตารางบันทึกอัตราความสูงของต้นเข็ม (การทดลองที่ 1 แบบน้ำไหลเข้า ตลอดเวลา)

ต้นที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตรากระ ชลดศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 2 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายอัตรา การชลด ศาสตร์16.46 ชม./วัน ของ กระบะที่ 2 (ชม.) (24/02/48)	ต้นที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตรากระ ชลดศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 2 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายอัตรา การชลด ศาสตร์16.46 ชม./วัน ของ กระบะที่ 2 (ชม.) (24/02/48)
1	19.0	20.0	25.0	24	22.0	22.5	23.0
2	22.0	28.0	29.2	25	22.0	22.8	23.5
3	21.0	26.5	27.0	26	34.0	37.3	41.3
4	20.0	21.5	26.2	27	20.0	22.8	24.0
5	27.0	30.5	32.0	28	23.0	23.5	26.0
6	25.0	27.0	29.0	29	19.0	19.5	19.8
7	25.0	27.5	32.0	30	17.0	17.4	18.8
8	27.0	27.3	28.5	31	30.0	35.5	38.6
9	29.0	29.3	32.0	32	29.0	31.0	32.0
10	24.0	24.3	25.0	33	22.0	28.0	29.6
11	25.0	27.0	28.5	34	30.0	31.0	31.8
12	29.0	32.0	36.0	35	26.0	27.0	29.3
13	21.0	22.9	32.8	36	26.0	31.0	35.4
14	26.0	28.5	33.0	37	26.0	32.3	36.0
15	27.0	27.4	29.0	38	23.0	33.0	36.0
16	24.0	24.4	27.0	39	28.0	32.0	36.3
17	21.0	27.1	34.0	40	20.0	23.0	32.0
18	29.0	29.3	29.8	41	27.0	27.3	28.0
19	20.0	24.9	28.0	42	26.0	26.5	27.2
20	28.0	28.5	31.0	43	25.0	32.0	33.3
21	26.0	28.5	34.0	44	25.0	30.5	33.3
22	20.0	22.0	29.0	45	30.0	30.3	36.4
23	27.0	32.0	32.3				

ตารางภาคผนวกที่ ก.21 ตารางบันทึกอัตราการความสูงของคันเข็ม (การทดลองที่ 2 แบบน้ำเข้า2ชั่วโมงหยุด2 ชั่วโมง)

คันที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่1 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 1 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 16.46ชม./ วัน ของ กระบะที่ 1 (ชม.) (24/02/48)	คันที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่1 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 1 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 16.46ชม./ วัน ของ กระบะที่ 1 (ชม.) (24/02/48)
1	21.0	23.2	25.0	24	30.0	33.1	34.5
2	26.0	27.6	28.5	25	22.0	27.0	28.1
3	25.0	31.0	32.0	26	20.0	21.0	22.3
4	22.0	22.4	24.5	27	28.0	28.5	32.0
5	22.0	24.2	25.0	28	25.0	26.2	27.5
6	27.0	28.1	29.4	29	28.0	31.1	33.0
7	25.0	26.0	27.0	30	26.0	26.4	27.3
8	25.0	26.0	29.5	31	20.0	21.0	23.1
9	24.0	24.8	32.0	32	22.0	27.0	28.3
10	25.0	29.0	33.4	33	20.0	23.0	24.1
11	22.0	24.0	25.5	34	20.0	21.5	22.0
12	22.0	22.5	24.5	35	22.0	22.4	23.4
13	26.0	30.9	31.3	36	30.0	32.0	32.8
14	28.0	28.7	33.0	37	20.0	22.0	24.0
15	23.0	24.0	25.3	38	29.0	29.4	30.5
16	22.0	25.8	28.0	39	15.0	16.5	17.0
17	28.0	28.8	30.3	40	28.0	31.0	32.0
18	27.0	38.0	39.3	41	26.0	26.4	28.0
19	22.0	24.3	25.4	42	20.0	21.0	22.5
20	30.0	30.3	31.1	43	29.0	31.0	35.0
21	25.0	26.0	30.0	44	22.0	22.2	24.0
22	28.0	31.0	40.0	45	28.0	32.5	33.4
23	25.0	25.8	28.0				



ตารางภาคผนวกที่ ก.22 ตารางบันทึกอัตราความสูงของต้นเข็ม (การทดลองที่ 2 แบบน้ำเข้า2ชั่วโมงหยุด2 ชั่วโมง)

ต้นที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตรากระ ชดศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 2 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายอัตรา การชด ศาสตร์16.46 ชม./วัน ของ กระบะที่ 2 (ชม.) (24/02/48)	ต้นที่	ความสูง เริ่มต้น กระบะที่2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตรากระ ชดศาสตร์ 8.23 ชม./วัน ของกระบะ ที่ 2 (ชม.) (24/01/48)
1	30.0	32.3	38.3	24	20.0	21.0	27.0
2	29.0	29.4	36.0	25	23.0	23.5	25.4
3	22.0	26.0	30.0	26	32.0	34.5	36.0
4	20.0	23.3	27.0	27	29.0	32.0	37.8
5	26.0	31.0	36.0	28	29.0	33.0	34.0
6	24.0	26.0	27.0	29	28.0	30.0	34.0
7	25.0	30.0	34.0	30	25.0	26.0	28.5
8	22.0	23.5	31.0	31	25.0	26.8	27.0
9	24.0	27.0	32.0	32	28.0	29.0	33.5
10	25.0	32.5	37.6	33	25.0	28.5	34.0
11	30.0	32.5	36.3	34	22.0	25.0	29.0
12	30.0	34.2	35.4	35	23.0	23.2	28.0
13	27.0	30.0	31.2	36	23.0	23.1	24.3
14	23.0	26.8	29.0	37	27.0	32.8	36.0
15	23.0	24.0	30.0	38	23.0	28.2	29.4
16	28.0	30.0	31.0	39	22.0	31.5	34.8
17	25.0	28.0	30.2	40	27.0	28.1	30.0
18	27.0	32.0	36.0	41	18.0	19.3	20.3
19	26.0	29.0	30.0	42	30.0	34.1	38.3
20	26.0	26.4	27.1	43	23.0	27.5	30.0
21	19.0	19.5	20.0	44	22.0	25.0	29.0
22	25.0	28.0	35.0	45	26.0	28.0	30.0
23	24.0	32.3	33.0				

ตารางภาคผนวกที่ ก.23 ตารางบันทึกอัตราการความสูงของต้นธรรมรักษา

ต้นที่	ความสูง เริ่มต้นการ ทดลองที่ 1 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./ วันของการ ทดลองที่ 1 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 16.46 ชม./ วันของการ ทดลองที่ 1 (ชม.) (24/02/48)	ต้นที่	ความสูง เริ่มต้นการ ทดลองที่ 2 (26/11/47) (ชม.)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 8.23 ชม./ วันของการ ทดลองที่ 2 (ชม.) (24/01/48)	ความสูง สุดท้ายที่ อัตราการ ชลศาสตร์ 16.46 ชม./ วันของการ ทดลองที่ 2 (ชม.) (24/02/48)
1	63.0	94.0	98.0	1	76.0	79.0	82.0
2	69.0	94.0	108.0	2	55.0	83.0	118.0
3	67.0	72.0	85.0	3	60.0	73.0	101.0
4	60.0	95.0	112.0	4	60.0	117.0	122.0
5	35.0	101.0	115.0	5	65.0	135.0	142.0
6	51.0	69.0	95.0	6	63.0	83.0	111.0
7	52.0	53.9	79.0	7	77.0	81.0	120.0
8	65.0	81.0	102.0	8	65.0	90.0	121.0
9	64.0	102.0	117.0	9	62.0	77.0	103.0

หมายเหตุ : การทดลองที่ 1 : การไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 : การไหลแบบเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.24 ค่า Transpiration rate ของต้นเข็ม

ครั้งที่	วันที่	ค่า transpiration rate (มม./วัน)										ค่าเฉลี่ย	S.D.
		ต้นที่ 1	ต้นที่ 2	ต้นที่ 3	ต้นที่ 4	ต้นที่ 5	ต้นที่ 6	ต้นที่ 7	ต้นที่ 8	ต้นที่ 9	ต้นที่ 10		
1	15/12/2547	2.81	2.98	2.87	2.85	2.72	2.53	2.63	2.50	2.59	2.70	2.71	0.248797106
2	30/12/2547	2.84	2.98	2.90	2.87	2.74	2.53	2.65	2.52	2.61	2.72	2.73	0.138938836
3	15/01/2548	2.92	3.04	2.99	2.94	2.82	2.61	2.72	2.60	2.71	2.82	2.81	0.136055136
4	30/01/2548	2.98	3.08	3.06	3.07	2.90	2.70	2.88	2.65	2.80	2.92	2.90	0.140655078
5	15/02/2548	3.05	3.11	3.17	3.15	3.01	2.79	2.97	2.74	2.88	3.03	2.99	0.137113091



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ก.25 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน  
(การทดลองที่1)

วันเดือนปี	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 1 (ซม.)	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 2 (ซม.)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)
01/12/2547	40.0	40.0	-	-	-	-
02/12/2547	39.2	39.2	22.41	6.59	13.61	2.22
03/12/2547	39.6	39.6	22.41	6.59	11.66	4.16
04/12/2547	39.5	39.5	21.20	6.59	8.99	5.62
05/12/2547	39.4	39.4	21.20	6.59	12.39	2.22
06/12/2547	39.4	39.4	20.00	6.59	10.94	3.68
07/12/2547	39.3	39.3	21.20	6.59	11.91	2.71
08/12/2547	39.3	39.3	20.00	6.59	8.02	5.40
09/12/2547	39.4	39.4	18.80	6.59	8.99	3.22
10/12/2547	39.4	39.4	20.00	6.59	11.66	1.75
11/12/2547	39.3	39.3	21.20	6.59	10.45	4.17
12/12/2547	39.3	39.3	20.00	6.59	9.23	4.18
13/12/2547	39.3	39.3	20.00	6.59	11.42	1.99
14/12/2547	39.2	39.2	21.20	6.59	10.45	2.97
15/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.59	8.75	5.87
16/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.63	12.88	0.49
17/12/2547	39.3	39.3	18.80	6.63	9.48	2.69
18/12/2547	39.1	39.1	22.41	6.63	8.26	6.30
19/12/2547	39.1	39.1	20.00	6.63	9.96	3.40
20/12/2547	39.1	39.1	20.00	6.63	8.51	4.86
21/12/2547	39.2	39.2	18.80	6.63	8.51	3.66
22/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.63	6.80	6.56
23/12/2547	39.4	39.4	17.59	6.63	7.53	3.42
24/12/2547	39.5	39.5	18.80	6.63	7.53	4.63
25/12/2547	39.6	39.6	18.80	6.63	8.99	3.18
26/12/2547	39.7	39.7	18.80	6.63	11.42	0.75
27/12/2547	39.9	39.9	17.59	6.63	8.99	1.97
28/12/2547	40.1	40.0	18.80	6.63	11.42	1.23

ตารางภาคผนวกที่ ก.25 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหล 8.23 ซม./วัน  
(การทดลองที่1) (ต่อ)

วันเดือนปี	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 1 (ซม.)	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 2 (ซม.)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)
29/12/2547	40.1	40.1	18.80	6.63	10.94	1.23
30/12/2547	40.3	40.3	17.59	6.63	9.72	2.45
31/12/2547	40.4	40.4	18.80	6.63	11.18	0.79
01/01/2548	40.5	40.5	18.80	6.83	11.13	0.84
02/01/2548	40.6	40.6	18.80	6.83	11.91	0.06
03/01/2548	40.7	40.7	18.80	6.83	9.99	1.98
04/01/2548	40.9	40.9	17.59	6.83	7.68	3.08
05/01/2548	41.0	41.0	18.80	6.83	10.69	1.28
06/01/2548	40.8	40.8	22.41	6.83	10.08	4.29
07/01/2548	40.9	40.9	21.20	6.83	9.33	5.04
08/01/2548	40.6	40.6	21.20	6.83	8.36	6.01
09/01/2548	40.5	40.5	21.20	6.83	11.66	2.71
10/01/2548	40.6	40.6	18.80	6.83	9.65	2.32
11/01/2548	40.6	40.6	20.00	6.83	8.72	4.45
12/01/2548	40.5	40.5	21.20	6.83	9.43	4.94
13/01/2548	40.5	40.5	20.00	6.83	9.57	3.60
14/01/2548	40.4	40.4	20.00	6.83	9.45	3.72
15/01/2548	40.3	40.3	21.20	6.83	4.91	9.46
16/01/2548	40.4	40.4	21.20	6.83	4.74	8.21
17/01/2548	40.2	40.2	18.80	7.05	6.93	4.83
18/01/2548	40.0	40.0	22.41	7.05	7.92	7.44
19/01/2548	40.0	40.0	22.41	7.05	4.86	10.50
20/01/2548	40.0	40.0	20.00	7.05	7.56	5.40
21/01/2548	39.9	39.9	20.00	7.05	7.10	5.86
22/01/2548	39.9	39.9	21.20	7.05	9.02	5.14
23/01/2548	39.8	39.8	21.20	7.05	6.54	6.42

ตารางภาคผนวกที่ ก.26 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน  
(การทดลองที่2)

วันเดือนปี	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 1 (ซม.)	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 2 (ซม.)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)
01/12/2547	40.0	40.0	-	-	-	-
02/12/2547	39.8	39.8	22.41	6.59	13.61	2.22
03/12/2547	39.6	39.6	22.41	6.59	11.66	4.16
04/12/2547	39.5	39.5	21.20	6.59	8.99	5.62
05/12/2547	39.4	39.4	21.20	6.59	12.39	2.22
06/12/2547	39.3	39.3	21.20	6.59	10.94	3.68
07/12/2547	39.2	39.2	21.20	6.59	11.91	2.71
08/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.59	8.02	5.40
09/12/2547	39.3	39.3	18.80	6.59	8.99	3.22
10/12/2547	39.3	39.3	20.00	6.59	11.66	1.75
11/12/2547	39.2	39.2	21.20	6.59	10.45	4.17
12/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.59	9.23	4.18
13/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.59	11.42	1.99
14/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.59	10.45	2.97
15/12/2547	39.1	39.1	21.20	6.59	8.75	5.87
16/12/2547	39.1	39.1	20.00	6.63	12.88	0.49
17/12/2547	39.2	39.2	18.80	6.63	9.48	2.69
18/12/2547	39.1	39.1	21.20	6.63	8.26	6.30
19/12/2547	39.1	39.1	20.00	6.63	9.96	3.40
20/12/2547	39.1	39.1	20.00	6.63	8.51	4.86
21/12/2547	39.2	39.2	18.80	6.63	8.51	3.66
22/12/2547	39.2	39.2	20.00	6.63	6.80	6.56
23/12/2547	39.4	39.4	17.59	6.63	7.53	3.42
24/12/2547	39.5	39.5	18.80	6.63	7.53	4.63
25/12/2547	39.6	39.6	18.80	6.63	8.99	3.18
26/12/2547	39.7	39.7	18.80	6.63	11.42	0.75
27/12/2547	39.9	39.9	17.59	6.63	8.99	1.97

ตารางภาคผนวกที่ ก.26 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหลศาสตร์ 8.23 ซม./วัน  
(การทดลองที่2) (ต่อ)

วันเดือนปี	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 1 (ซม.)	ความสูงของระดับน้ำจากพื้นกระบะที่ 2 (ซม.)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้อื่นๆ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)
28/12/2547	40.0	40.0	18.80	6.63	11.42	0.75
29/12/2547	40.1	40.1	18.80	6.63	10.94	1.23
30/12/2547	40.2	40.2	18.80	6.63	9.72	2.45
31/12/2547	40.3	40.3	18.80	6.83	11.18	0.79
01/01/2548	40.4	40.4	18.80	6.83	11.13	0.84
02/01/2548	40.5	40.5	18.80	6.83	11.91	0.06
03/01/2548	40.6	40.6	18.80	6.83	9.99	1.98
04/01/2548	40.8	40.8	17.59	6.83	7.68	3.08
05/01/2548	40.9	40.9	18.80	6.83	10.69	1.28
06/01/2548	40.8	40.8	21.20	6.83	10.08	4.29
07/01/2548	40.7	40.7	21.20	6.83	9.33	5.04
08/01/2548	40.6	40.6	21.20	6.83	8.36	6.01
09/01/2548	40.5	40.5	21.20	6.83	11.66	2.71
10/01/2548	40.6	40.6	18.80	6.83	9.65	2.32
11/01/2548	40.6	40.6	20.00	6.83	8.72	4.45
12/01/2548	40.5	40.5	21.20	6.83	9.43	4.94
13/01/2548	40.5	40.5	20.00	6.83	9.57	3.60
14/01/2548	40.5	40.5	20.00	6.83	9.45	3.72
15/01/2548	40.4	40.4	21.20	6.83	4.91	9.46
16/01/2548	40.4	40.4	20.00	7.05	4.74	8.21
17/01/2548	40.5	40.5	18.80	7.05	6.93	4.83
18/01/2548	40.3	40.3	22.41	7.05	7.92	7.44
19/01/2548	40.1	40.1	22.41	7.05	4.86	10.50
20/01/2548	40.1	40.1	20.00	7.05	7.56	5.40
21/01/2548	40.1	40.1	20.00	7.05	7.10	5.86
22/01/2548	40.0	40.0	21.20	7.05	9.02	5.14
23/01/2548	39.9	39.9	20.00	7.05	6.54	6.42

ตารางภาคผนวกที่ ก.27 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหลศาสตร์ 16.46 ซม./วัน  
(การทดลองที่1)

วันเดือนปี	ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ(ลิตร/วัน)
24/01/2548	40.00	23.13	7.05	10.23	5.85
25/01/2548	40.00	21.93	7.05	7.78	7.11
26/01/2548	40.00	24.33	7.05	8.80	8.49
27/01/2548	40.00	24.33	7.05	10.69	6.59
28/01/2548	40.00	24.33	7.05	8.87	8.41
29/01/2548	40.00	25.54	7.05	9.62	8.87
30/01/2548	40.00	25.54	7.05	9.02	9.48
31/01/2548	40.00	25.54	7.27	8.75	9.53
01/02/2548	40.00	25.54	7.27	8.77	9.50
02/02/2548	40.00	24.33	7.27	10.33	6.74
03/02/2548	40.00	23.13	7.27	10.04	5.83
04/02/2548	40.00	25.54	7.27	9.40	8.87
05/02/2548	40.00	25.54	7.27	11.81	6.46
06/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.81	7.46
07/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.98	7.29
08/02/2548	40.00	26.74	7.27	10.35	9.12
09/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.42	7.85
10/02/2548	40.00	23.13	7.27	10.28	5.59
11/02/2548	40.00	20.71	7.27	8.29	5.16
12/02/2548/	40.00	20.71	7.27	8.04	5.40
13/02/2548	40.00	24.33	7.27	7.85	9.22
14/02/2548	40.00	23.13	7.27	12.47	3.40
15/02/2548	40.00	23.13	7.27	14.14	1.72
16/02/2548	40.00	26.74	7.27	10.67	8.81
17/02/2548	40.00	24.33	7.27	11.11	5.96
18/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.91	7.36
19/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.38	7.90
20/02/2548	40.00	24.33	7.27	10.42	6.64
21/02/2548	40.00	24.33	7.27	12.03	5.04
22/02/2548	40.00	25.54	7.27	13.41	4.86
23/02/2548	40.00	25.54	7.27	11.13	7.14
24/02/2548	40.00	24.33	7.27	12.51	4.55



ตารางภาคผนวกที่ ก.28 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบที่อัตราการไหลศาสตร์ 16.46 ซม./วัน  
(การทดลองที่2)

วันเดือนปี	ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากปัจจัยอื่นๆ(ลิตร/วัน)
24/01/2548	40.00	23.13	7.05	10.23	5.85
25/01/2548	40.00	21.93	7.05	7.78	7.11
26/01/2548	40.00	24.33	7.05	8.80	8.49
27/01/2548	40.00	24.33	7.05	10.69	6.59
28/01/2548	40.00	24.33	7.05	8.87	8.41
29/01/2548	40.00	25.54	7.05	9.62	8.87
30/01/2548	40.00	25.54	7.05	9.02	9.48
31/01/2548	40.00	25.54	7.27	8.75	9.53
01/02/2548	40.00	25.54	7.27	8.77	9.50
02/02/2548	40.00	24.33	7.27	10.33	6.74
03/02/2548	40.00	23.13	7.27	10.04	5.83
04/02/2548	40.00	25.54	7.27	9.40	8.87
05/02/2548	40.00	25.54	7.27	11.81	6.46
06/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.81	7.46
07/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.98	7.29
08/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.35	7.92
09/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.42	7.85
10/02/2548	40.00	23.13	7.27	10.28	5.59
11/02/2548	40.00	20.71	7.27	8.29	5.16
12/02/2548/	40.00	20.71	7.27	8.04	5.40
13/02/2548	40.00	24.33	7.27	7.85	9.22
14/02/2548	40.00	23.13	7.27	12.47	3.40
15/02/2548	40.00	26.74	7.27	14.14	5.33
16/02/2548	40.00	24.33	7.27	10.67	6.40
17/02/2548	40.00	24.33	7.27	11.11	5.96
18/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.91	7.36
19/02/2548	40.00	25.54	7.27	10.38	7.90
20/02/2548	40.00	24.33	7.27	10.42	6.64
21/02/2548	40.00	24.33	7.27	12.03	5.04
22/02/2548	40.00	25.54	7.27	13.41	4.86
23/02/2548	40.00	25.54	7.27	11.13	7.14
24/02/2548	40.00	24.33	7.27	12.51	4.55

ตารางภาคผนวกที่ ก.29 ข้อมูลสภาวะอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา เดือนธันวาคม 2547

วันเดือนปี	ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณฝน (มม./วัน)	อัตราการระเหย น้ำ(มม./วัน)
1.	28.0	58.00	0	5.3
2.	28.6	54.00	0	5.6
3.	29.0	55.00	0	4.8
4.	28.8	56.00	0	3.7
5.	27.9	55.00	0	5.1
6.	27.4	49.00	0	4.5
7.	26.8	51.00	0	4.9
8.	24.9	54.00	0	3.3
9.	25.6	54.00	0	3.7
10.	26.4	56.00	0	4.8
11.	27.1	57.00	0	4.3
12.	27.4	58.00	0	3.8
13.	26.9	54.00	0	4.7
14.	26.1	57.00	0	4.3
15.	26.5	51.00	0	3.6
16.	26.5	55.00	0	5.3
17.	27.5	57.00	0	3.9
18.	27.5	58.00	0	3.4
19.	27.6	49.00	0	4.1
20.	26.4	58.00	0	3.5
21.	27.2	54.00	0	3.5
22.	27.1	65.00	0	2.8
23.	27.5	66.00	0	3.1
24.	28.1	59.00	0	3.1
25.	28.0	66.00	0	3.7
26.	28.1	57.00	0	4.7
27.	28.0	56.00	0	3.7
28.	27.7	53.00	0	4.7
29.	26.9	53.00	0	4.5
30.	27.4	57.00	0	4.0
31.	26.9	56.00	0	4.6
ค่าเฉลี่ย	27.3	56.00	0	4.2

ตารางภาคผนวกที่ ก.30 ข้อมูลสภาวะอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา เดือนมกราคม 2548

วันเดือนปี	ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณฝน (มม./วัน)	อัตราการระเหย น้ำ(มม./วัน)
1.	24.4	53.00	0	4.58
2.	23.7	53.75	0	4.90
3.	24.7	58.63	0	4.11
4.	27.0	59.50	0	3.16
5.	27.7	54.75	0	4.40
6.	27.2	55.50	0	4.15
7.	27.7	55.38	0	3.84
8.	29.1	56.75	0	3.44
9.	28.8	61.50	0	4.80
10.	28.5	49.50	0	3.97
11.	28.4	59.63	0	3.59
12.	29.0	72.84	0	3.88
13.	29.2	75.13	0	3.94
14.	29.1	75.25	0	3.89
15.	22.8	75.25	0.8	2.02
16.	24.4	67.00	0	1.95
17.	26.8	59.75	0	2.85
18.	28.0	75.13	0	3.26
19.	29.3	80.50	1.9	2.00
20.	28.2	80.88	0	3.11
21.	28.8	75.50	0	2.92
22.	29.0	73.63	0	3.71
23.	28.7	77.13	0	2.69
24.	28.8	74.88	0	4.21
25.	28.3	76.38	0	3.20
26.	28.8	78.63	0	3.62
27.	29.1	75.38	0	4.40
28.	29.1	76.25	0	3.65
29.	29.4	76.25	0	3.96
30.	29.8	77.38	0	3.71
31.	29.3	79.00	0	3.60
ค่าเฉลี่ย	27.8	68.39	0.087	3.60

ตารางภาคผนวกที่ ก.31 ข้อมูลสภาวะอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา เดือนกุมภาพันธ์ 2548

วันเดือนปี	ค่าอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณฝน (มม./วัน)	อัตราการระเหย น้ำ(มม./วัน)
1.	29.0	78.00	0	3.61
2.	29.1	76.00	0	4.25
3.	29.1	71.00	0	4.13
4.	28.9	77.00	0	3.87
5.	28.8	71.00	0	4.86
6.	28.9	72.00	0	4.45
7.	29.6	72.00	0	4.52
8.	29.7	73.00	0	4.26
9.	29.2	74.00	0	4.29
10.	29.9	73.00	0	4.23
11.	29.1	77.00	0	3.41
12.	29.0	79.00	1.4	3.31
13.	29.2	74.00	0	3.23
14.	29.3	72.00	0	5.13
15.	29.6	69.00	0	5.82
16.	29.9	69.00	0	4.39
17.	30.2	70.00	0	4.57
18.	29.7	77.00	0	4.49
19.	29.9	76.00	0	4.27
20.	30.0	72.00	0	4.29
21.	30.4	70.00	0	4.95
22.	30.0	72.00	0	5.52
23.	29.9	73.00	0	4.58
24.	30.0	74.00	0	5.15
ค่าเฉลี่ย	29.52	73.38	0.06	4.40



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ**

คำนวณจาก evapotranspiration rate ซึ่งหาได้จาก

$$\text{evapotranspiration rate} = \text{evaporation rate} + \text{transpiration rate}$$

จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาค่า evaporation rate ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร มีการบันทึกข้อมูลของสถานีตรวจวัดอากาศได้ค่า evaporation rate เฉลี่ยในปี 2547 มีค่าเท่ากับ 4.4 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งใช้ค่าของปี 2547 มาคำนวณ

และจากข้อมูลการวิจัยของ จิรวัตร จริจิริยาเวช (2546) จะมีค่าค่า transpiration rate ของต้น ฝรั่งประมาณ 2.7 มิลลิเมตรต่อวัน นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \text{ค่า evaporation rate} &= 4.4 + 2.7 \quad \text{mm/day} \\ &= 7.1 \quad \text{mm/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ในการระเหยน้ำเสีย (พื้นที่กระบะพลาสติก)} &= 1.5 \times 0.81 \times 2 \quad \text{m}^2 \\ &= 2.43 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นจะได้ปริมาณน้ำเสียที่จะกำจัดใน 1 วัน} &= 2.43 \times (7.1/1,000) \quad \text{m}^3/\text{day} \\ &= 0.017253 \quad \text{m}^3/\text{day} \\ &= 17.2 \quad \text{l/day} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหลที่ 20 l/day และทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 40 l/day



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## การคำนวณหาอัตราภาชนะน้ำเสียและเวลากักน้ำในการทดลอง

## การหาอัตราภาชนะน้ำเสียและเวลากักน้ำในการทดลอง

จากปริมาตรของชั้นทรายในระบบมีขนาดกว้าง 81 cm. ยาว 150 cm. สูง 25 cm. จำนวน 2 ถัง มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างในตุ้กลาง (Void Ratio) = 0.49

และปริมาตรของชั้นกรวดในระบบมีขนาดกว้าง 81 cm. ยาว 150 cm. สูง 20 cm. จำนวน 2 ถัง มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างในตุ้กลาง (Void Ratio) = 0.43

## 1) การคำนวณหาปริมาตรของชั้นตุ้กลาง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นทราย} &= (\text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความสูง})_{\text{ชั้นทราย}} \\ &= (0.81 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}) \times 2 \\ &= 0.6075 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของชั้นหิน} &= (\text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความสูง})_{\text{ชั้นหิน}} \\ &= (0.81 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}) \times 2 \\ &= 0.486 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

## 2) การคำนวณหาปริมาตรช่องว่างในชั้นตุ้กลาง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของช่องว่างในชั้นทรายรวมกับชั้นหิน} &= (\text{ปริมาตรชั้นทราย} \times \text{Void Ratio})_{\text{ทราย}} + (\text{ปริมาตรชั้นหิน} \times \text{Void Ratio})_{\text{หิน}} \\ &= (0.81 \times 1.5 \times 0.25 \times 2 \times 0.49) + (0.81 \times 1.5 \times 0.2 \times 2 \times 0.43) \\ &= 0.50655 \text{ m}^3 \\ &= 506.65 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

## 3) การคำนวณหาพื้นที่รับน้ำ

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่รับน้ำ} &= \text{พื้นที่ผิวของชั้นตุ้กลาง} \\ &= (\text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว})_{\text{ชั้นตุ้กลาง}} \times \text{จำนวนถัง} \\ &= (0.81 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}) \times 2 \\ &= 2.43 \text{ m}^2 = 2430 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$



#### 4) การคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำเสียและเวลากักน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ

อัตราการระเหยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมี 2 ค่า คือ 20 และ 40 ลิตรต่อวันตามลำดับ

○ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสีย = 20 ลิตรต่อวัน

$$\bullet \text{ เวลาเก็บกักน้ำเสีย} = \frac{\text{ปริมาตรของชั้นตัวกลาง}}{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย}}$$

$$= \frac{506.65 \text{ ลิตร}}{20 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

$$= 25.3 \text{ วัน}$$

$$\bullet \text{ อัตราการระบรวทุกชลศาสตร์} = \frac{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย}}{\text{พื้นที่รับน้ำ}}$$

$$= \frac{20000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน}}{2430 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 8.23 \text{ เซนติเมตรต่อวัน}$$

○ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสีย = 40 ลิตรต่อวัน

$$\bullet \text{ เวลาเก็บกักน้ำเสีย} = \frac{\text{ปริมาตรของชั้นตัวกลาง}}{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย}}$$

$$= \frac{506.65 \text{ ลิตร}}{40 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

$$= 12.7 \text{ วัน}$$

$$\bullet \text{ อัตราการระบรวทุกชลศาสตร์} = \frac{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย}}{\text{พื้นที่รับน้ำ}}$$

$$= \frac{40000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน}}{2430 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 16.46 \text{ เซนติเมตรต่อวัน}$$



ภาคผนวก ง.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

## การหาการกระจายขนาดของทราย (Size Distribution)

## ง.1 การหาการกระจายขนาดของเม็ดทราย (Size Distribution)

ทำการสุ่มตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดลอง แล้วนำมาทำ Sive Analysis เพื่อหาการกระจายขนาดของทรายนั่น

## ง. 1.1 การทำ Sive Analysis

นำเอาตัวอย่างทรายมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานต่างๆ ที่วางเรียงกัน โดยให้ตะแกรงตะแกรงที่มีรูใหญ่อยู่ด้านบน เมื่อร่อนผ่านตะแกรงต่างๆ เสร็จแล้วให้จับบันทึกน้ำหนักของทรายที่ติดค้างอยู่บนตะแกรงขนาดต่างๆ นั้น จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณน้ำหนักระยะของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักระยะของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดแสดงในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการทำ Sive Analysis

ขนาดรูเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนักทราย รวมกับ น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	น้ำหนักสะสม ของทรายที่ ค้างบน ตะแกรง (ก.)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักระยะ ของทรายที่ ค้างบน ตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักระยะ ของทรายที่มี ขนาดเล็กกว่า รูเปิด
4.00	460.15	474.83	14.68	0.7340	99.27
2.36	439.10	450.40	25.98	1.2995	98.70
2.00	430.54	436.12	31.56	1.5787	98.42
1.40	411.04	424.94	45.46	2.2740	97.73
1.00	401.23	457.26	11.49	5.0770	94.92
0.50	342.75	1827.84	1586.58	79.3620	20.64
0.25	323.38	659.80	1918.00	95.9400	4.06
0.05	297.06	375.24	1996.18	99.8410	0.159
ถาด	284.05	287.05	1999.18	100.0000	0.000

### ง. 1.2 การกระจายของเม็ดดิน (Grain Size Distribution)

จากการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน นำมาเขียนจุด (Plot) ค่าเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงในแกนตั้งต่อขนาดช่องลอดตะแกรงในแกนนอนในสเกล Log ตามมาตรฐานอังกฤษ นิยมจัดสเกลขนาดใหญ่อยู่ทางขวามือ ส่วนมาตรฐานอเมริกันจัดสเกลขนาดตะแกรงใหญ่อยู่ทางซ้ายมือจุดที่เขียนไว้ลากต่อด้วยเส้นโค้งเรียบ (Smooth Curve) หรือต่อด้วยเส้นตรง การเขียนโค้งการกระจายของเม็ดดินนี้ทำให้วิศวกรสามารถเห็นลักษณะการกระจายของเม็ดดินได้ทันทีดีกว่ารายงานผลในรูปตาราง

ในทางวิศวกรรม วัสดุเม็ดหยาบที่จะนำไปใช้งาน คุณสมบัติของเม็ดดินต้องมีขนาดเม็ดคละกัณฑ์ (Well Graded) ความคละของเม็ดดิน สามารถดูได้จากโค้งผลการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) เมื่อเปรียบเทียบกับ โค้งที่ยาวตลอดขนาดสเกลแสดงลักษณะดินที่มีขนาดเม็ดคละกัณฑ์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าโค้งมีลักษณะเป็นตัว S (หรือ S กลับทาง) สั้น เกือบตั้งตรง ลักษณะเม็ดดินจะเป็นดินที่มีความสม่ำเสมอ (Poorly Graded) ส่วนโค้งที่มีลักษณะเป็นขั้นๆ จะเป็นดินที่เรียกว่าดินขาดช่วง (Gap Graded)

เพื่อที่จะให้หลักพิจารณาการกระจายของเม็ดดินเป็นมาตรฐาน จึงได้กำหนดสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการกระจายของเม็ดดิน ดังนี้คือ

#### 1. สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity)

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

#### 2. สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature)

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

ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์จากลักษณะของโค้ง เมื่อ  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  เป็นขนาดของเม็ดดิน(มม.) ที่เปอร์เซ็นต์ลอดผ่านตะแกรง ที่ 10, 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์  $C_u$  เป็นการประเมินการกระจายของเม็ดดินที่เปอร์เซ็นต์ลอดผ่านตะแกรง 2 จุด คือ ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 60 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับโค้งของดินชนิดขาดช่วง (Gap Graded) อาจจะไม่สามารถแยกความแตกต่างจากการคำนวณได้ จึงกำหนดว่าสัมประสิทธิ์  $C_z$  ขึ้นมา

จากการคำนวณ สามารถจำแนกการกระจายของเม็ดดินได้ดังนี้

กรวดมีการคละกัณฑ์ดี (Well Graded Gravel)	:	$C_u > 4$ $C_z = 1-3$
ทรายมีการคละกัณฑ์ดี (Well Graded Sand)	:	$C_u > 6$ $C_z = 1-3$
ดินที่มีขนาดเม็ดดินสม่ำเสมอ (Poorly Graded)	:	$C_u \cong 1$ (ใกล้ 1.0)

นำค่าขนาดของรูเปิดและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะสมของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดมาเขียนบนกราฟ Probability โดยให้ขนาดของรูเปิดอยู่บนสเกลลอกลและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะสมของทรายที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดอยู่บนสเกล probability ดังกราฟรูปที่ ง.1

โดยที่ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) นั้นหมายถึงขนาดของทรายที่ 10 % ของทรายทั้งหมดจะมีขนาดเล็กกว่านี้ :  $D_{10}$  ส่วนสัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอ นั้นจะมีค่าเท่ากับ  $D_{60}/D_{10}$

อ่านค่าจากกราฟที่ 3.1 ได้ค่าดังต่อไปนี้

$$D_{10} = 0.37 \text{ มม.}$$

$$D_{30} = 0.58 \text{ มม.}$$

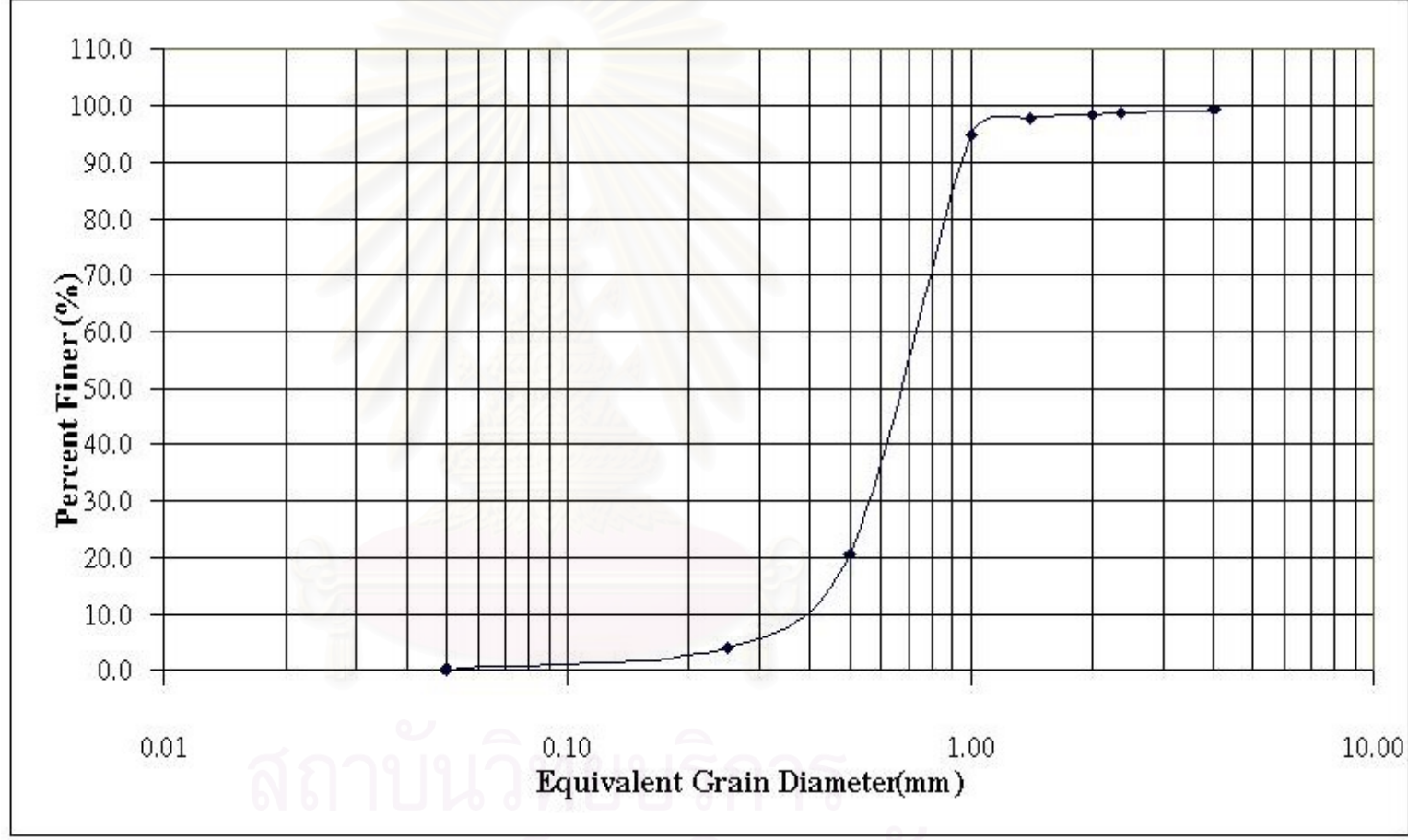
$$D_{60} = 0.72 \text{ มม.}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity) มีค่าเป็น 1.94  
สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature) มีค่าเป็น 1.26

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขนาดเล็กว่ำรูเปิด

พื้นที่ของผลรวมพื้นที่รูเปิดที่เล็กกว่าขนาดรูเปิดที่รองลงมาของดินที่รองอยู่ระหว่างขนาดรูเปิด T.๖ ที่รูเปิด



สถาบันวิจัยจักร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

## การคำนวณหาค่า transpiration rate ของพืช

$$T = W / At$$

T = transpiration rate (cm/h)

W = total water used (cm<sup>3</sup>)

A = total surface area of sample leaf (cm<sup>2</sup>)

t = consumtive time (h)

ใช้หาค่าการระเหยน้ำของพืชโดยที่หาปริมาณน้ำที่ใช้ในการดูดซึมทางราก และระเหยน้ำออกทางใบ นั่นก็คือปริมาณน้ำที่ต้นเข็มใช้ไปในแต่ละวันมาหารด้วยเวลาที่ต้นเข็มดูดซึมน้ำไปใช้กับพื้นที่ใบของต้นเข็มที่ใช้ในการระเหยน้ำ โดยจะนำใบของต้นเข็มมาหาพื้นที่ประมาณ 40 ใบ เพื่อเป็นตัวแทนใบของต้นเข็มทั้งต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ฉ.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

## ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามประเภทมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง				
		ก	ข	ค	ง	จ
1. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5-9	5-9	5-9	5-9	5-9
2. บีโอดี (BOD)	มก./ล.	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 200
3. ปริมาณของแข็ง						
- ค่าสารแขวนลอย (Suspended Solids)	มก./ล.	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 60
- ค่าตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มก./ล.	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	-
- ค่าสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solid)	มก./ล.	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	-
4. ค่าซัลไฟด์ (Sulfide)	มก./ล.	ไม่เกิน 1.0	ไม่เกิน 1.0	ไม่เกิน 3.0 -	ไม่เกิน 4.0	-
5. ไนโตรเจน (Nitrogen) ในรูปทีเคเอ็น (TKN)	มก./ล.	ไม่เกิน 35	ไม่เกิน 35	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 40	-
6. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	มก./ล.	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 100

หมายเหตุ : วิธีการตรวจสอบลักษณะน้ำทิ้งจากอาคารเป็นไปตามวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียใน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ซึ่ง APHA : American Public Health Association, AWWA : American Water Works Association และ WPCF : Water Pollution Control Federation ร่วมกันกำหนดไว้  
\* = เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำตามปกติ

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 111 ตอนพิเศษ 9ง ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2537

## การแบ่งประเภทของอาคาร

แบ่งประเภทของอาคารออกเป็น 5 ประเภท คือ

1. อาคารประเภท ก. หมายความว่า อาคารดังต่อไปนี้
  1. อาคารชุดที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 500 ห้องนอนขึ้นไป
  2. โรงแรมที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่พักรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 200 ห้องขึ้นไป
  3. โรงพยาบาลของทางราชการหรือสถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาลที่มีเตียงสำหรับรับผู้ป่วยไว้ค้างคืนรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 30 เตียงขึ้นไป
  4. อาคารโรงเรียนราษฎร์ โรงเรียนของทางราชการ สถาบันอุดมศึกษาของเอกชนหรือสถาบันอุดมศึกษาของทางราชการที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 25,000 ตารางเมตรขึ้นไป
  5. อาคารที่ทำการของทางราชการ รัฐวิสาหกิจ องค์การระหว่างประเทศหรือของเอกชนที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคาร หรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 55,000 ตารางเมตรขึ้นไป
  6. อาคารของศูนย์การค้าหรือห้างสรรพสินค้าที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคาร หรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 25,000 ตารางเมตรขึ้นไป
  7. ตลาดที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 2,500 ตารางเมตรขึ้นไป
  8. กภัตตาคารหรือร้านอาหารที่มีพื้นที่ให้บริการรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 2,500 ตารางเมตรขึ้นไป
2. อาคารประเภท ข. หมายความว่า อาคารดังต่อไปนี้
  1. อาคารชุดที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 100 ห้องนอน แต่ไม่ถึง 500 ห้องนอน
  2. โรงแรมที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่พักรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 60 ห้อง แต่ไม่ถึง 200 ห้อง

3. หอพักที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 250 ห้องขึ้นไป
  4. สถานบริการที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 5,000 ตารางเมตรขึ้นไป
  5. โรงพยาบาลของทางราชการหรือสถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาลที่มีเตียงสำหรับผู้ป่วยไว้ค้างคืนรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 10 เตียง แต่ไม่ถึง 30 เตียง
  6. อาคารโรงเรียนราษฎร์ โรงเรียนของทางราชการ สถาบันอุดมศึกษาเอกชนหรือสถาบันอุดมศึกษาของทางราชการ ที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 5,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 25,000 ตารางเมตร อาคารที่ทำการของทางราชการ ที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 5,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 25,000 ตารางเมตร
  7. อาคารที่ทำการของทางราชการ รัฐวิสาหกิจ องค์การระหว่างประเทศหรือของเอกชนที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของ อาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 10,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 55,000 ตารางเมตร
  8. อาคารของศูนย์การค้าหรือห้างสรรพสินค้าที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 5,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 25,000 ตารางเมตร
  9. ตลาดที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 1,500 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 2,500 ตารางเมตร
  10. กภัตตาคารหรือร้านอาหารที่มีพื้นที่ให้บริการรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 500 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 2,500 ตารางเมตร
3. อาคารประเภท ค. หมายความว่าอาคารดังต่อไปนี้
1. อาคารชุดที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคาร ไม่ถึง 100 ห้องนอน
  2. โรงแรมที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นห้องพักรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มอาคาร ไม่ถึง 60 ห้อง
  3. หอพักที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 50 ห้อง แต่ไม่ถึง 250 ห้อง
  4. สถานบริการที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 1,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 5,000 ตารางเมตร

5. อาคารที่ทำการของทางราชการ รัฐวิสาหกิจ องค์การระหว่างประเทศหรือของเอกชนที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคาร หรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 5,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 10,000 ตารางเมตร
6. ตลาดที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 1,000 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 1,500 ตารางเมตร
7. ภัตตาคารหรือร้านอาหารที่มีพื้นที่ให้บริการรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 250 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 500 ตารางเมตร

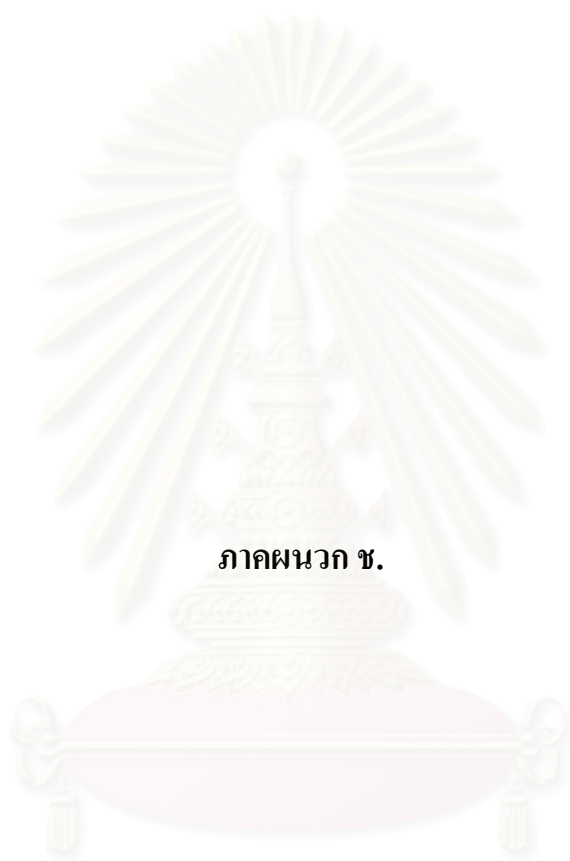
4. อาคารประเภท ง. หมายความว่าอาคารดังต่อไปนี้

1. หอพักที่มีจำนวนห้องสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 10 ห้อง แต่ไม่ถึง 50 ห้อง
2. ตลาดที่มีพื้นที่ใช้สอยรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 500 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 1,000 ตารางเมตร
3. ภัตตาคารหรือร้านอาหารที่มีพื้นที่ให้บริการรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มของอาคารตั้งแต่ 100 ตารางเมตร แต่ไม่ถึง 250 ตารางเมตร

5. อาคารประเภท จ. หมายความว่าภัตตาคารหรือร้านอาหารที่มีพื้นที่ให้บริการรวมกันทุกชั้นไม่ถึง 100 ตารางเมตร

**แหล่งที่มา :** ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 111 ตอนพิเศษ 9 ง ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2537

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ข**  
**การตรวจสอบการลัดวงจรของระบบ**

**วิธีการตรวจสอบ**

**1. ขั้นตอนการทำงาน**

- 1.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของ Tracer (น้ำ + NaCl) ที่ค่าต่างๆ กับ ค่าสภาพความนำไฟฟ้า
- 1.2 วัดสภาพความนำไฟฟ้าของระบบโดยใช้น้ำประปา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
  - 1.2.1 เติมน้ำประปาจนเต็มระบบ(กระบะ) (กำหนดให้มีอัตราการไหล = 4.22 ลิตร ต่อนาที ซึ่งมีเวลาเก็บกัก = 120 นาที)
  - 1.2.2 วัดค่าสภาพความนำไฟฟ้าของระบบ ทุก 10 นาที
  - 1.2.3 เฉลี่ยค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ได้ ถือเป็นค่าเริ่มต้นเมื่อยังไม่ได้ฉีด Tracer
- 1.3 วัดค่าสภาพความนำไฟฟ้าของระบบเมื่อทำการฉีด Tracer
  - 1.3.1 เตรียม Tracer ที่ค่าความเข้มข้น 120 มก./ล. โดยมีปริมาตร 500 มล.
  - 1.3.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำประปาที่เข้าสู่ระบบ (กำหนดให้มีอัตราการไหล = 4.22 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีเวลาเก็บกัก = 120 นาที)
  - 1.3.3 ฉีด Tracer ที่เตรียมในขั้นตอน 1.3.1 (รู้ความเข้มข้นและปริมาตรของ Tracer) เข้าสู่ระบบ พร้อมกับทำการบันทึกเวลา
  - 1.3.4 ทำการเก็บน้ำที่ท้ายระบบ(ปลายกระบะ) พร้อมกับวัดค่าสภาพความนำไฟฟ้า ทุก 5 นาที
- 1.4 ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของ Tracer = ค่าความนำไฟฟ้าจากข้อ 1.3.4 - ค่าความนำไฟฟ้าจาก ข้อ 1.2.3
- 1.5 ทำการวิเคราะห์หาค่าเวลาเก็บกักเฉลี่ยของ Tracer ในระบบโดยนำไปสร้างกราฟต่างๆ ดังแสดงในผลการทดลอง
  - 1.5.1 พล็อตกราฟและหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า กับเวลา (เรียกว่า C Curve)
  - 1.5.2 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E(t) กับ เวลา (เรียกว่า E(t) curve)

## 2. ผลการทดลอง

2.1 กำหนดให้ Tracer มีระยะเวลาเก็บกักในระบบ 120 นาที (มีอัตราการไหล = 4.22 ลิตร ต่อนาที)

2.2 Tracer ที่ใช้คือ NaCl 120 มก./ล. มีปริมาตร 500 มล. และมีความนำไฟฟ้า 196 ms

2.3 ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของระบบเมื่อยังไม่ได้ฉีด Tracer 368  $\mu$ s

2.4 ผลการทดลองได้ค่าดังตาราง (เวลาเก็บกัก = 125.30 นาที)

ime (min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-tm	(t-tm) <sup>2</sup>	(t-tm) <sup>2</sup> *E(t)
0	0	0.00000000	0	-125.3	15700.09	0
5	0	0.00000000	0	-120.3	14472.09	0
10	0	0.00000000	0	-115.3	13294.09	0
15	0	0.00000000	0	-110.3	12166.09	0
20	0	0.00000000	0	-105.3	11088.09	0
25	0	0.00000000	0	-100.3	10060.09	0
30	0	0.00000000	0	-95.3	9082.09	0
35	0	0.00000000	0	-90.3	8154.09	0
40	0	0.00000000	0	-85.3	7276.09	0
45	0	0.00000000	0	-80.3	6448.09	0
50	0	0.00000000	0	-75.3	5670.09	0
55	0	0.00000000	0	-70.3	4942.09	0
60	0	0.00000000	0	-65.3	4264.09	0
65	0	0.00000000	0	-60.3	3636.09	0
70	0	0.00000000	0	-55.3	3058.09	0
75	0	0.00000000	0	-50.3	2530.09	0
80	0	0.00000000	0	-45.3	2052.09	0
85	74	0.01217706	1.035050189	-40.3	1624.09	19.77664308
90	77	0.01267073	1.140365312	-35.3	1246.09	15.78886457
95	82	0.01349350	1.281882508	-30.3	918.09	12.38824749
100	119	0.01958203	1.958203061	-25.3	640.09	12.53426197

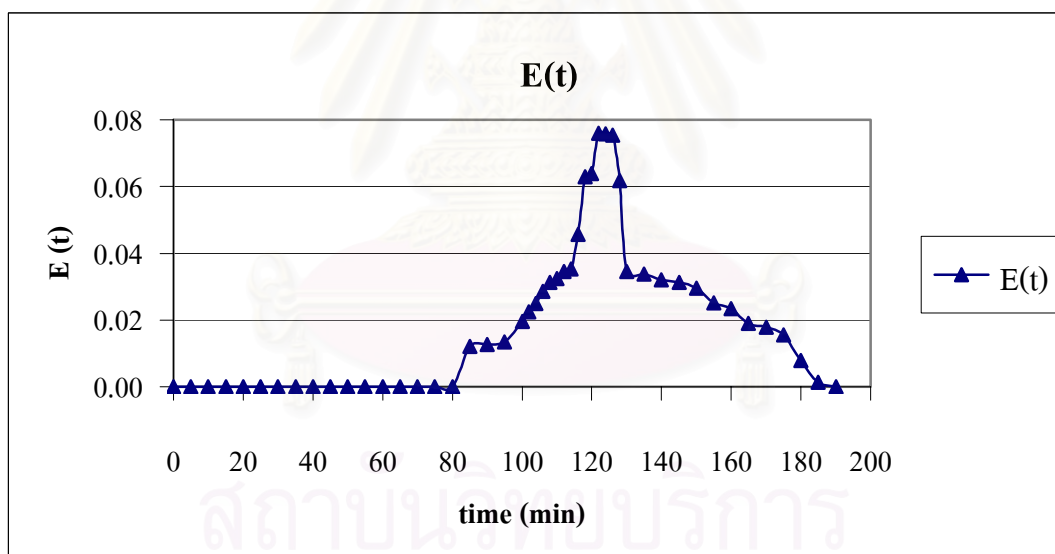
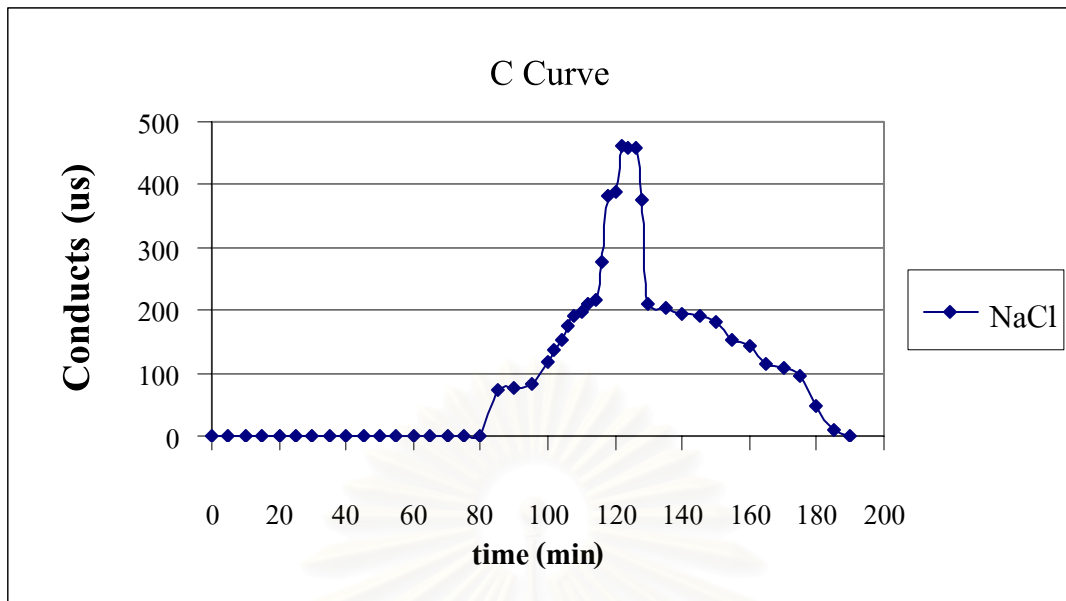


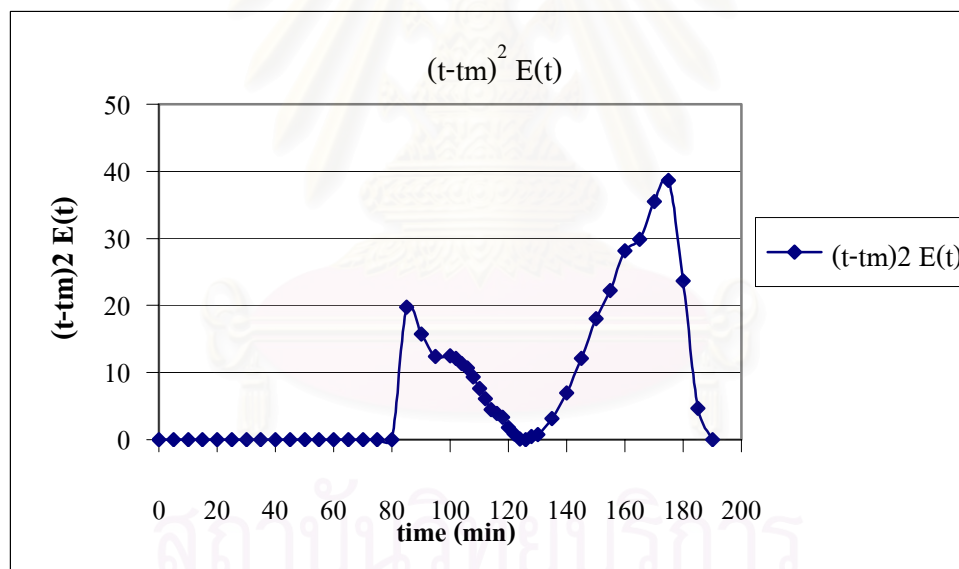
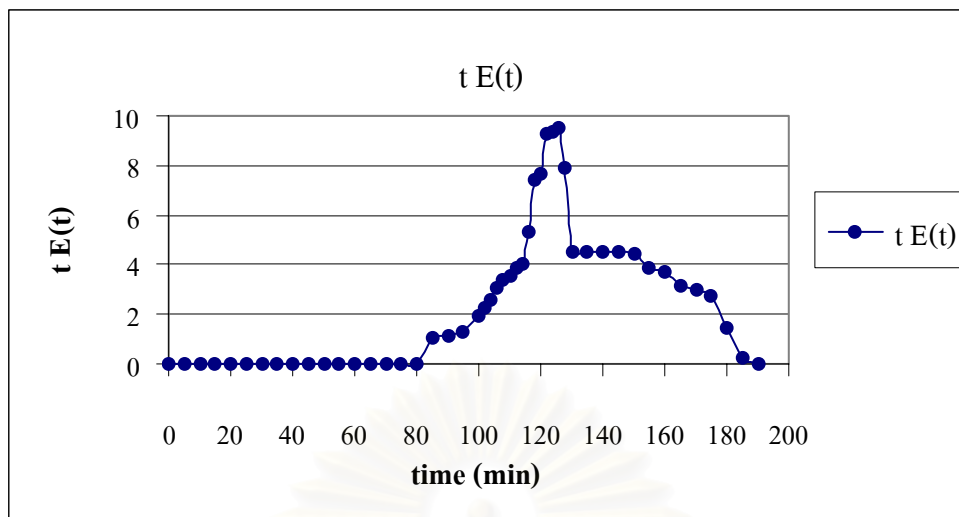
Time (min)	Conduct	E(t)	tE(t)	t-t <sub>m</sub>	(t-t <sub>m</sub> ) <sup>2</sup>	(t-t <sub>m</sub> ) <sup>2</sup> *E(t)
102	136	0.02237946	2.282705282	-23.3	542.89	12.14958697
104	152	0.02501234	2.601283528	-21.3	453.69	11.34784927
106	174	0.02863255	3.035050189	-19.3	372.49	10.66533816
108	190	0.03126543	3.376666118	-17.3	299.29	9.357429653
110	197	0.03241731	3.565904229	-15.3	234.09	7.588568373
112	210	0.03455652	3.870330755	-13.3	176.89	6.112703637
114	215	0.03537930	4.033240086	-11.3	127.69	4.517582689
116	277	0.04558170	5.287477374	-9.3	86.49	3.942361363
118	382	0.06285996	7.417475728	-7.3	53.29	3.349807471
120	388	0.06384729	7.661675169	-5.3	28.09	1.793470462
122	462	0.07602435	9.274971203	-3.3	10.89	0.827905216
124	460	0.07569524	9.386210301	-1.3	1.69	0.127924963
126	458	0.07536613	9.49613296	0.7	0.49	0.036929406
128	375	0.06170808	7.898634195	2.7	7.29	0.449851901
130	210	0.03455652	4.492348198	4.7	22.09	0.763353628
135	205	0.03373375	4.554056278	9.7	94.09	3.174008557
140	195	0.03208820	4.492348198	14.7	216.09	6.933939444
145	190	0.03126543	4.533486918	19.7	388.09	12.13379957
150	180	0.02961988	4.442981734	24.7	610.09	18.07079151
155	153	0.02517690	3.902418957	29.7	882.09	22.20828863
160	142	0.02336679	3.738686852	34.7	1204.09	28.13572157
165	115	0.01892381	3.12242883	39.7	1576.09	29.82562942
170	108	0.01777193	3.021227579	44.7	1998.09	35.50990949
175	95	0.01563271	2.735724864	49.7	2470.09	38.61420931
180	48	0.00789863	1.421754155	54.7	2992.09	23.63342439
185	8	0.00131644	0.243541221	59.7	3564.09	4.691907191
190	0	0.00000000	0	64.7	4186.09	0

6077

t<sub>m</sub> = 125.30

356.45





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ซ.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

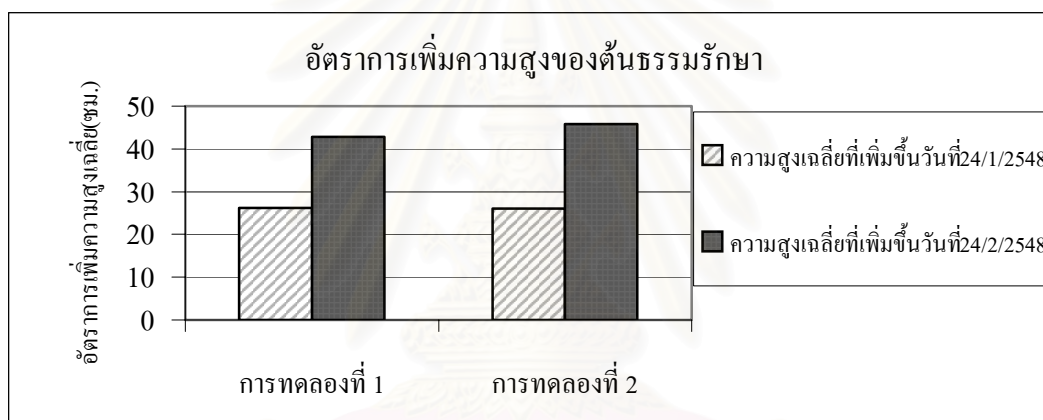
การศึกษาอัตราการระเหยน้ำของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช

### ข.1

### การเจริญเติบโตของพืช

#### ข.1.1 การเจริญเติบโตของต้นธรรมรักษา

การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นธรรมรักษา จะทำการศึกษาโดยการวัดความสูงของต้นธรรมรักษาที่จะนำมาปลูกก่อนการทดลอง และเมื่อครบกำหนดที่จะเปลี่ยนอัตราการระเหยศาสตร์ ก็จะทำการวัดความสูงอีกครั้งหนึ่ง โดยที่ความสูงในครั้งหลังนี้จะเป็นความสูงท้ายสุดของการทดลองแรก และเป็นความสูงเริ่มต้นของการทดลองที่สอง แล้วนำมาหาค่าอัตราการเพิ่มความสูง โดยที่อัตราการเพิ่มความสูงของต้นธรรมรักษาดังแสดงดังรูปที่ ข.1

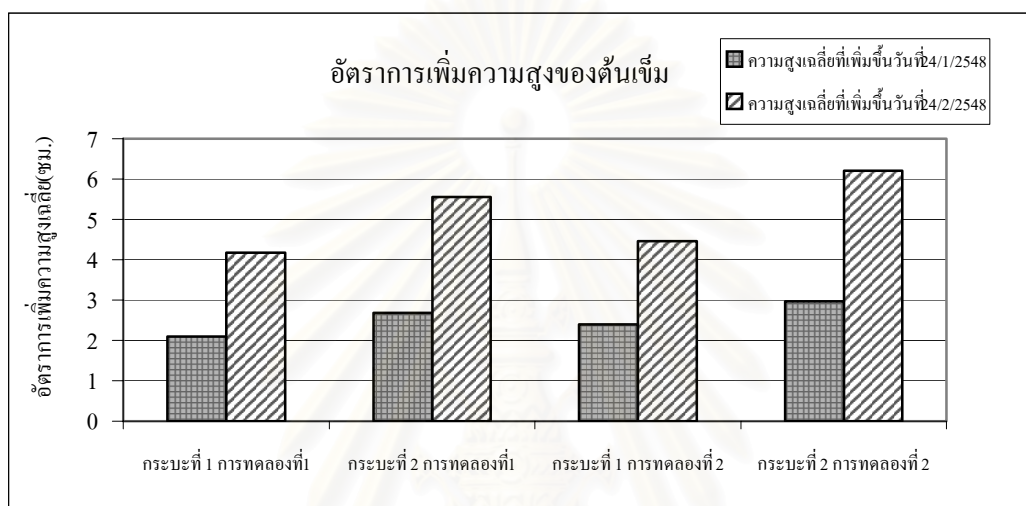


รูปที่ ข.1 แสดงอัตราการเพิ่มความสูงเฉลี่ยของต้นธรรมรักษา

จากกราฟจะเห็นว่าความสูงเฉลี่ยของต้นธรรมรักษาตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลองจนกระทั่งเปลี่ยนอัตราการระเหยศาสตร์จาก 8.23 ซม./วัน เป็น 16.46 ซม./วัน (วันที่ 1/12/2547-24/1/2548) ความสูงเฉลี่ยของต้นธรรมรักษาที่การให้น้ำแบบต่อเนื่อง(การทดลองที่ 1) กับการให้น้ำแบบเป็นระยะ(การทดลองที่ 2) มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.21 ซม.และ 26.11 ซม.ตามลำดับ เมื่อเดินระบบจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 1/12/2547-24/2/2548) ความสูงเฉลี่ยของต้นธรรมรักษาที่การให้น้ำแบบตลอดเวลา(การทดลองที่ 1) กับการให้น้ำแบบเป็นระยะ(การทดลองที่ 2) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่การให้น้ำแบบต่อเนื่องมีการเพิ่มความสูงเฉลี่ยของต้นธรรมรักษามากกว่าการให้น้ำแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 45.86 ซม. และ 42.78 ซม.ตามลำดับ

## ช1.2 การเจริญเติบโตของต้นเข็ม

การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นเข็ม จะทำการศึกษาโดยการวัดความสูงของต้นเข็มที่จะนำมาปลูกก่อนการทดลอง และเมื่อครบกำหนดที่จะเปลี่ยนอัตราภาวะชลศาสตร์ ก็จะทำการวัดความสูงอีกครั้งหนึ่ง โดยที่ความสูงในครั้งหลังนี้จะเป็นความสูงท้ายสุดของการทดลองแรก และเป็นความสูงเริ่มต้นของการทดลองที่สอง แล้วนำมาหาค่าอัตราการเพิ่มความสูง โดยที่อัตราการเพิ่มความสูงของต้นเข็มดังแสดงดังรูปที่ ช.2



รูปที่ ช.2แสดงอัตราการเพิ่มความสูงเฉลี่ยของต้นเข็ม

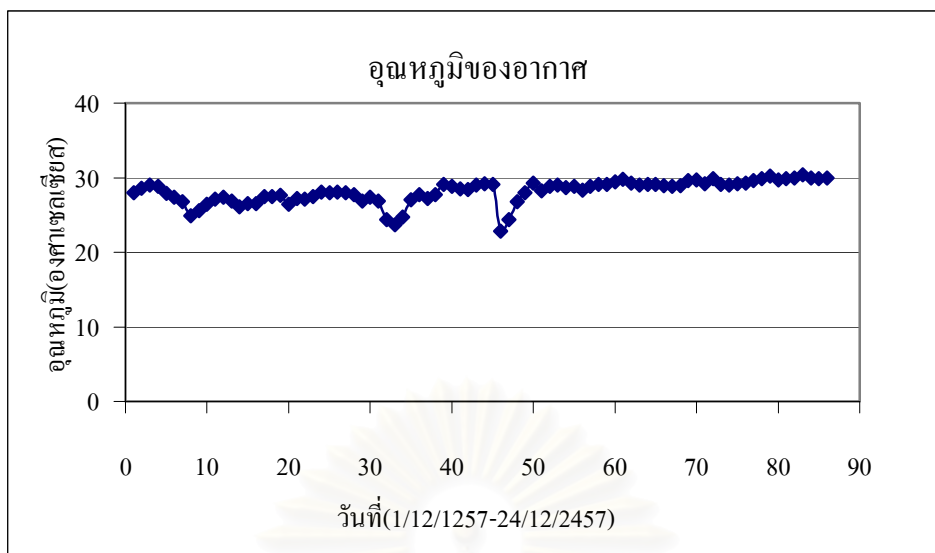
จากกราฟจะได้ว่าความสูงเฉลี่ยของต้นเข็มตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลองจนกระทั่งเปลี่ยนอัตราภาวะชลศาสตร์จาก 8.23 ซม./วัน เป็น 16.46 ซม./วัน (วันที่ 1/12/2547-24/1/2548) ความสูงเฉลี่ยของต้นเข็มที่มีการให้น้ำแบบเป็นระยะระยะที่ 1 (การทดลองที่ 2) มีค่ามากที่สุดซึ่งเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.97 ซม. รองลงมาคือระยะที่ 2 (การทดลองที่ 1) แบบการให้น้ำแบบต่อเนื่องซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.68 ซม. ส่วนระยะที่ 1 (การทดลองที่ 1) มีค่าเท่ากับ 2.09 ซม. และสุดท้ายความสูงของต้นเข็มเฉลี่ยที่ การให้น้ำแบบเป็นระยะระยะที่ 1 (การทดลองที่ 2) มีค่าเท่ากับ 2.40 ซม. เมื่อเดินระบบจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 1/12/2547-24/2/2548) ความสูงเฉลี่ยของต้นเข็มที่การให้น้ำแบบตลอดเวลา (การทดลองที่ 1) กับการให้น้ำแบบเป็นระยะ (การทดลองที่ 2) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่การให้น้ำแบบเป็นระยะระยะที่ 2 (การทดลองที่ 2) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.21 ซม. รองลงมาคือระยะที่ 2 (การทดลองที่ 1) แบบการให้น้ำแบบต่อเนื่องซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.55 ซม. ส่วนระยะที่ 1 (การทดลองที่ 1) มีค่าเท่ากับ 4.18 ซม. และสุดท้ายความสูงของต้นเข็มเฉลี่ยที่ การให้น้ำแบบเป็นระยะระยะที่ 1 (การทดลองที่ 2) มีค่าเท่ากับ 4.46 ซม.

## ช.2 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์

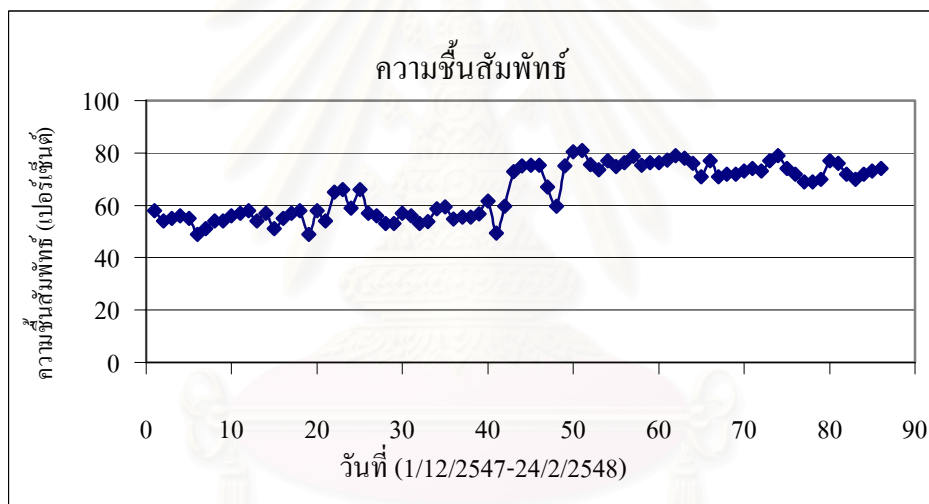
ในการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนั้นจะใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ของสถานีตรวจวัดอากาศศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ซึ่งอยู่ไม่ห่างจากสถานที่ตั้งแบบจำลองมากนัก โดยการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ดูว่าค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีผลต่อการระเหยน้ำเสียอย่างไร ซึ่งในระหว่างการทดลองนี้ อุณหภูมิของอากาศอยู่ในช่วง 22.80-30.40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 28.11 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 49.00-80.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 65.34 เปอร์เซ็นต์ จากการติดตามศึกษาพบว่าแนวโน้มในช่วงใดมีอุณหภูมิของอากาศสูง ช่วงนั้นจะสามารถระเหยน้ำเสียออกจากระบบได้มากกว่าช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และช่วงใดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ ช่วงนั้นระบบก็จะสามารถระเหยน้ำเสียออกจากระบบได้มากกว่าช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงกว่า แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีองค์ประกอบอีกหลายๆ ด้านที่มีอิทธิพลต่อการระเหยน้ำเสียออกจากระบบอีก ซึ่งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนี้จะสามารถบอกแนวโน้มว่าจะเป็นไปได้ในทางใดอย่างคร่าวๆ แต่ไม่ถึงกับละเอียดมากนัก โดยค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แสดงไว้ในตารางที่ ช.1 และรูปที่ ช.3 และช.4

ตารางที่ ช.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	22.80	30.40	28.11	1.54575	86	1/12/2547-24/2/2548
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	49.00	80.88	65.34	9.80777	86	1/12/2547-24/2/2548



รูปที่ ๓.3 อุณหภูมิของอากาศระหว่างการทดลอง



รูปที่ ๓.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศระหว่างการทดลอง

### ๓.3 ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) และปริมาณฝน (precipitation)

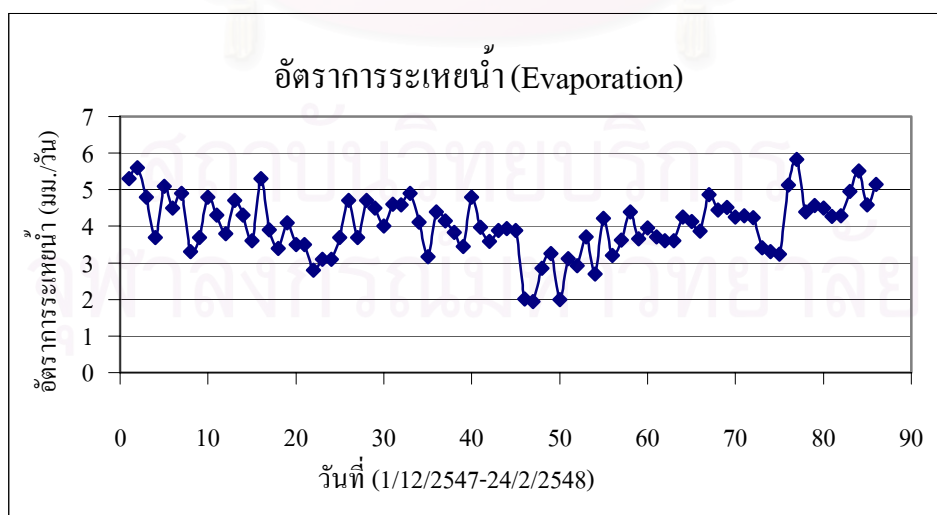
ในการบันทึกค่าอัตราการระเหยน้ำและปริมาณฝนนั้นจะจะใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ของสถานีตรวจวัดอากาศศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ ซึ่งอยู่ไม่ห่างจากสถานที่ตั้งแบบจำลองมากนัก โดยการบันทึกค่าอัตราการระเหยน้ำและปริมาณฝนนั้นเพื่อจะดูว่ามีผลต่อการระเหยน้ำเสียอย่างไร ซึ่งในระหว่างการทดลอง ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) อยู่ในช่วง 1.95-5.82 มม./วัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.02 มม./วัน และปริมาณฝนมีค่าอยู่ในช่วง 0.00-1.90 มม./วัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 มม./วัน จากการติดตามศึกษาพบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) เป็นค่าหลักที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการระเหยน้ำเสียออกจากระบบโดยตรง ซึ่ง



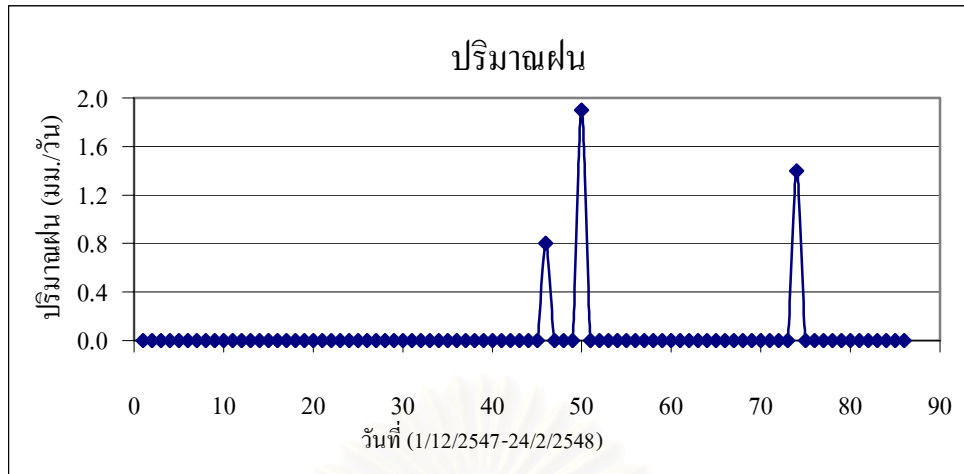
สามารถสรุปได้ว่าช่วงเวลาที่มียค่าอัตราการระเหยน้ำ(evaporation rate) สูง ระบบจะสามารถระเหยน้ำเสียออกจากระบบได้มากกว่าและเร็วกว่าช่วงเวลาที่มียค่าอัตราการระเหยน้ำ(evaporation rate) ต่ำกว่า หรือสรุปได้ว่าเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำเสียออกจากระบบจะแปรผกผันกับค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) ส่วนปริมาณน้ำเสียที่ระเหยออกจากระบบจะแปรผันตรงกับ ค่าอัตราการระเหยน้ำ(evaporation rate) ส่วนค่าปริมาณฝนนั้นจะสามารถนำมาช่วยในการหา ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) ในช่วงเวลาที่มีฝนตกลงมาสู่ระบบจะทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) ต่ำ แต่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะสูงมาก โดยที่ ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) และปริมาณฝนแสดงไว้ในตารางที่ ซ.2 และรูปที่ ซ.5 และ ซ.6

ตารางที่ ซ.2 ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate) และปริมาณฝน (precipitation)

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่าอัตราการระเหยน้ำ (evaporation rate)	1.95	5.82	4.02	0.78087	86	1/12/2547-24/2/2548
ปริมาณฝน (precipitation)	0.00	1.90	0.05	0.26445	86	1/12/2547-24/2/2548



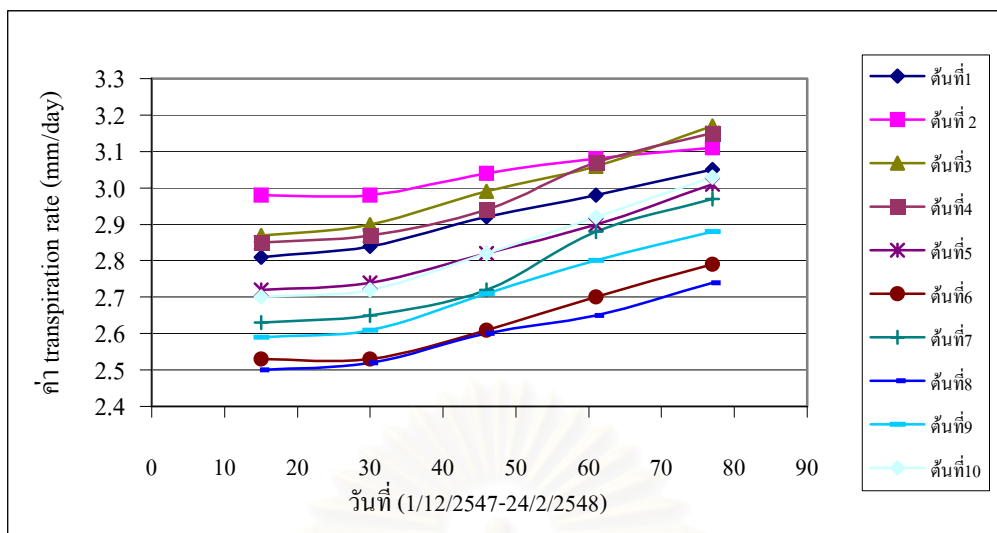
รูปที่ ซ.5 ค่าอัตราการระเหยน้ำระหว่างการทดลอง



รูปที่ ๕.6 ปริมาณฝนระหว่างการทดลอง

#### ๕.4 ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม

ในการบันทึกค่า transpiration rate ของต้นเข็มนั้น จะทำการบันทึกจากการนำต้นเข็มมาหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการดูดซึมทางราก และระเหยน้ำออกทางใบ นั่นก็คือปริมาณน้ำที่ต้นเข็มใช้ไปในแต่ละวันมาหารด้วยเวลาที่ต้นเข็มดูดซึมน้ำไปใช้กับพื้นที่ใบของต้นเข็มที่ใช้ในการระเหยน้ำ (ภาคผนวก จ ) โดยจะนำใบของต้นเข็มมาหาพื้นที่ประมาณ 40 ใบเพื่อเป็นตัวแทนใบของต้นเข็มทั้งต้น โดยการบันทึกค่า transpiration rate ของต้นเข็มนั้นเพื่อที่จะวิเคราะห์ดูว่าค่า transpiration rate ของต้นเข็มนั้นมีผลต่อการระเหยน้ำเสียอย่างไร ซึ่งการบันทึกค่า transpiration rate ของต้นเข็มจะบันทึกค่าจากการทดลองให้ต้นเข็มดูดซึมน้ำ โดยทำการทดลองที่บริเวณพื้นที่ที่ทำการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าค่า transpiration rate ของต้นเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น เนื่องจากต้นเข็มมีการเจริญเติบโตต้องใช้น้ำในการดำรงชีพมากขึ้นนั่นเอง และยังมีแนวโน้มของอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ระหว่างการทดลองด้วย นอกจากนี้ค่า transpiration rate ของต้นเข็มยังเป็นค่าที่มีความสำคัญในการบ่งชี้ถึงความสามารถในการระเหยน้ำเสียออกจากระบบ จึงพอสรุปได้ว่าหากพืชมีค่า transpiration rate สูง ระบบก็จะมีแนวโน้มในการระเหยน้ำเสียออกจากระบบได้เร็วกว่าระบบที่ใช้พืชที่มีค่า transpiration rate ต่ำกว่า แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังต้องขึ้นกับชนิดของพืชที่ใช้ และสถานะแวดล้อมของอากาศด้วย โดยที่ค่า transpiration rate ของต้นเข็มแสดงไว้ในตารางที่ ๕.3 และรูปที่ ๕.7



รูปที่ ๗.7 ค่า transpiration rate ระหว่างการทดลอง

ตารางที่ ๗.3 ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม (มิลลิเมตรต่อวัน) วันที่ 15/12/47	2.50	2.98	2.71	0.249	10	15/12/47-15/02/48
ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม (มิลลิเมตรต่อวัน) วันที่ 30/12/47	2.52	2.98	2.73	0.139	10	
ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม (มิลลิเมตรต่อวัน) วันที่ 15/01/48	2.60	3.04	2.81	0.136	10	
ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม (มิลลิเมตรต่อวัน) วันที่ 30/01/48	2.65	3.08	2.90	0.141	10	
ค่า transpiration rate ของต้นเข็ม (มิลลิเมตรต่อวัน) วันที่ 15/02/48	2.74	3.17	2.99	0.137	10	

จากข้อมูลของ Sanga et al., (1968) จะมีค่า transpiration rate ของต้นไม้ประมาณ 2.88 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า transpiration rate ของต้นเข็มที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยทั้งการทดลองประมาณ 2.83 มิลลิเมตรต่อวัน แสดงว่าต้นเข็มก็น่าจะมีเหมาะสมในการปลูกคลุมดินสำหรับระบบ evapotranspiration system ได้ แต่ทั้งนี้ยังมีพืชอีกหลายประเภทที่มีความเหมาะสมมากกว่าต้นเข็ม คือพืชที่มีปริมาณการคายน้ำไปใช้ในปริมาณมากๆ และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของอากาศได้ดี

### ช.5 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบ

ในการบันทึกค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบจะทำได้โดยการวัดความสูงของระดับน้ำในระบบว่ามีขนาดความสูงเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไรและนำไปคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำ โดยเทียบกับชั้นตัวกลางที่รู้ปริมาตรแล้ว ดังรายการในภาคผนวก ก. โดยค่าอัตราการระเหยน้ำได้แสดงไว้ในตารางที่ ช.4 และรูปที่ ช.8 สำหรับการทดลองที่ 1 (แบบน้ำไหลเข้าตลอดเวลา) และตารางที่ ช.5 และรูปที่ ช.9 สำหรับการทดลองที่ 2 (แบบน้ำไหลเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน)

ตารางที่ ช.4 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบการทดลองที่ 1 (แบบน้ำไหลเข้าตลอดเวลา)

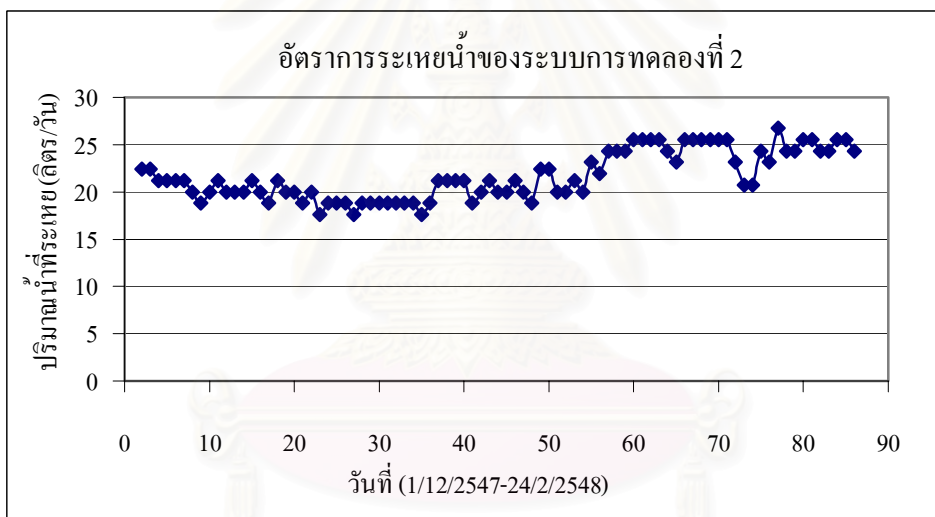
	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบ (ลิตรต่อวัน)	17.59	26.74	21.68	2.56745	85	1/12/2547-24/2/2548

ตารางที่ ช.5 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบการทดลองที่ 2 (แบบน้ำไหลเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน)

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบ (ลิตรต่อวัน)	17.59	26.74	21.68	2.53952	85	1/12/2547-24/2/2548



รูปที่ ๘.8 อัตราการระเหยน้ำออกจากระบบระหว่างการทดลองการทดลองที่ 1



รูปที่ ๘.9 อัตราการระเหยน้ำออกจากระบบระหว่างการทดลองการทดลองที่ 2

จากการทดลองข้อมูลการใช้น้ำของพืช (transpiration) และข้อมูลปริมาณน้ำระเหยจากผิวดิน (evaporation) ของกรมอุตุนิยมวิทยา การทดลองที่ 1 (ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบตลอดเวลา) จะได้ว่าปริมาณน้ำที่ระเหยได้เฉลี่ย ที่วัดได้จากการทดลองเป็นผลรวมของการใช้น้ำของพืชเฉลี่ยทั้งการทดลอง เท่ากับ 6.92 ลิตรต่อวัน และจากปริมาณน้ำระเหย (ผิวดิน) เท่ากับ 9.74 ลิตรต่อวัน และที่เหลือระเหยจากปัจจัยอื่นๆ เท่ากับ 5.02 ลิตรต่อวัน

ซึ่งในการทดลองที่ 2 (ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบเป็นระยะ) จะได้ว่าปริมาณน้ำที่ระเหยได้เฉลี่ย ที่วัดได้จากการทดลองเป็นผลรวมของการใช้น้ำของพืชเฉลี่ยทั้งการทดลอง เท่ากับ 6.92 ลิตรต่อวัน

และจากปริมาณน้ำระเหย (ถาดวัด) เท่ากับ 9.74 ลิตรต่อวัน และที่เหลือระเหยจากปัจจัยอื่นๆ เท่ากับ 5.02 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับการทดลองที่ 1

ตารางที่ ๗.6 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบจากปัจจัยอื่นๆ การทดลองที่ 1 (แบบน้ำไหลเข้าตลอดเวลา)

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	4.74	14.14	9.74	0.2692	85	1/12/2547-24/2/2548
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	6.59	7.27	6.92	1.878	85	1/12/2547-24/2/2548
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)	0.06	10.50	5.02	2.578	85	1/12/2547-24/2/2548

ตารางที่ ๗.7 ค่าอัตราการระเหยน้ำของระบบจากปัจจัยอื่นๆ การทดลองที่ 2 (แบบน้ำไหลเข้า 2 ชั่วโมงหยุด 2 ชั่วโมง สลับกัน)

	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	N	ช่วงเวลาที่บันทึกค่า
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากต้นไม้ (ลิตรต่อวัน)	4.74	14.14	9.74	0.2692	85	1/12/2547-24/2/2548
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากแสงแดด (ลิตรต่อวัน)	6.59	7.27	6.92	1.878	85	1/12/2547-24/2/2548
ค่าอัตราการระเหยน้ำจากอื่นๆ (ลิตรต่อวัน)	0.06	10.50	5.02	2.505	85	1/12/2547-24/2/2548

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศักดิ์ชัย อังกสิงห์ เกิดวันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ.2523 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนวัดกองแก้ว อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นและมัธยมปลายที่โรงเรียน วัดทรงธรรม อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย