



รายงานการวิจัย

การนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในการกำจัดไนโตรเจนและ
ฟอสฟอรัส
(Utilization of shale as adsorbent for nitrogen and phosphorus
removal)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในการกำจัดไนโตรเจนและ
ฟอสฟอรัส
(Utilization of shale as adsorbent for nitrogen and phosphorus
removal)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม/2554

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551 ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย สถานที่ในการทำวิจัย และเครื่องมือ-อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ นางสาวสายรุ้ง นพขุนทด และ นางสาวปิติพร มโนคุ่น ผู้ช่วยในการวิจัย ทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จรียา ยี่มรัตน์บวร

12 สิงหาคม 2554

บทคัดย่อ

การนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในการกำจัดไนโตรเจนและ ฟอสฟอรัส

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสหากถูกปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งรับน้ำสาธารณะได้ กระบวนการดูดซับนับว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เนื่องจากง่ายต่อดำเนินการ และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ดังนั้นถ้าตัวดูดซับมีราคาถูก และมีอายุการใช้งานนาน จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้มากยิ่งขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ นำหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มม. มาเป็นตัวกลางในชุดคอลัมน์ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และสภาวะต่างๆที่เหมาะสม เช่น ขนาดของหินดินดานของหินดินดาน และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ เพื่อนำไปใช้ในคอลัมน์สำหรับใช้ในการดูดซับเปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดและทราย ผลการศึกษาพบว่าที่ HLR เท่ากับ 6.316 และ 12.105 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ มีผลทำให้ค่าปริมาณการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนต่อน้ำหนักหินดินดานมีค่ามากที่สุด ขณะที่ HLR เท่ากับ 12.105 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสต่อน้ำหนักหินดินดานมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.310-1.587 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลการคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลาง พบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีแนวโน้มมีอายุการใช้งานมากกว่าตัวกลางกรวดและทราย ดังนั้นในการเดินระบบชุดคอลัมน์หินดินดานควรเลือกอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ 6.316 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ เพราะเป็นช่วงอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่มีคาดการณ์อายุการใช้งานนานที่สุด และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน ในปริมาณที่สูง และหินดินดานขนาด 0.25-0.50 มม. มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

Utilization of Shale as Adsorbent for Nitrogen and Phosphorus Removal

Nitrogen and phosphorus is the main cause of eutrophication in public receiving water. Adsorption is considered to be an alternative method to remove nitrogen and phosphorus because of their low cost and easy operation. Therefore, the selection of low cost and longevity adsorbent could be reduced the budget of water treatment system. In this research, shale in range of 0.25-0.50 mm of particle size was used as filter media in column sets to remove nitrogen and phosphorus from synthetic wastewater. The investigation of the N and P removal efficiencies, optimum hydraulic loading rate (HLR) and particle size and apply to use in adsorption column system and compare with gravel and sand filter media. As shown in results, at HLR 6.316 and 12.105 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ had the highest ratio of COD and ammonia-N per mass of shale. And at HLR 12.105 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ had the highest ratio of P removal per mass of shale in range of 0.310-1.587 mg/g. The longevity of filter media had been estimated and found that shale column sets can be used longer than gravel and sand column sets. In conclusions, the HLR 6.316 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ is the best hydraulic loading rate for adsorption column shale set because of their long-lasting filter media and high adsorption capacities in COD, P and ammonia-N. And the best particle size of shale is in range of 0.25-0.50 mm.

รายละเอียดการปรับปรุงรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัยเรื่อง การนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์เป็นตัว
ดูดซับในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

1. กลไกการกำจัดไนโตรเจน และซีโอดี มีทั้งกระบวนการ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และกระบวนการ
การดูดซับ ซึ่งได้เขียนอธิบายในผลของการกำจัดไนโตรเจน และซีโอดี แต่จากการทดลองไม่
สามารถระบุได้ว่า แต่ละกระบวนการเกิดขึ้นมาก-น้อย เท่าไหร่ จึงกล่าวรวมกัน ในเชิงประสิทธิภาพ
การกำจัดไนโตรเจน และซีโอดี แต่อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้ทำแก้ไขเพิ่มเติมในการอธิบายในบทที่ 4
เกี่ยวกับในกรณีที่มี HLR ที่เท่ากัน คาดว่าอัตราการเกิดการย่อยสลายจะเกิดในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน
ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนและซีโอดีที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ของหินดินดานจะมีค่าสูงกว่าในคอลัมน์กรวด
และทราย ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ (หน้า 46 และ หน้า 48)
2. ได้ตรวจแก้คำผิดและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมตามคำแนะนำในเล่มที่ส่งกลับคืนมา

จรียา ยี่มรัตน์บวร
(หัวหน้าโครงการวิจัย)

สารบัญ

หน้า

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

บทที่ 1 บทนำ

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

บทที่ 2 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	3
2.1.1 ไนโตรเจน	3
2.1.2 ฟอสฟอรัส	5
2.2 การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย	5
2.3 การดูดซับ (Adsorption)	8
2.3.1 ประเภทของการดูดซับ.....	8
2.3.2 ประเภทของสารดูดซับ.....	9
2.3.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	9
2.3.4 สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	11
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	14
2.4 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์.....	15
2.4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ.....	18
2.5 หินดินดาน (Shale)	18
2.5.1 ปริมาณและแหล่งหินดินดานในประเทศไทย.....	19

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.2	การใช้ประโยชน์หินดินดาน.....	20
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.6.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	21
2.6.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดใช้ประโยชน์หินดินดานในงานด้านสิ่งแวดล้อม..	23
2.7	สรุป.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย		
3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	26
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	26
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	26
3.3.1	การจำแนกขนาดหินดินดาน.....	26
3.3.2	การศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน.....	26
3.3.3	การออกแบบและติดตั้งชุดคอลัมน์.....	28
3.3.4	การกำหนดค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)	29
3.3.5	การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)	30
3.3.6	การหาค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.....	31
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย		
4.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพ-เคมี ของหินดินดาน.....	35
4.1.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพ	35
4.1.2	ลักษณะสมบัติทางเคมี	36
4.2	ผลการศึกษาสารติดตาม.....	37
4.3	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	39
4.4	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง HLR และความสามารถในการดูดซับของ ซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส.....	40
4.4.1	ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่า ซีโอดี	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่า ฟอสฟอรัส.....	42
4.4.3 ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่าแอมโมเนียไนโตรเจน	44
4.4.4 สรุปผลการศึกษา.....	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	45
4.5.1 ค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ที่ระยะเวลาต่างๆ....	45
4.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	46
4.5.3 ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	48
4.6 การประเมินผลการศึกษาจาก breakthrough curve.....	48
4.6.1 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดฟอสฟอรัส.....	48
4.6.2 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดไนโตรเจน.....	49
4.6.3 สรุปผลการศึกษา breakthrough curve เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งาน....	50
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ของชุดคอลัมน์.....	53
4.7.1 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ $HLR = 2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	54
4.7.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ $HLR = 6.312 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	54
4.7.3 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ $HLR = 12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	56
4.7.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน.....	56
4.8 การประเมินราคาในการนำหินดินดานใช้ในการเป็นตัวกลางสำหรับการดูดซับฟอสฟอรัส.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย	
สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	58
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก	
ก. การคำนวณอัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์.....	64
ข. ผลการศึกษาสารติดตาม.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ค. ผลการคำนวณค่ากระจายการไหล.....	78
ง. ผลการคำนวณค่าการดูดซับที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ต่างๆ.....	83
จ. ปริมาณการสะสม สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ต่อปริมาณตัวกลาง ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	129
ฉ. การประเมินอายุการใช้งานของระบบ จาก Breakthrough curve.....	139
ช. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน.....	146
 ประวัติผู้ทำวิจัย.....	 156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย..... 6
2-2	ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี..... 9
2-3	ส่วนประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของหินดินดาน..... 19
2-4	ปริมาณและมูลค่าการผลิต การใช้หินดินดาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2546 20
3-1	ขนาดของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษา..... 28
3-2	วิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างหินดินดาน..... 28
3-3	อัตราการไหลและภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย..... 30
3-4	ค่าการกระจายของการไหล..... 31
3-5	องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา..... 32
3-6	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง..... 32
4-1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน..... 36
4-2	องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน..... 37
4-3	ผลการศึกษาสารติดตามที่ $HLR = 2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ และ $HLR = 12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ที่.....38 $HLR = 2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
4-4	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย..... 40
4-5	ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ HLR.....41 แตกต่างกัน
4-6	การศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสที่ผ่านมา.....43
4-7	ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ $HLR = 2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$53
4-8	ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ $HLR = 6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$54
4-9	ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ $HLR = 6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$55
4-10	เปรียบเทียบราคาตัวกลางแต่ละชนิด.....57
4-11	สัดส่วนราคาในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนกับระยะเวลา.....	4
2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย และแอมโมเนียมไนโตรเจน กับพีเอชและอุณหภูมิ	4
2-3 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับพีเอชต่าง ๆ.....	5
2-4 รูปแบบของไอโซเทอร์มของการดูดซับ	10
2-5 กราฟแสดงไอโซเทอร์มแบบ Langmuir.....	12
2-6 กราฟแสดงไอโซเทอร์มแบบ Freundlich.....	13
2-7 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหล..... แบบ Upflow (Metcalf and Eddy, 2004)	16
3-1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	27
3-2 แผนภาพชุดคอลัมน์การเข้าสู่สมดุลการดูดซับ.....	29
3-3 การติดตั้งชุดคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับ.....	33
3-4 ถังรวบรวมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนนำเข้าสู่ชุดทดลองคอลัมน์.....	33
4-1 ผลการศึกษาสารติดตามที่ HLR $6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ และที่ HLR $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	39
4-2 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR แตกต่างกัน.....	42
4-3 ปริมาณฟอสเฟตต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR แตกต่างกัน.....	43
4-4 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR แตกต่างกัน.....	44
4-5 ค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค).....	46
4-6 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของชุดคอลัมน์ RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค).....	47
4-7 ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียของชุดคอลัมน์ RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค).....	49
4-8 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough และจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์ ในการบำบัดฟอสฟอรัส.....	50
4-9 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ ในการบำบัดฟอสฟอรัส.....	51
4-10 ค่าความสามารถในการดูดซับของฟอสเฟตเมื่อถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์.....	51
4-11 ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์.....	51
4-12 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough และจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์ ในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-13 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอยล์หมันจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ ในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน.....	52
4-14 ค่าความสามารถในการดูดติดของแอมโมเนียไนโตรเจนเมื่อถึงจุดหมดสภาพของชุดคอยล์หมัน.....	52
4-15 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพของชุดคอยล์หมัน.....	53

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาของการวิจัย

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสารอินทรีย์ที่มักปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชน หากไม่ได้รับการบำบัด จะก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน ในแหล่งรับน้ำสาธารณะได้ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปมักจะบำบัดสารอินทรีย์ในรูปคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดจึงยังมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสคงเหลืออยู่ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแหล่งรับน้ำสาธารณะและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ สำหรับกระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนั้นมีด้วยกันหลายกระบวนการ ทั้งกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อจำกัดในด้านความยากง่ายของการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ การก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ เช่น วิธีทางชีวภาพมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพอยู่เสมอ เนื่องจากน้ำเสียบางประเภทอาจจะมีสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางตัวที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ได้ และยังต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมของระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย ส่วนการกำจัดด้วยวิธีทางเคมี จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีการใช้พื้นที่น้อย แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนด้านอุปกรณ์และสารเคมีที่สูงด้วย ซึ่งการที่จะเลือกวิธีการกำจัดแบบใดนั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาหลายปัจจัยร่วมด้วย เช่น ลักษณะของน้ำเสีย มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง นอกจากนี้ระบบบำบัดที่ใช้กำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียบางระบบ มีการอาศัยกระบวนการบำบัดหลายกระบวนการรวมกัน เช่น การบำบัดทางชีวภาพโดยระบบเอเอส ร่วมกับการดูดซับทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นวิธีการดูดซับจึงนับว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีง่ายต่อดำเนินการ และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะถ้าตัวดูดซับมีราคาถูก จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้มากยิ่งขึ้น

หินดินดาน (Shale) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งที่มีเนื้อละเอียด ประกอบด้วยอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว ทับถมกันเป็นชั้นบาง ๆ หนาแน่น องค์กรประกอบหลักทางเคมีโดยประมาณของหินดินดาน ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 58-60 อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 14-16 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4-5 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; Martin Marietta Material, 2004) สัดส่วนของหินดินดานมีอยู่มากถึงร้อยละ 70 ของหินตะกอนทั้งหมดบนเปลือกโลก สำหรับประเทศไทยแหล่งหินดินดานพบมากที่จังหวัดสระบุรี นครศรีธรรมราช และเพชรบุรี (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) และส่วนใหญ่มักใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียม จากผลการศึกษาของ Drizo et al. (1999) พบว่าหินดินดานมีความสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีถึง 0.65-0.70 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากว่าองค์ประกอบที่เป็นแร่เหล็ก อะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม และแมกนีเซียม สามารถดูดซับฟอสฟอรัสและเกิดเป็นสารประกอบกับฟอสเฟตได้ จึงมีการนำหินดินดานมาศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับและใช้เป็นตัวกลางสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าหินดินดานมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 98-100 ที่

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียมไนโตรเจนร้อยละ 40-75 และไนเตรทไนโตรเจนร้อยละ 45-75 ที่ความเข้มข้นไนโตรเจนเริ่มต้น 46 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังพบว่า *Phragmites australis* สามารถเจริญเติบโตบนดินดานได้ดี ทำให้ลำต้นส่วนที่อยู่ใต้ดิน (Rhizome) และรากพืชมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Drizo et al., 1997; 2000)

ในการศึกษาครั้งนี้นำหินดินดานมาทดสอบใช้เป็นตัวดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและสถานะต่างๆที่เหมาะสม เช่น ขนาดของหินดินดานของหินดินดานในการนำไปใช้เป็นตัวกลางดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ในการนำไปใช้ในคอลัมน์สำหรับใช้ในการดูดซับ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำก่อนนำไปผลิตน้ำประปา และการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลางดูดซับในชุดคอลัมน์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาสถานะที่เหมาะสม เช่น ขนาดของหินดินดาน อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ ในการนำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับในการบำบัดน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของหินดินดาน เช่น ขนาดของหินดินดาน พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน และองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน
- 1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานไปใช้เป็นตัวกลางในชุดคอลัมน์
- 1.3.3 ศึกษาอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมในการนำหินดินดานไปใช้เป็นตัวกลางในชุดทดสอบบำบัดน้ำ
- 1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานกับตัวกลางชนิดอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 นำไปปรับปรุงเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มเติมจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเดิมที่มีอยู่แล้วเพื่อเพิ่มคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย
- 1.4.2 นำไปใช้ในหน่วยบำบัดน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาของชุมชน

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

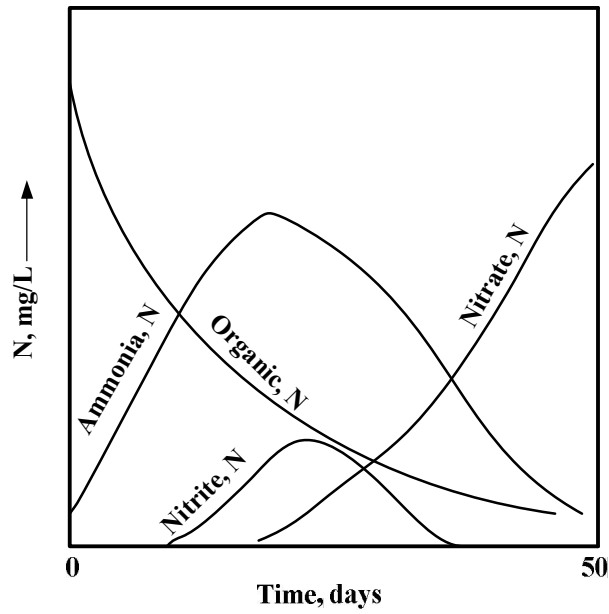
2.1 ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

2.1.1 ไนโตรเจน

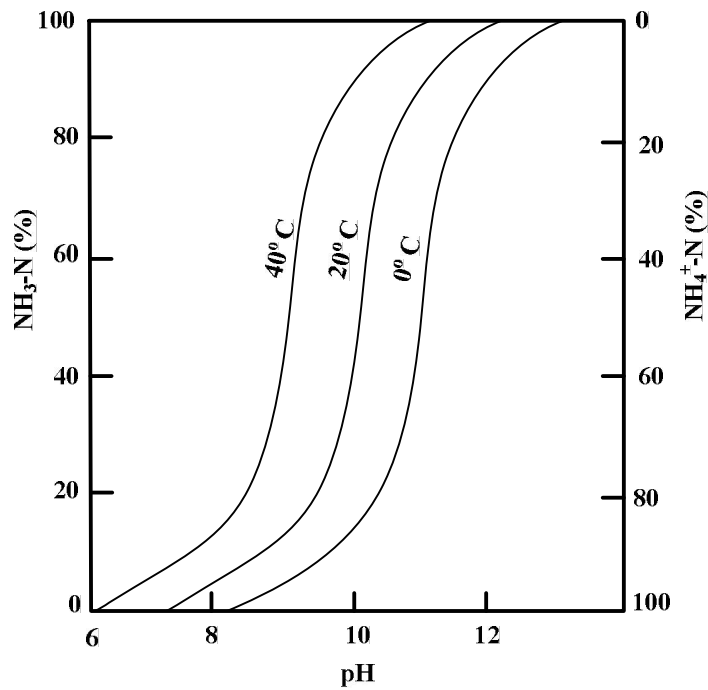
ไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของบรรยากาศโดยทั่วไป และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการดำรงอยู่ของพืชและสัตว์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไนโตรเจนและการเปลี่ยนแปลงออกซิเดชันสเทตต่าง ๆ เกิดขึ้นโดยสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย สามารถเปลี่ยน วาเลนซ์ของไนโตรเจนให้มากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับว่าเป็นสถานะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน สารประกอบไนโตรเจนในน้ำมีอยู่ 2 พวกใหญ่ ๆ ได้แก่ สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic Nitrogen) เช่น แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไนไตรท์ (NO_2^-) ไนเตรท (NO_3^-) สารกลุ่มนี้อาจอยู่ในรูปปุ๋ยหรือเกลือในปัสสาวะ ส่วนอีกชนิดหนึ่งคือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก กรดอะมิโน สารพวกนี้เป็นส่วนประกอบในของพืช สัตว์ ในสิ่งขับถ่าย ไนโตรเจนสามารถเข้าสู่แหล่งน้ำได้หลายทาง เช่น อาจถูกพัดพามาโดยน้ำชะผิวดิน น้ำจากแหล่งเกษตรกรรม น้ำที่ระบายจากชุมชน หรือน้ำเสียที่ระบายจากโรงงานอุตสาหกรรมจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในสารประกอบหลายรูป

น้ำทิ้งจากชุมชนจะพบไนโตรเจนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์และแอมโมเนีย ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายโปรตีนในร่างกายมนุษย์ น้ำเสียใหม่จะมีไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 60 และในรูปของแอมโมเนียร้อยละ 40 ในสถานะที่มีออกซิเจนจะมีการย่อยสลายโปรตีนและการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เกิดขึ้น โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจน จากนั้นแบคทีเรียจะเปลี่ยนแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็น ไนไตรท์ และไนเตรท ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการบำบัดน้ำเสียและปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ แสดงดังรูปที่ 2-1 นอกจากระยะเวลาของการบำบัดน้ำเสียจะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนแล้ว พีเอชและอุณหภูมิของน้ำเสียก็มีผลต่อการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนด้วย โดยที่ระดับพีเอช 7 แอมโมเนียมไนโตรเจน จะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) แต่ถ้าหากพีเอชเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แอมโมเนียมไอออนเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียอิสระ (NH_3) มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2-2

น้ำเสียที่มีไนโตรเจนอยู่เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเป็นพิษของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อสัตว์น้ำและปลา เมื่อน้ำอยู่ในสถานะที่มีพีเอชมากกว่า 7 การเกิดปฏิกิริยานิตริฟิเคชันทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เนื่องจากความต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนเตรทไนโตรเจน อีกทั้ง ไนเตรทไนโตรเจนยังส่งผลให้เกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ถ้าบริโภคน้ำที่มีสารประกอบไนเตรทหรือไนไตรท์เข้าไปในปริมาณมากจะทำให้เกิดโรค Methemoglobinemia หรือ Blue Baby โดยเฉพาะในเด็กทารกที่มีอายุน้อยกว่า 6 เดือน



รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนกับระยะเวลา (Sawyer et al., 2003)



รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย และแอมโมเนียมไนโตรเจน กับพีเอชและอุณหภูมิ (Kadlec and Knight, 1996)

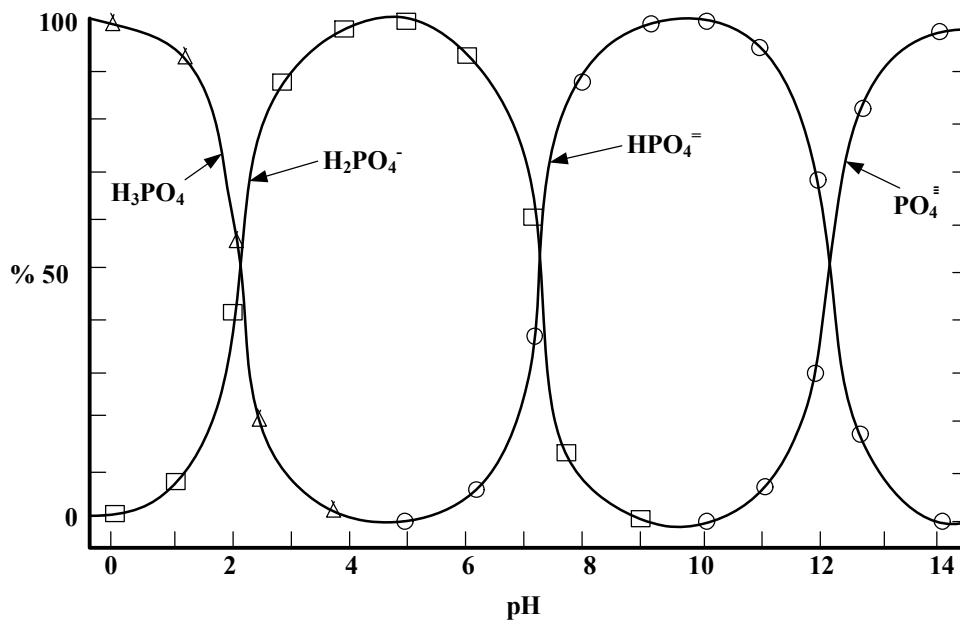
2.1.2 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมอยู่ในรูปของแข็ง สารแขวนลอย หรือสารละลาย ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น อินทรีย์ฟอสเฟต ออร์โธฟอสเฟต คอนเดนซ์ฟอสเฟต ซึ่งคอนเดนซ์ฟอสเฟตสามารถถูกไฮโดรไลซิสเป็นออร์โธฟอสเฟตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และพีเอชต่ำ และในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต นอกจากนี้พีเอชของน้ำยังเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมคุณสมบัติของสารประกอบฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ 2-3

ฟอสฟอรัสถือว่าเป็นสารมลพิษอย่างหนึ่งที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชน และยังเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต เช่นเดียวกับไนโตรเจน ฟอสเฟตมีความสำคัญต่อการเกิดยูโทรฟิเคชัน ทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวคล้ำก้น แสงอาทิตย์ส่องลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น จนไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำในการเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต หรือนำไปใช้ประโยชน์ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้

2.2 การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

โดยทั่วไปการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียมักมีวิธีทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวภาพที่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตารางที่ 2-1 ได้สรุปวิธีการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย และแสดงข้อดี-ข้อเสียของแต่ละวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-3 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

(Kadlec and Knight, 1996)

ตารางที่ 2-1 วิธีกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

ชนิดของกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. วิธีทางชีวภาพ		
1.1 ไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน (Nitrification-Denitrification)	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นระบบที่ประหยัดค่าสารเคมี 2. ไม่มีปัญหาการกำจัดสุดท้าย 3. สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ทั้งหมด 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องมีระบบถังบำบัดมากกว่าระบบเอเอสทั่วไป 2. สารพิษอาจส่งผลให้ระบบบำบัดขาดเสถียรภาพ
1.2 การเก็บเกี่ยวสาหร่าย (Algal Harvesting)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสได้ 2. เป็นระบบที่ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องการระบบจัดเก็บและกำจัดสาหร่าย 2. ต้องมีภูมิอากาศที่เหมาะสมตลอดทั้งปี
1.3 ระบบเอเอสตัดแปลง (มีทั้ง Anoxic-Aerobic)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดทั้งไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ในระบบเดียว 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีปริมาณสลัดจ์ที่ต้องถ่ายเททิ้งออกมากกว่าระบบเอเอสธรรมดา 2. สารพิษอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบำบัดขาดเสถียรภาพ
2. วิธีทางกายภาพ-เคมี	ไม่มีสลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัด	
2.1 การไลก๊าศแอมโมเนีย (Ammonia Stripping)		<ol style="list-style-type: none"> 1. อุณหภูมิและพีเอชมีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย 2. อาจเกิดตะกอนขึ้นในระบบ
2.2 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดได้ทั้งไนเตรท และแอมโมเนียม 2. เป็นระบบที่ใช้พื้นที่บำบัด น้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นระบบที่มีค่าลงทุนและดำเนินการสูง 2. ต้องดูแล บำรุงรักษาระบบอย่างสม่ำเสมอ
2.3 การแยกด้วยไฟฟ้า-เยื่อกรอง (Electrodialysis)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพ สูง สามารถผลิตเป็นน้ำดื่มบริสุทธิ์ได้ 2. ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องมีระบบบำบัดเบื้องต้นก่อนเข้าระบบนี้ 2. ต้องหาวิธีและสถานที่กำจัดพวกเกลือที่ใช้ในระบบบำบัด

ตารางที่ 2-1 วิธีกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย (ต่อ)

ชนิดของกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
2.4 การแยกด้วยเคมีไฟฟ้า	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ 2. ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ประสิทธิภาพการกำจัดไม่สูงมาก 2. เป็นระบบที่มีค่าลงทุนด้านอุปกรณ์และดำเนินการสูง
2.5 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ 2. ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นระบบที่มีค่าลงทุนด้านอุปกรณ์และดำเนินการสูงมาก 2. ต้องดูแลระบบอย่างดี เพราะแผ่นเยื่อกรองสกปรกอุดตันได้ง่าย
2.6 การกลั่น (Distillation)	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีแยกธาตุต่าง ๆ ออกจากน้ำเสียทำให้ได้คุณภาพน้ำเทียบเท่ากับน้ำดื่ม 2. ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 	มีค่าลงทุนด้านอุปกรณ์และดำเนินการสูง
2.7 การทิ้งลงพื้นดิน (Land Application)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ 2. ไม่มีน้ำทิ้งออกเกิดจากระบบบำบัด 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้พื้นที่มากในการบำบัดน้ำเสีย 2. อาจมีน้ำทิ้งไหลซึมออกลงสู่แหล่งน้ำข้างเคียง 3. เกิดปัญหาเมื่อมีปริมาณฝนตกมากกว่าพื้นที่จะรองรับได้
3. วิธีทางเคมี		
3.1 การตกตะกอนผลึก (Precipitation)	<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 2. ใช้พื้นที่บำบัดน้อย 3. สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าลงทุนและดำเนินการสูง 2. ต้องหาวิธีกำจัดพวกสลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัด
3.2 การเติมคลอรีนพอดิใช้ทำปฏิกิริยา (Break Point Chlorination)	สามารถกำจัดไนโตรเจนได้	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องทำการทดลองบำบัดน้ำเสียเพื่อที่จะได้ทราบปริมาณคลอรีนที่ต้องการใช้ 2. ไปเพิ่มค่า TDS ในน้ำทิ้ง 3. อาจเกิดสารไนเตรทขึ้นจากกระบวนการคลอรีน

หมายเหตุ : จาก เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543; 2547; Metcalf and Eddy, 2004

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยวิธีทางชีวภาพมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพอยู่เสมอ ซึ่งน้ำเสียบางประเภทอาจจะมีสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์บางชนิดที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ได้ และยังคงมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมของระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย การกำจัดด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีการใช้พื้นที่น้อย แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนด้านอุปกรณ์และสารเคมีที่สูงด้วย นอกจากนี้ระบบบำบัดที่ใช้กำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียบางระบบ มีการอาศัยกระบวนการบำบัดหลายกระบวนการรวมกัน เช่น พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับระบบบำบัดอื่น โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมีรวมกัน นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในด้านการก่อสร้างระบบต่ำ การดำเนินระบบและการดูแลบำรุงรักษาง่าย รวมทั้งยังส่งเสริมการมีทัศนียภาพที่บริเวณพื้นที่ระบบบำบัดอีกด้วย (Kadlec and Knight, 1996; Cooper et al., 1996)

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง การดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพ และเคมี ซึ่งเกี่ยวกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิว ซึ่งสามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของ 2 วัสดุภาค เช่น ของเหลวกับของแข็ง ก๊าซกับของแข็ง

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

ธรรมชาติของแรงระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและผิวของสารดูดซับ เป็นปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงยึดชนิดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) จะเกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption หรือ Physisorption) ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption หรือ Physisorption)

เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) ประมาณ 20 กิโลจูลต่อโมล หรือน้อยกว่า และไม่ทำให้โครงสร้างผิวของสารดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการดูดซับ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระบบ การดูดซับทางกายภาพจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก การดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะทำให้เกิดการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถศึกษาได้ทั้งกระบวนการดูดซับและคายออก (Desorption) นอกจากนี้สารที่ถูกดูดซับสามารถที่จะเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer)

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

มักเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ เกิดการสร้างสารประกอบระหว่างสารดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ จะให้ความร้อนออกมาสูงมาก พลังงาน

ศักย์ของอันตรกิริยามาก ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และดูดซับตัวถูกละลายได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สามารถเกิด Desorption ได้ พบว่าสารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิกปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งการดูดซับทางเคมีและกายภาพ มีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดงในตารางที่ 2-2

2.3.2 ประเภทของสารดูดซับ

หมายถึง สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่าง ๆ มาติดผิวได้มีหลายชนิด มันสิน ตัณซูลเวทซ์ (2542) ได้แบ่งสารดูดซับ (Adsorbent) ออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.3.2.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียออกไซด์ (MgO) ถ่านกระดูก (Bone Char) Activated Silica เป็นต้น สารอนินทรีย์ธรรมชาติจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่ก็มีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์

ตารางที่ 2-2 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)	≤ 20	50-400
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ ไม่ผันกลับ
5. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer, multilayer	monolayer

หมายเหตุ : ที่มา ธาณี สิทธิไพโรจน์สกุล (2547)

2.3.2.2 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งสารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

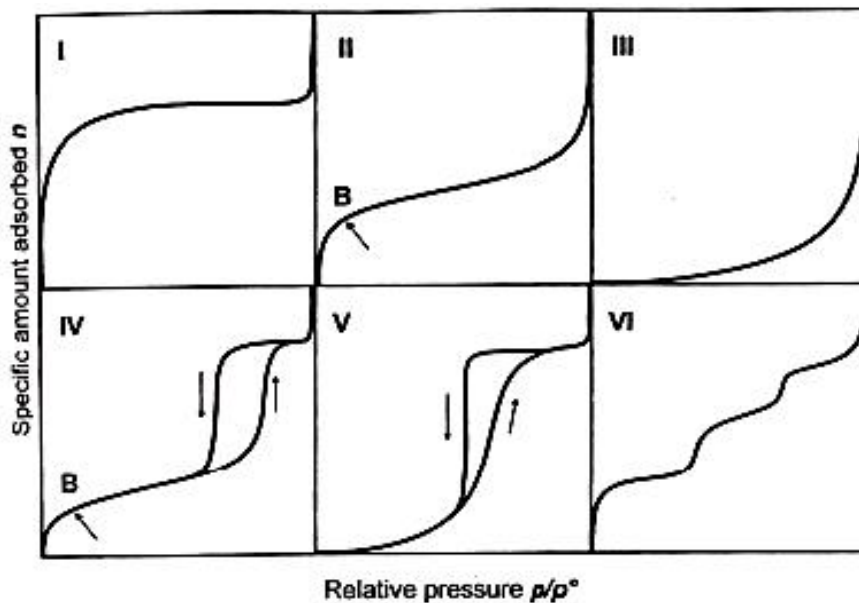
2.3.2.3 ถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

2.3.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับจะพิจารณาจากไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งเป็นการแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของ

สารดูดซับ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับรูปแบบของไอโซเทอรัม แบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ (Rouquerol et al., 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2-4

2.3.3.1 Type I Isotherm เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด ซึ่งดูดซับโดยที่มีชั้นของสารถูกดูดซับคลุมบนผิวของสารดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งชั้น (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powders ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous หรือ Nonporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2-4 รูปแบบของไอโซเทอรัมของการดูดซับ (Rouquerol et al., 1999)

2.3.3.2 Type II Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของสารดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่านันต์) โดยจะเกิดบน Nonporous Powder ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) จะเกิดเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์ แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multilayer

2.3.3.3 Type III Isotherm เป็นการดูดซับคล้าย Type II Isotherm แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับของของเหลว ดังนั้น

การดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าการเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกดูดซับ

2.3.3.4 Type IV Isotherm การดูดซับของโมเลกุลชั้นแรก ๆ จะคล้ายกับ Type II Isotherm แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัว เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ของตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ปรากฏการณ์นี้จะเกิดบนสารดูดซับที่รัศมีประมาณ 15-1000 อังสตรอม

2.3.3.5 Type V Isotherm เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type III Isotherm ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV Isotherm เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาค้ำกันและขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

2.3.3.6 Type VI Isotherm หรือ Stepped Isotherm มีลักษณะการดูดซับเป็นขั้น ๆ รูปร่างของแต่ละขั้นจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิ

2.3.4 สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับในรูปสมการ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ สำหรับ ไอโซเทอร์มของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freundlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และ สมการแบบ Freundlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547) ซึ่งจะได้อธิบายสมการทั้งสองดังต่อไปนี้

2.3.4.1 ไอโซเทอร์มแบบ Langmuir

เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเสนอขึ้นโดยเออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 โดยมีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Site) ที่แน่นอน ในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาของแลงเมียร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับของของเหลวกับสารดูดซับได้ดังสมการ (2.1) ซึ่งเป็นรูปแบบการแสดงระบบของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ สารถูกดูดซับถูกจำกัดให้ปกคลุมตัวดูดซับเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นไม่มีการซ้อนทับกันของโมเลกุล

$$\frac{x}{m} = X = \frac{X_m K C_e}{1 + K C_e} \quad (2.1)$$

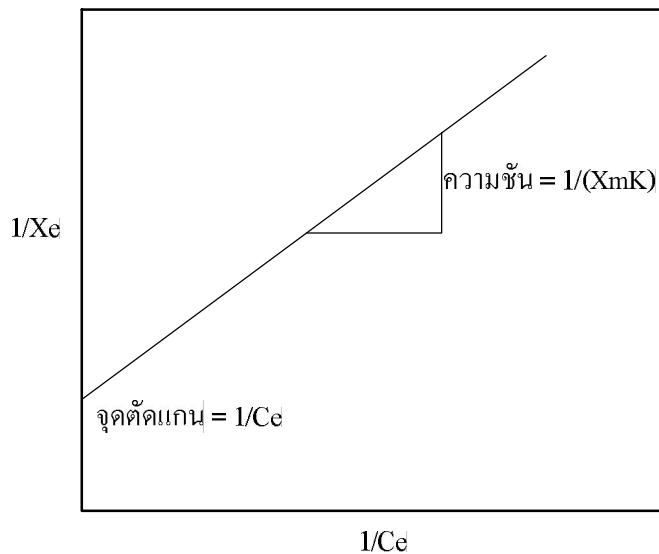
- โดยที่ x คือ ปริมาณสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัม)
 m คือ ปริมาณสารดูดซับ (กรัม)
 X คือ ปริมาณสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 X_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K คือ ค่าคงที่ (Adsorption Binding Constant)

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{X_m K} + C_e \frac{1}{X_m} \quad (2.2)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{X_e}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ ที่อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่

2-5 จุดตัดบนแกน y สามารถใช้หาค่า $\frac{1}{X_m}$ และความชันของกราฟจะให้ค่า $\frac{1}{X_m K}$ ซึ่งจะใช้คำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้



รูปที่ 2-5 กราฟแสดงไอโซเทอร์มแบบ Langmuir

2.3.4.2 ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich

สำหรับการดูดซับในสารละลาย ฟรอยด์ลิค ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การดูดซับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (2.3)

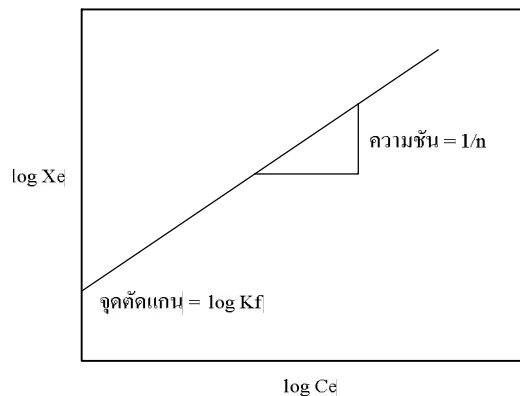
$$\frac{x}{m} = X = K_f C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

- โดยที่ x คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัม)
 m คือ ปริมาณสารดูดซับ (กรัม)
 X คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K_f คือ ค่าคงที่ของระบบ
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 n คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\log X_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.4)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 2-6 จุดตัดบนแกน y สามารถใช้หาค่า K_f ได้ และความชันของกราฟสามารถหาค่า n ได้



รูปที่ 2-6 กราฟแสดงไอโซเทอร์มแบบ Freundlich

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวสารดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ในโพรงและบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ณ จุดสมดุล (มันซิน ตันซูลเวคม์, 2542) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

2.3.5.1 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านในโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับ หรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่าง ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าหาสารดูดซับเร็วกว่า กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.3.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของสารดูดซับจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ คือขนาดของตัวดูดซับเล็กจะมีอัตราการเร็วในการดูดซับสูง ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่าสารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีหลายวิธี เช่น การกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือการใช้ความร้อน

2.3.5.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงจะหลุดเข้าไปได้

2.3.5.4 ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออน ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่มีความสามารถในการละลายหรือมีความสามารถในการละลายได้น้อยมักเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่มีความสามารถในการละลายได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะบนผิวของตัวดูดซับ

2.3.5.5 อุณหภูมิของระบบ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.3.5.6 พีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอชของสารละลายมีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากแรงดูดซับระหว่างผิวสัมผัสกับไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าสูง เพราะฉะนั้นการดูดซับไอออน อื่น ๆ จึงได้รับผลกระทบ นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับผิวและความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ

2.3.5.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

2.3.5.8 ตัวทำละลาย

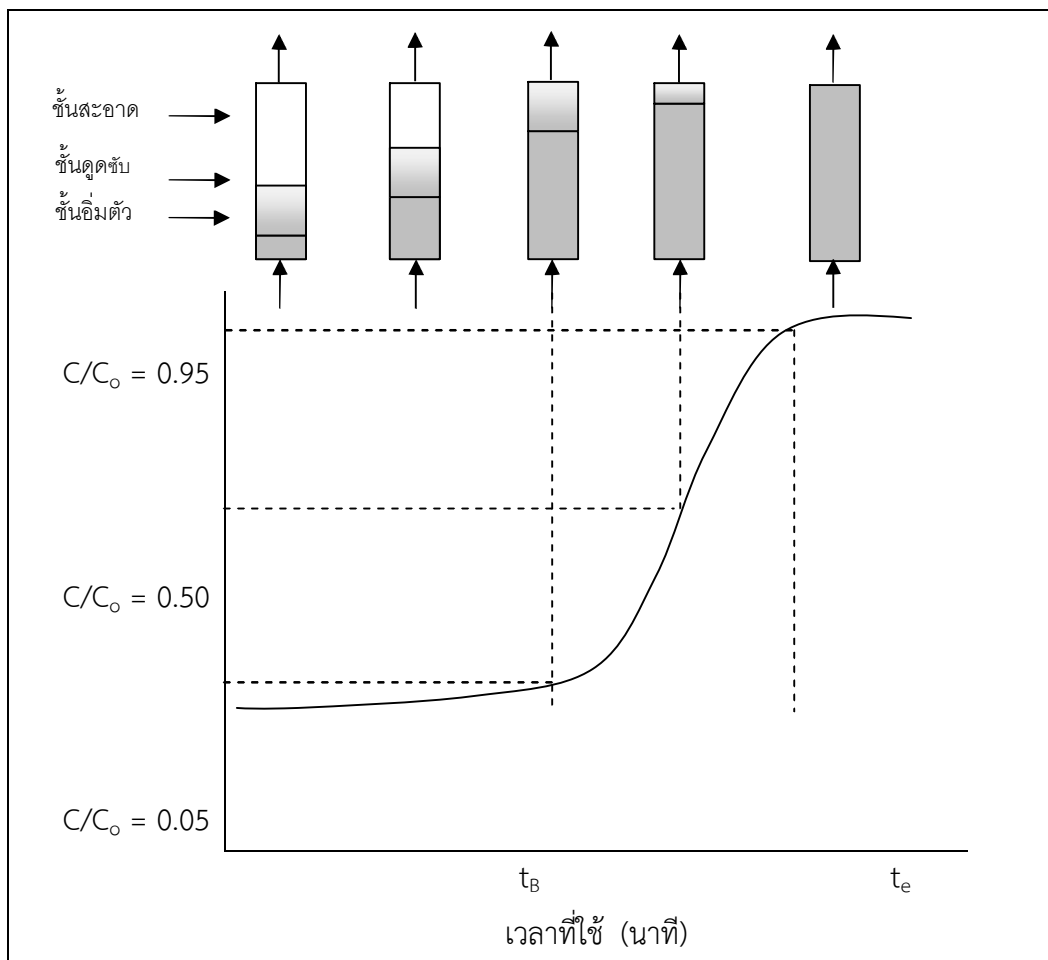
อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งเป็นแบบใดขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ
- แรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.4 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดหลอดคอลัมน์

ในการนำกระบวนการดูดซับไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียมักใช้การดูดซับแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) มากกว่าแบบกะ (Batch) การดูดซับ แบบต่อเนื่อง โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์และปล่อยให้สารละลายของสารที่ถูกดูดซับ ไหลผ่านคอลัมน์ โดยสารดูดซับที่บริเวณจุดที่ป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง การดูดซับแบบ Fixed bed สามารถออกแบบการไหลผ่านสารดูดซับได้ 2 แบบ คือ การไหลผ่านสารดูดซับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (Upflow) และการไหลจากด้านบน ลงสู่ด้านล่าง (Downflow) โดยที่การไหลแบบ Downflow จะใช้สารดูดซับเป็นทั้งตัวดูดซับและตัวกรอง แต่ถ้าระบบเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องการการกรองการไหลผ่านแบบ Upflow จะมีความเหมาะสมกว่าการไหลแบบ Downflow เนื่องจากสามารถลดผลของ Pressure drop ทำให้สารละลายไหลผ่านช่องแคบได้ดีขึ้น ช่วยลดการอุดตันของสารดูดซับ สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ดีขึ้น และมี ความเหมาะสมสำหรับสารดูดซับที่มีขนาดเล็ก ทำให้สามารถลดขนาดของสารดูดซับลงได้

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบ Fixed Bed โดยการป้อนสารที่ถูกดูดซับน้ำเข้าสู่คอลัมน์ ที่บรรจุสารดูดซับด้วยอัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ที่ส่วนล่างเท่ากับอัตราการดึง สารที่ถูกดูดซับออกจากคอลัมน์ที่ส่วนบนอย่างต่อเนื่อง พบว่าเมื่อป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์สารดูดซับในส่วนล่างของคอลัมน์จะสัมผัสกับสารที่ถูกดูดซับก่อน และเกิดการดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับจนสารดูดซับอิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาจนกระทั่งสารดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ซึ่ง Breakthrough Curve ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) (กนกพรพรรณ ศักดิ์สุริยา , 2548) โดยจุดเบรคทรู คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของ สารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ และจุดหมดสภาพ คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 95 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (Metcalf and Eddy, 2004)



รูปที่ 2-7 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow (Metcalf and Eddy, 2004)

จากการศึกษา Breakthrough curve สามารถคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของ สารดูดซับ ในระบบ และทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของ Breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความลึกหรือความสูงของสารดูดซับและอัตราเร็ว ในการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ แต่โดยส่วนใหญ่ค่าที่จุดเบรคทรูจะขึ้นอยู่กับชนิดของ สารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ คือ ค่าที่จุดเบรคทรูจะลดลงเมื่อสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือ ลดระดับความสูงของสารดูดซับ หรือมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546; ธิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

จากรูปที่ 2-7 สามารถแบ่งชั้นของสารดูดซับออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ ได้แก่ ชั้นแรกเป็นชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ (Saturated zone) ชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ L_{MTZ} ชั้นที่ 3 เป็นชั้นที่สารดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่าชั้นสะอาด (Clean zone) โดยความยาวของชั้นการดูดซับหาได้จากสมการที่ 2.5 หรือ 2.6

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right) \quad (2.5)$$

โดย L_{MTZ} = ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
 L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
 t_b = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (นาที)
 t_s = เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)

$$Z_s = L \left(\frac{V_z}{V_T - 0.5V_z} \right) \quad (2.6)$$

โดย Z_s = ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
 Z = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
 V_B = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)
 V_T = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)
 V_Z = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)

2.4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty Bed Contact Time: EBCT)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองคอลัมน์จากขนาดทดลองเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$EBCT = \frac{BV}{Q} \quad (2.7)$$

$$Usage \ rate = \frac{W}{V_B} \quad (2.8)$$

- โดย BV = ปริมาตรของสารดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 Q = อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
 W = น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์ (กรัม)

2.5 หินดินดาน (Shale)

หิน คือ มวลของแข็งที่ประกอบไปด้วยแร่ชนิดเดียวกัน หรือหลายชนิดรวมตัวกันอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากองค์ประกอบของเปลือกโลกส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ดังนั้นเปลือกโลกส่วนใหญ่จึงเป็นแร่ตระกูลซิลิเกต นอกจากนั้นยังมีแร่ตระกูลคาร์บอเนต เนื่องจากบรรยากาศโลกในอดีตส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำฝนได้ละลายคาร์บอนไดออกไซด์บนบรรยากาศลงมาสะสมบนพื้นดินและมหาสมุทร สิ่งมีชีวิตอาศัยคาร์บอนสร้างธาตุอาหารและร่างกาย แพลงตอนบางชนิดอาศัยซิลิกาสร้างเปลือก เมื่อตายลงทับถมกันเป็นตะกอน หินส่วนใหญ่บนเปลือกโลกจึงประกอบด้วยแร่ต่าง ๆ นักธรณีวิทยาแบ่งหินออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกิดคือ หินอัคนี หินตะกอน และหินแปร เมื่อหินหนืดร้อนภายในโลก (Magma) และ หินหนืดร้อนบนพื้นผิวโลก (Lava) เย็นตัวลงกลายเป็นหินอัคนี ลม ฟ้า อากาศ น้ำ และ แสงแดด ทำให้หินผุพังสีกกร่อนเป็นตะกอน ทับถมกันเป็นเวลานานหลายล้านปี แรงดันและปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการรวมตัวเป็นหินตะกอน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหินชั้น การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกและความร้อนจากแมนเทิลข้างล่าง ทำให้เกิดการแปรสภาพเป็นหินแปร อย่างไรก็ตามกระบวนการไม่จำเป็นต้องเรียงลำดับ หินอัคนี หินชั้น และหินแปร การเปลี่ยนแปลงประเภทหินอาจเกิดขึ้นย้อนกลับไปได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม (เสรีวัฒน์ สมินท์ปัญญา, 2538)

หินชั้นหรือหินตะกอน เกิดจากการทับถม และสะสมตัวของตะกอนต่าง ๆ ได้แก่ เศษหิน แร่ กรวด ทราย ดินที่ผุพังหรือสีกกร่อนถูกชะละลายมาจากหินเดิม โดยธรรมชาติ คือ ธารน้ำ ลม ธารน้ำแข็ง หรือคลื่นในทะเล พัดพาไปทับถมและแข็งตัวเป็นหินในแอ่งสะสมตัว หินชนิดนี้แบ่งตามลักษณะเนื้อหินได้ 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ หินชั้นเนื้อประสม หรือหินชั้นตกตะกอนเรียงผลึก (Clastic Sedimentary Rock) ซึ่งเป็นหินชั้นที่เนื้อเดิมของตะกอน พวกกรวด ทราย เศษหินและดิน ยังคงสภาพอยู่ให้พิสูจน์ได้ เช่น หินทราย (Sandstone)

หินดินดาน (Shale) หินกรวดมน (Conglomerate) เป็นต้น อีกชนิดคือ หินเนื้อประสาน หรือหินตะกอนทางเคมี (Non Clastic or Chemical Sedimentary Rock) เป็นหินที่เกิดจากการตกผลึกหรือตกตะกอนเนื่องจากกระบวนการทางเคมี หรือจากสิ่งมีชีวิต มีเนื้อประสานกันแน่นไม่สามารถพิสูจน์สภาพเดิมได้ เช่น หินปูน (Limestone) หิน Dolomite หิน Chert เกลือหิน (Rock Salt) ถ่านหิน (Coal) เป็นต้น

หินดินดาน (Shale) หมายถึง หินชั้นหรือหินตะกอนที่เกิดจากการเรียงตัวหรือสะสมของดินตะกอน (Silt) และแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) เป็นส่วนใหญ่ ถูกอัดตัวด้วยแรงดันผนวกกับเวลาที่ยาวนาน จึงแข็งเป็นหิน ส่วนใหญ่แร่ดินนี้เป็นสารผสมของอะลูมิเนียม ซิลิกอน กับ เหล็ก ในส่วนต่าง ๆ กัน และคุณสมบัติมีสีเทาสมสีแดงเนื่องจากแร่เหล็ก บี้กับน้ำแล้วเหนียวติดมือ โดยทั่วไปสภาพธรณีวิทยาของแหล่งหินดินดานปกติเกิดเป็นชั้น ๆ มักจะมีชั้นหินประเภทอื่น ๆ แทรกสลับอยู่ด้วย เช่น หินทราย (Sandstone) หินทรายแป้ง (Siltstone) หรือหินปูน (Limestone) หินดินดานมีทรายปะปนอยู่มาก เรียก Arenaceous หากมีดินเหนียวปะปนอยู่มาก เรียก Argillaceous แต่หากมีอินทรีย์วัตถุปะปนมาก เรียก Carbonaceous และหากมีหินปูนปะปน เรียก Calcareous หินดินดานมักเป็นแหล่งสะสมของปิโตรเลียม หรือถ่านหิน (Coal) ง่ายไฟแล้วให้น้ำมัน และเมื่อนำไปกลั่นจะได้น้ำมันคุณภาพต่าง ๆ กัน จึงเรียกหินดินดานนั้นว่าหินน้ำมัน (Oil shale) (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) ส่วนประกอบทั่วไปทางเคมีของหินดินดานแสดงดังตารางที่ 2-3 ซึ่งองค์ประกอบหลักของหินดินดานจะประกอบไปด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 58-60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ร้อยละ 14-16 และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ร้อยละ 4-5

ตารางที่ 2-3 ส่วนประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)	ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	58-60	แมงกานีสออกไซด์ (MgO)	2-3
อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	14-16	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	3-4
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	4-5	โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	1-2
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	2-3	โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	3-4

หมายเหตุ : จาก เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา, 2538; Martin Marietta Material, 2004

2.5.1 ปริมาณและแหล่งหินดินดานในประเทศไทย

แหล่งหินดินดาน มักจะพบอยู่ไม่ไกลจากแหล่งหินปูน เพราะในยุคที่มีการเกิดหินปูน เช่น ยุคเพอร์เมียน (Permian) ยุคออร์โดวิเซียน (Ordovicia) หรือยุคไทรแอสสิก-จูแรสสิก (Triassic-Jurassic) ก็ตามจะมีการเปลี่ยนโนมตะกอนที่ตกในท้องทะเล (Facies Change) ระหว่างตะกอนปูนกับตะกอนทรายอยู่เสมอ

ดังนั้น ในลำดับชั้นหิน (Stratigraphic Succession) ของยุคดังกล่าวจะพบบางตอนเป็นช่วงของหินปูนล้วน ๆ บางตอนเป็นช่วงของหินดินดานล้วน ๆ หรือบางช่วงเป็นชั้นหินปูนและหินดินดานสลับกัน

แหล่งของหินดินดานในประเทศไทย ในภาคกลางมีแหล่งผลิตที่จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี ราชบุรี ส่วนภาคใต้มีแหล่งผลิตที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และสงขลา ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ใกล้กับโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตหินดินดานเป็นการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศเท่านั้น ดังนั้นปริมาณการผลิตหินดินดานจึงสอดคล้องกับปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ภายในประเทศเช่นกัน ซึ่งปริมาณและมูลค่าการผลิตรวมทั้งการใช้หินดินดานของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2546 แสดงในตารางที่ 2-4

ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2542-2546) การใช้หินดินดานมีปริมาณโดยรวม 18.90 ล้านเมตริกตัน มูลค่าโดยรวม 1698.40 ล้านบาท ปี 2545 มีปริมาณการใช้หินดินดานมากที่สุด 6.20 ล้านเมตริกตัน มูลค่า 556.10 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 32.80 ของปริมาณการผลิตในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 98.06 เทียบกับปี 2544 รองลงมาได้แก่ ปี 2542 ปริมาณการใช้ 3.2 ล้านเมตริกตัน มูลค่า 288.40 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 16.93 ของปริมาณการใช้ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา

ตารางที่ 2-4 ปริมาณและมูลค่าการผลิต การใช้ หินดินดาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2546

ปี	การผลิต		การใช้	
	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2542	3223200	290.10	3204400	288.40
2543	3110200	279.90	3156900	284.10
2544	3364200	302.80	3183100	286.50
2545	5016800	451.50	6179200	556.10
2546	3487900	313.90	3147700	283.30

หมายเหตุ : จาก กรมทรัพยากรธรณี (2548)

2.5.2 การใช้ประโยชน์หินดินดาน

การใช้ประโยชน์หินดินดานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.5.2.1 อุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียม

หินดินดานมีคุณสมบัติที่สามารถกลั่นให้ปิโตรเลียมเหลวและแก๊สได้จะเรียกว่า หินน้ำมัน (Oil Shale) โดยคุณสมบัติของหินน้ำมันจะมีสีน้ำตาลไหม้ถึงดำ แข็งและเหนียว มีความถ่วงจำเพาะต่ำ มีอัตราส่วนของสารอินทรีย์ต่อสาร อนินทรีย์ ไม่เกิน 1 : 4 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำกว่าถ่านหิน สีของหินน้ำมันอาจมีสีเขียวออกน้ำตาล เมื่อเอาไฟลนจะได้กลิ่นน้ำมันระเหยออกมา ตัวอย่างที่พบจากการ

สำรวจหินน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.6-2.8 ยิ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีคุณภาพดี หินน้ำมันที่น่าสนใจในเชิงพาณิชย์นั้นควรให้น้ำมันมากกว่า 10-15 แกลลอนต่อหนึ่งตันหิน (น้ำมันที่สกัดได้มีคุณสมบัติและลักษณะเช่นเดียวกับน้ำมันดิบ) หินน้ำมันเกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์จำพวกพืชและสัตว์ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยเวลานับล้านปี โดยอินทรีย์สารเหล่านั้นถูกเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่เรียกว่า เคอโรเจน ซึ่งผสมคลุกเคล้ากับตะกอนกลายเป็นหินน้ำมัน (วิวัฒน์ โทธิรุกุล, 2547)

แหล่งหินน้ำมันกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโลกและพบทุกช่วงอายุทางธรณีวิทยา บางแหล่งเกิดขึ้นเมื่อ 500 ล้านปีก่อน ในขณะที่บางแหล่งเพิ่งเกิดขึ้นมาเมื่อประมาณ 25 ล้านปี แหล่งหินน้ำมันขนาดใหญ่พบที่สหรัฐอเมริกา บราซิล สหภาพโซเวียต ซาอุดี แคนาดา อิตาลีและ สาธารณรัฐประชาชนจีน แหล่งขนาดกลางพบในประเทศไทย อาร์เจนตินา ออสเตรเลีย ฝรั่งเศส บุลกาเรีย และนิวซีแลนด์ แหล่งหินน้ำมันขนาดเล็กพบได้ที่ออสเตรเลีย ซิลี อิสราเอล จอร์แดน มาร์ดากาสกา โปแลนด์ และตุรกี

2.5.2.2 อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

หินดินดานเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้ประมาณร้อยละ 15.18 ของวัตถุดิบทั้งหมด จึงนับได้ว่าหินดินดานที่ผลิตได้ในประเทศไทยเป็นการผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศเท่านั้น หินดินดานสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ มีปริมาณสำรองประมาณ 706.2 ล้านเมตริกตัน จากประมาณสำรองรวม 27 แปลง

2.5.2.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

นอกจากอุตสาหกรรม 2 ประเภทข้างต้น ยังมีการนำหินดินดานไปใช้ประโยชน์อีกด้านหนึ่งที่น่าสนใจ คือนำไปใช้เป็นวัสดุอุดซบในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก และโลหะหนักชนิดต่าง ๆ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

Demir et al. (2002) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วย Clinoptilolite พบว่า Clinoptilolite ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (0.13-1.00 มิลลิเมตร) มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงกว่า Clinoptilolite ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวเพื่อการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Clinoptilolite กับแอมโมเนียมไอออนมาก โดย Clinoptilolite มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียมไอออนเท่ากับ 0.57 มิลลิกรัมต่อกรัม

Mahut et al. (2002) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวของ Alunite ที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟต โดยทำการเพิ่มพื้นที่ผิวของ Alunite ด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 373-1073 องศาเซลเซียส พบว่า Alunite ที่เผา ณ อุณหภูมิ 1073 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด (153 ตารางเมตรต่อกรัม) และสามารถดูดซับฟอสเฟตสูงสุด (47.90 มิลลิกรัมต่อกรัม) เมื่อเปรียบเทียบกับผลของขนาดอนุภาคต่อการดูดซับ

พบว่า Alunite ที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่า Alunite ที่มีขนาดใหญ่ร้อยละ 96.00 และ 28.00 ตามลำดับ

Ozturk and Bektas (2004) ศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ ไนเตรท ไนโตรเจนของ Sepiolite และถ่านกัมมันต์ พบว่าความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนของ Sepiolite และถ่านกัมมันต์ลดลงเมื่อพีเอชของระบบสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อพีเอชของระบบสูงขึ้นจะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมาก ทำให้เกิดการแข่งกันระหว่างไนเตรทไนโตรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนลดลง

Sarioglu (2004) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนด้วย ซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งได้ศึกษาผลของพีเอชและอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมของซีโอไลต์ พบว่าที่พีเอช 4 และอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซีโอไลต์มีความสามารถกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้ 23.70 มิลลิกรัมต่อกรัม (Langmuir Isotherm) และ 25.93 มิลลิกรัมต่อกรัม (Freundlich Isotherm)

Karaca et al. (2004; 2006) ศึกษาผลของความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของระบบต่อการดูดซับฟอสเฟตของ Dolomite พบว่าเมื่อความเข้มข้นและพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของ Dolomite มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของ Dolomite จะลดลง ซึ่งแสดงถึงการดูดซับฟอสเฟตของ Dolomite เป็นกระบวนการดูดซับแบบคายความร้อน โดยทั่วไปถ้ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ถ้ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Sarioglu et al. (2005) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนของประเทศตุรกีด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่าซีโอไลต์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Clinoptilolite, Mordenite และ Feldspar มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเท่ากับ 25.93 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่สภาวะพีเอชมากกว่า 4 ระยะเวลาสัมผัส 40 นาที ซีโอไลต์จะมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุด

Wu et al. (2006) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตด้วย ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซีโอไลต์ พบว่ากลไกการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยากับ โลหะ Al^{3+} Fe^{3+} Mg^{2+} Ca^{2+} และ Na^+ โดยลำดับความสำคัญของโลหะที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนจากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ $Al^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > Fe^{3+}$ ตามลำดับ และออร์โธฟอสเฟต $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ ตามลำดับ

Wang et al. (2006) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำชะขยะด้วย Clinoptilolite พบว่า Clinoptilolite ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (น้อยกว่า 0.45 มิลลิเมตร) มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียมไนโตรเจน (11.12-115.16 มิลลิกรัมต่อลิตร) มากขึ้น พบว่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย และภายในระยะเวลาสัมผัส 30 นาที Clinoptilolite จะมีอัตราการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูง

Yunus et al. (2006) ศึกษาการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนของ Red Mud โดยได้ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวของ Red Mud ด้วยวิธีการให้ความร้อน แล้วเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนกับ Red Mud ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของ Red Mud ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนกับ Red Mud ที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่า Red Mud ที่ผ่านการให้ความร้อนมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 14.20 เป็น 20.70 ตารางเมตรต่อกรัม และมีความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนสูงกว่า Red Mud ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนประมาณ 3 เท่า คือ 5.86 และ 1.86 มิลลิโมลต่อกรัมตามลำดับ

Duran et al. (2007) ศึกษาการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนความเข้มข้นอยู่ในช่วง 20.00-100.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยดินเหนียวที่กระตุ้นด้วยกรดและความร้อน องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินเหนียวประกอบด้วยแร่ Calcium Montmorillonite, Quartz, Cristobalite, Gypsum และ Anhydrite ผลการศึกษาพบว่าดินเหนียวที่กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้สูงสุดร้อยละ 13.74-22.28 ด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาของไนเตรทไนโตรเจนกับโลหะออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบในดินเหนียว

Kaasik et al. (2007) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยเถ้าลอยของหินน้ำมัน พบว่าเถ้าลอยหินน้ำมันมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 67.00-85.00 โดยเถ้าลอยหินน้ำมันที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบมาก จะมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูง

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ดินดินดานในงานด้านสิ่งแวดล้อม

Drizo et al. (1999) ศึกษาการนำดินดินดานไปดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ได้แก่ Buxite, Light Expanded Clay Aggregate (LECA), หินปูน, หินน้ำมันที่ผ่านการเผาไหม้แล้ว, ژیเถ้าลอย และซีโอไลต์ ผลการศึกษาพบว่าดินดินดานและ Bauxite มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด 730.00 และ 350.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากบริเวณผิวของดินดินดานประกอบไปด้วยออกไซด์อะลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็ก ที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตได้ และในรายงานยังได้คาดการณ์อายุของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่จะใช้ดินดินดานเป็นตัวกลางจากการคำนวณพบว่า อายุของระบบจะสูงถึง 20 ปี

Drizo et al. (1997; 2000) ได้ศึกษาเอาดินดินดานไปดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับ 106.00, 46.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับโดยใช้เป็นตัวกลางในชุดจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างระบบที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช ผลการศึกษาพบว่าระบบที่มีการปลูกพืช มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 98.00-100.00 แอมโมเนียมไนโตรเจน กำจัดได้อย่างสมบูรณ์ และไนเตรท กำจัดได้ร้อยละ 85.00-95.00 ส่วนระบบที่ไม่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้เหมือนกับระบบที่ปลูกพืชร้อยละ 98.00-100.00 แอมโมเนียมกำจัดได้ ร้อยละ 40.00-75.00 และไนเตรท

ไนโตรเจนกำจัดได้ร้อยละ 45.00-75.00 จากที่มีการทดลองเป็นระยะเวลา 1 ปี พืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ รวมทั้งมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดิน (Rhizome) และรากเป็นอย่างดี

Reyad et al. (2003; 2004) ที่ศึกษาการกำจัดแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากซีไถ่ลอยของหินน้ำมัน (Oil Shale) ซึ่งเป็นหินดินดานชนิดหนึ่ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก และกรดฟอสฟอริก เป็นตัวสกัดพบว่าซีไถ่ลอยของหินน้ำมันที่สังเคราะห์ด้วยกรดไนตริกมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด 146 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อกรัม เมื่อนำซีโอไลต์ที่ได้ไปดูดซับสารละลายแคดเมียมตะกั่ว สังกะสี และทองแดง พบว่ามีความสามารถดูดซับ 70.58, 95.60, 50.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Forbes et al. (2004) ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตของทรายและหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของตัวกลาง Forbes et al. ได้ทำการเผาหินดินดานให้เป็น Light Weight Expanded Shale เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความพรุนของหินดินดาน ผลการศึกษาพบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตมากกว่าทราย โดยมีค่าเท่ากับ 0.971 และ 0.059 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Paikary et al. (2005) ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกด้วยหินดินดานแต่ละท้องถิ่น ประเทศอินเดีย พบว่าหินดินดานแต่ละท้องถิ่นที่มีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกแตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.07-1.35 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกจะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน ได้แก่ สารอินทรีย์คาร์บอน และแร่ Pyrite โดยหินดินดานที่มีปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอน และแร่ Pyrite มากจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกมากขึ้น

2.7 สรุป

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะอยู่ในรูปต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับสภาวะการมีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน ระยะเวลา อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไปการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียมีทั้งวิธีทางเคมี กายภาพ และชีวภาพ ซึ่งในแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างระบบ อุปกรณ์ สารเคมี และความยากง่ายในการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพอยู่เสมอแตกต่างกัน หินดินดานเป็นหินตะกอนที่ประกอบด้วยอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว ทับถมกันเป็นชั้นที่มีความละเอียดมาก มีองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นแร่ผสมของซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม ในปริมาณต่างๆ กัน ในปัจจุบันหินดินดานใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังมีการนำหินดินดานมาใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม โดยเป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก อาร์เซนิก ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความปั่นป่วนของระบบ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ อุณหภูมิของระบบ พีเอชของสารละลาย เวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ และคุณสมบัติของตัวทำละลาย หินดินดานยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวกลางใน

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอาหารของระบบให้พืชดูดไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานและสถานะที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำ มีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ทำการติดตั้งชุดทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 10 เดือน ตั้งแต่เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2553

3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยแสดงดังรูปที่ 3-1

3.3.1 การจำแนกขนาดของหินดินดาน

ตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาได้นำมาจากอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยได้รับสนับสนุนจาก บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) โดยนำตัวอย่างหินดินดานมาบดและจำแนกขนาด ให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ หินดินดาน C มีขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร หินดินดาน D มีขนาด 0.50-1.00 มิลลิเมตร และหินดินดาน E มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) โดยขนาดที่เลือกเป็นขนาดที่มีค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงสุด จากผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) ทำการศึกษาความสามารถของการดูดซับฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนเตรท-ไนโตรเจน พบว่าหินดินดานขนาด C, D และ E มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.140-0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับฟอสเฟต 0.100-0.160 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ 0.090-0.143 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับไนเตรท-ไนโตรเจน ตามลำดับ

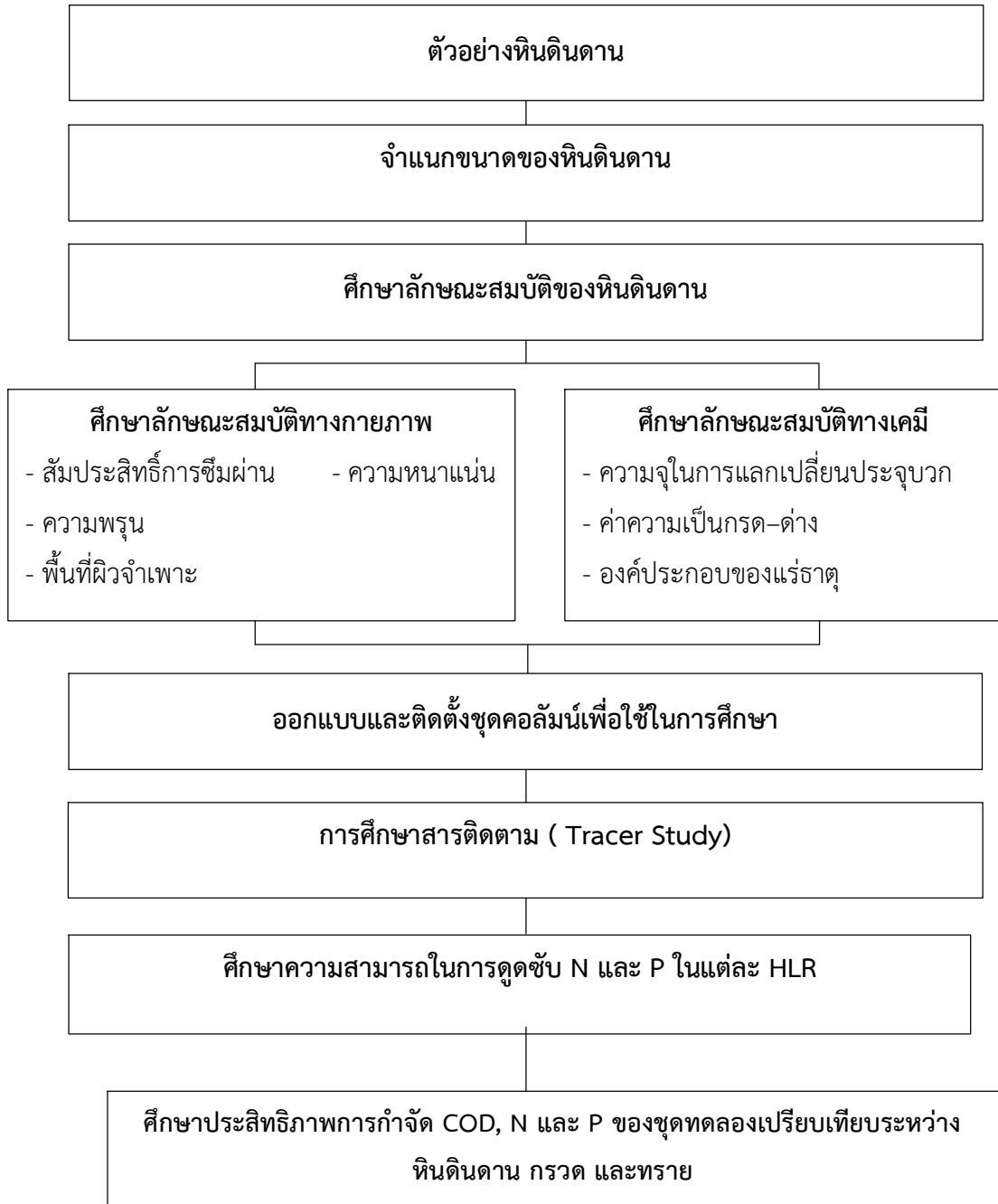
3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน

3.3.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ค่าความหนาแน่น (Density) และค่าความพรุน (Porosity) โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3-1

3.3.2.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน ได้แก่ ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และองค์ประกอบของแร่ธาตุในหินดินดาน โดยอ้างอิงวิธีและเครื่องมือวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3-1 ขนาดของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษา

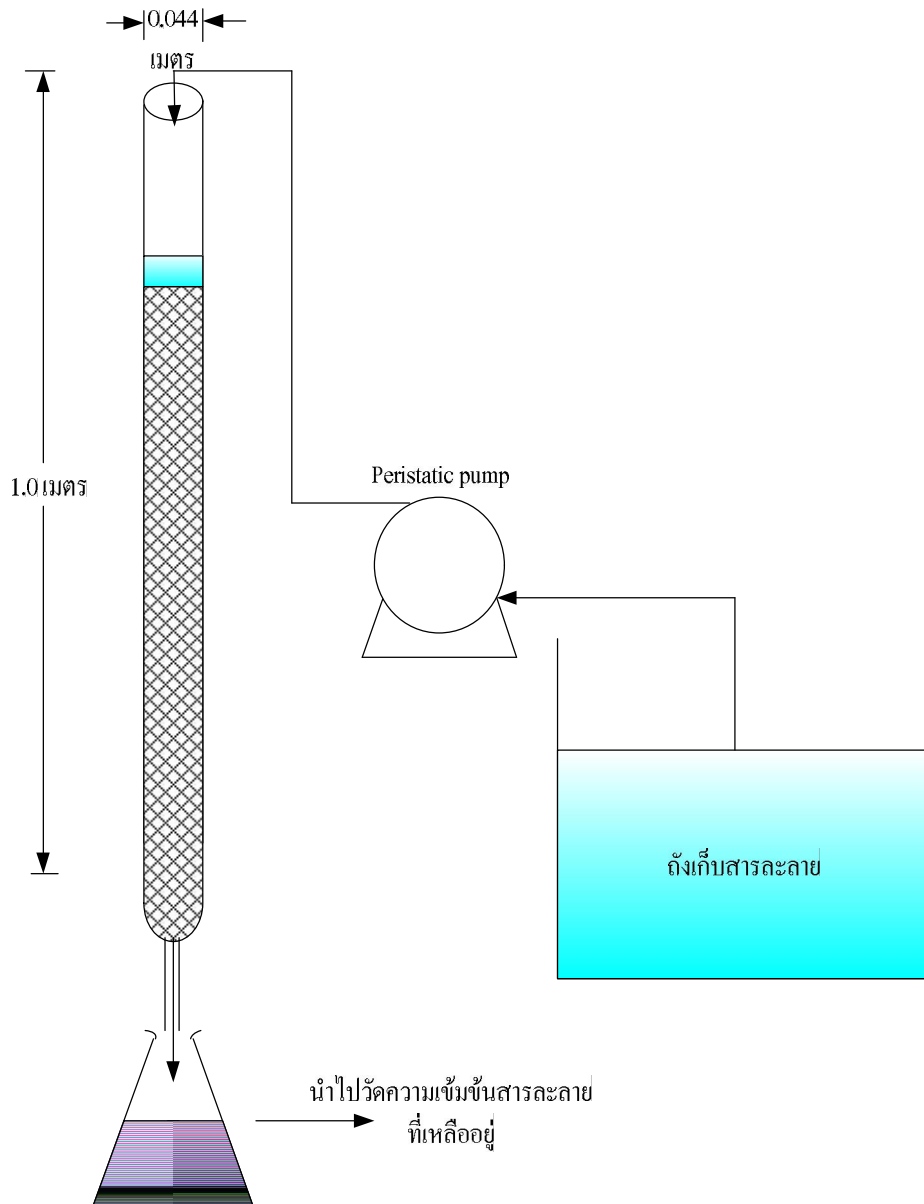
ขนาดของหินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)
C	1.00-2.00
D	0.50-1.00
E	0.25-0.50
กรวด	16.00-32.00
ทราย	2.00-8.00

ตารางที่ 3-2 วิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างหินดินดาน

ขนาด	Sieve Analysis Method	ASTM, 2004
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	Constant Head Method	ASTM, 2004
พื้นที่ผิวจำเพาะ	BET method/ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2010	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543
ความหนาแน่น	ASTM D 6938	ASTM, 2004
ความพรุน	ASTM D 4612-03	ASTM, 2004
CEC	Ammonium Acetate Method, pH 7	กรมวิชาการเกษตร, 2546
ความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	กรมวิชาการเกษตร, 2546
องค์ประกอบของแร่ธาตุ	X-Ray Fluorescence Spectrometry/ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED 2000 CNS Analyzer/ยี่ห้อ LECO รุ่น CNS 2000	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543

3.3.3 ออกแบบและติดตั้งชุดคอลัมน์

ทำการออกแบบชุดทดลองคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.044 เมตร สูง 1.0 เมตร ภายในแต่ละชุดคอลัมน์บรรจุหินดินดานขนาด C D E กรวด และทราย น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม โดยในแต่ละคอลัมน์จะมีความสูงของตัวกลางอยู่ในช่วง 0.70-0.74 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แผนภาพชุดคอลัมน์การเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

3.3.4 การกำหนดค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate, HLR)

โดยทำการเดินระบบชุดทดลองคอลัมน์ 3 RUN โดยในแต่ละ RUN กำหนดค่าอัตราการไหลของ RUN I, RUN II และ RUN III ที่ 3.5, 8 และ 16 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ (การกำหนดข้อมูลอัตราการไหลเริ่มต้นของ RUN I อ้างอิงผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตอง, 2550) นำข้อมูลอัตราการไหลไปคำนวณหาค่าอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3-3 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3-3 อัตราการไหลและภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ชุดการเดินระบบ	อัตราการไหล (mL/min)	อัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์ (m ³ /m ² .d)
RUN I	3.5	2.632
RUN II	8	6.316
RUN III	16	12.105

3.3.5 การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)

การศึกษาสารติดตามโดยใช้วิธี Slug-Feed Test ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 900 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านชุดทดลองคอลัมน์ ทุก ๆ 10 นาที และหาความเข้มข้นของคลอไรด์ (Cl⁻) ในน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์พลาสติก นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าเวลาเก็บกักที่แท้จริง (T_{Actual}) ดังสมการที่ 3.1 และคำนวณหาค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎี (T_{Theory}) ดังสมการที่ 3.2 (Metcalf and Eddy, 2004) รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก ก. ทำการ Trial and error เพื่อหาอัตราการไหลที่ทำให้ค่าเวลาเก็บกักที่แท้จริงกับค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันเพื่อนำไปใช้ในการทดลองของชุดคอลัมน์ และข้อมูลจากการศึกษาสารติดตามนำไปคำนวณหาลักษณะการกระจาย (d) ของการไหลได้ ดังสมการที่ (3-3) สมการที่ (3.4) และ สมการที่ (3.5) ของ Levenspiel (1972) และจากค่ากระจายการไหลสามารถนำไปเปรียบเทียบรูปแบบลักษณะการไหล ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-4

$$T_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (3.1)$$

$$T_{Theory} = \frac{V}{Q} = \frac{A(d_n n + d_w)}{Q} \quad (3.2)$$

- โดย
- T_{Actual} = ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริง (นาที)
 - T_{Theory} = ระยะเวลาเก็บกักน้ำทางทฤษฎี (นาที)
 - t_i = ระยะเวลาหนึ่ง ๆ ที่สารละลายออกจากระบบ (นาที)
 - C_i = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - Δt_i = ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ
 - V = ปริมาตรน้ำในระบบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - Q = อัตราการไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)
 - d_n = ความลึกของตัวกลาง (เซนติเมตร)

- n = ความพรุนของตัวกลาง
- d_w = ความลึกของน้ำ (เซนติเมตร)
- A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน;
$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}} \quad (3.3)$$

ดังนั้น
$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\sigma^2}{T^2_{\text{mean}}} = 2d + 8d^2 \quad (3.4)$$

ค่ากระจายการไหล (d) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$d = \frac{D}{uL_1} \quad (3.5)$$

- โดยที่ t_i = ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ
- C_i = ความเข้มข้นของคลอไรด์ ที่ออกจากระบบที่เวลาหนึ่ง
- Δt = ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ
- D = สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน
- u = อัตราเร็วการไหล
- L_1 = ระยะทางของการไหลจากทางเข้าถึงทางออก

ตารางที่ 3-4 ค่าการกระจายของการไหล

ค่าการกระจายการไหล (d)	ลักษณะการไหล
0	การไหลแบบท่อ
0.002	การกระจัดกระจายมีน้อย
0.025	การกระจัดกระจายปานกลาง
0.2	การกระจัดกระจายมีมาก
∞	การไหลแบบกวนสมบูรณ์

หมายเหตุ: ที่มา Levenspiel, 1972,

3.3.6 การหาค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ทำการศึกษาในชุดทดลองคอสมันน์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

3.3.6.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดง

ในตารางที่ 3-5 โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงประมาณ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ในช่วง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (การกำหนดช่วงความเข้มข้น จากผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง, 2550 ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด)

3.3.6.2 การเดินระบบชุดทดลองคอลัมน์

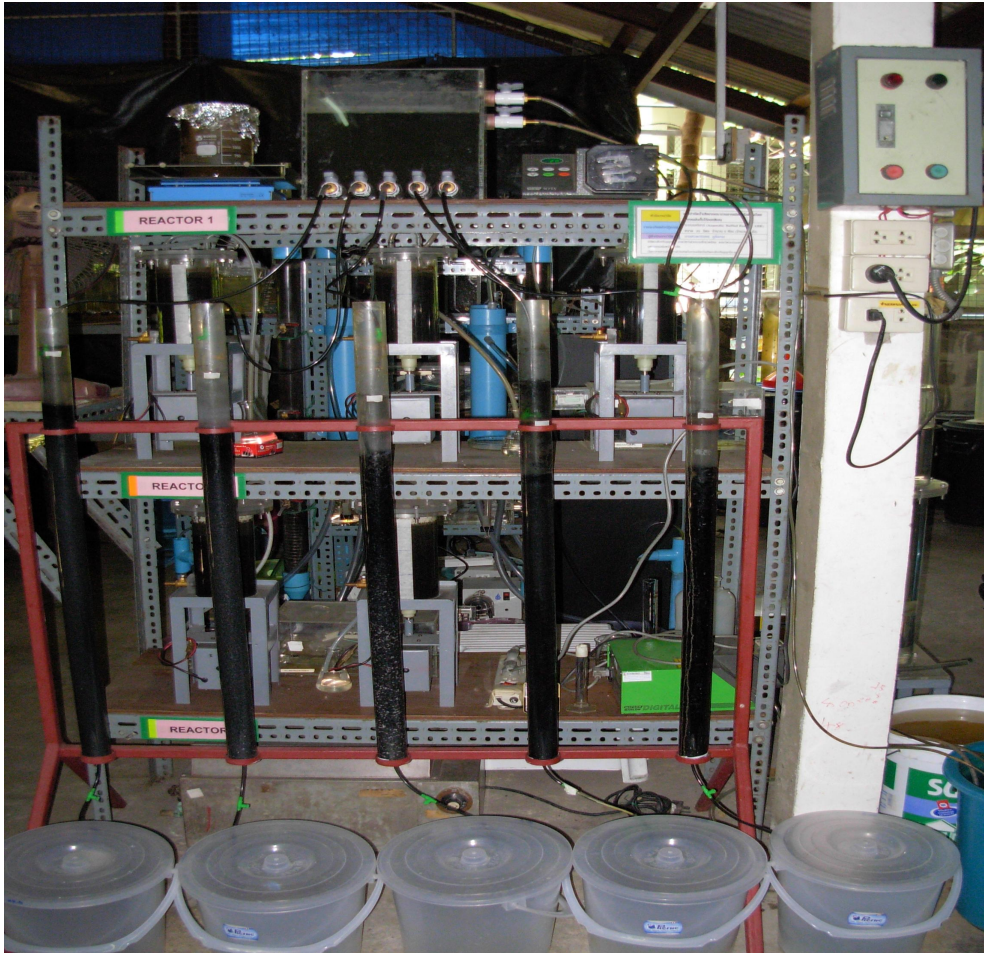
นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ ใส่ในถังเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในรูป 3-3 และจากถังเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ นำเข้าสู่ตัวคอลัมน์ โดยกำหนดอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ แตกต่างกัน 3 ค่า ในแต่ละ RUN ด้วยเครื่องมือควบคุมอัตราการไหล เมื่อไหลผ่านชุดทดลองคอลัมน์ รวบรวมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านชุดคอลัมน์ในถัง ดังแสดงในรูปที่ 3-4 นำน้ำตัวอย่าง เข้า-ออก ไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ ค่าซีโอดี ฟอสฟอรัส และค่าแอมโมเนีย วิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-5 องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

องค์ประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
กลูโคส	mg/l	252.51
Meat Extract	mg/l	133.29
Peptone	mg/l	175.09
แคลเซียมคลอไรด์	mg/l	7.44
แมกนีเซียมซัลเฟต	mg/l	3.76
โซเดียมคลอไรด์	mg/l	11.40
โพแทสเซียมไนเตรท	mg/l	6.90
แอมโมเนียมคลอไรด์	mg/l	68.98
ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต	mg/l	18.11

ตารางที่ 3-6 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
ซีโอดี	Close Reflux Method	APHA, AWWA and WEF, 2005
แอมโมเนียมไนโตรเจน	Nesslerization Method	
ฟอสฟอรัส	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method	
ความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	
อุณหภูมิ	Thermometer	



รูปที่ 3-3 การติดตั้งชุดคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับ



รูปที่ 3-4 ถังรวบรวมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนนำเข้าสู่ชุดทดลองคอลัมน์

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่ต่าง ๆ ในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน และออร์โทฟอสเฟตของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้สมการแบบ Langmuir และสมการแบบ Freundlich

3.4.2 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาดังนี้

3.4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน

3.4.2.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน และออร์โทฟอสเฟตของหินดินดานแต่ละขนาด และตัวกลางกรวด ทราย

3.4.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 15.0 ของผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ของหินดินดานแต่ละขนาด ทราย และกรวด ในชุดจำลองคอลัมน์

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ-เคมี ของหินดินดาน

4.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพสามารถจำแนกขนาดของตัวอย่างหินดินดานออกเป็น 3 ขนาด โดยหินดินดาน C มีขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร หินดินดาน D มีขนาด 0.50-1.00 มิลลิเมตร และหินดินดาน E มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน $E > D > C$ โดยมีค่าเท่ากับ 3.063, 3.742 และ 3.787 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสามารถในการดูดซับ โดยสารที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากย่อมมีค่าความสามารถในการดูดซับมาก (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะของหินดินดานทั้ง 3 ขนาด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) ซึ่งอยู่ในช่วง 5.5275-6.9698 ตารางเมตรต่อกรัม และนอกจากนี้ยังพบว่าหินดินดานมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงเดียวกับกรวดและทราย ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 0.08-11.00 ตารางเมตรต่อกรัม (Tokunaga et al., 2003; Prochaska and Zouboulis, 2005) ทรายและกรวด มักใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พื้นที่ผิวของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารอาหารและสารมลพิษของตัวกลางเหล่านั้น โดยตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากก็มีความสามารถในการดูดซับสารอาหารไว้มากเพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายและพืชในระบบสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; Drizo et al., 1999; Metcalf and Eddy, 2004) สารที่ใช้เป็นตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้น ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 50-100 ตารางเมตรต่อกรัม (Yu and Zhong, 2006) ในขณะที่ตัวดูดซับซึ่งนำเอาไดอะตอมไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะกับการดูดซับฟอสฟอรัส มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 200-840 ตารางเมตรต่อกรัม (Xiong and Peng, 2008) เมื่อนำตัวอย่างหินดินดานแต่ละขนาดมาวัดค่าความหนาแน่นพบว่ามีความอยู่ในช่วง 1.189-1.253 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 33-34 (ตารางที่ 4-1) จะเห็นได้ว่าหินดินดานขนาด C-E มีค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนไม่แตกต่างกัน โดยความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อการไหลของน้ำในระบบ และมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของตัวกลาง ตัวกลางที่มีความพรุนสูงจะมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวกลางสำหรับคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ เนื่องจากมีช่องว่างให้อากาศและจุลินทรีย์ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

สารอินทรีย์ในน้ำเสียของตัวดูดซับนั้น และมีผลต่อการไหลของน้ำในตัวคอลัมน์ ความพรุนของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30.0-54.4 (Kadlec and Knight, 2006; Yang et al., 2001; U.S. EPA, 2000) และตัวอย่างหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังต่อไปนี้ หินดินดาน C > D > E โดยมีค่าเท่ากับ 657.504, 476.978 และ 127.035 เมตรต่อวัน ตามลำดับ ดัชนีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่มีค่ามากแสดงให้เห็นถึงการมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้สูง ช่วยลดการอุดตันของระบบ และตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตั้งแต่ 100-250000 เมตรต่อวัน (Metcalf and Eddy, 2003) จะเห็นได้ว่าหินดินดานขนาด C-E มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่ากับกรวด ซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้สูง (มณฑิร กังคศิเทียม, 2539; สถาพร คูวิจิตรจรรู, 2542)

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

หินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อ กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุน (ร้อยละ)	สัมประสิทธิ์การซึม ผ่าน (เมตรต่อวัน)
C	1.00-2.00	3.063	1.253	34	657.504
D	0.50-1.00	3.742	1.236	34	476.978
E	0.25-0.50	3.787	1.189	33	127.035

4.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

จากผลการศึกษาค่าองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานแสดงดังตารางที่ 4-2 พบว่าองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของหินดินดานประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 57.80 อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 17.20 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 11.80 และเฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 6.40 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) ซึ่งพบว่าหินดินดานมีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ซิลิกอน อลูมิเนียมและแคลเซียม เป็นต้น และจากผลการศึกษาของ Drizo et al. (1999) และ Bubba et al. (2003) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวกลางจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส โดยจะเกิดพันธะระหว่างฟอสฟอรัสกับเฟอร์ริก อะลูมิเนียม และแคลเซียม จะทำให้เกิดสารประกอบ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, $FePO_4$ และ $AlPO_4$ และจากการศึกษาของ Wu et al. (2006) ได้จัดลำดับความสำคัญของธาตุโลหะใน zeolite ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอย ที่มีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟต พบว่าออร์โธฟอสเฟตจะเข้าทำปฏิกิริยากับ $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ ตามลำดับ ดังนั้นในการเลือกตัวกลางที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสได้ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวกลางใน

ระบบได้นานขึ้น จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดานพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับออร์โธฟอสเฟตได้ และหินดินดานมีผลการวิเคราะห์ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในช่วง 5.559-5.990 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม และมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.46-7.46 โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับสารละลาย ซึ่งสารดูดซับที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมากจะมีผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่ประจุเป็นบวกมากตามไปด้วย (จิตรรัตน์ บุญศรี, 2543)

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)	ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	57.80	โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	2.90
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	17.20	แมกนีเซียออกไซด์ (MgO)	1.90
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	11.80	โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.52
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	6.40		

4.2 การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)

การศึกษาสารติดตามโดยใช้วิธี Slug-Feed Test ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ ทุก ๆ 10 นาที และหาความเข้มข้นของคลอไรด์ (Cl⁻) ในน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ในแต่ละ RUN (รายละเอียดผลการศึกษา แสดงในภาคผนวก ข) นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าเวลาเก็บกัก ที่แท้จริง (T_{Actual}) ดังสมการที่ 3.1 และคำนวณหาค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎี (T_{Theory}) ดังสมการที่ 3.2 (Metcalf and Eddy, 2004) และข้อมูลจากการศึกษาสารติดตามนำไปคำนวณหาลักษณะการกระจาย (d) ของการไหลได้ ดังสมการ (4-1) ของ Levenspiel (1972) รายละเอียดในการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค. การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ในชุดทดลองคอลัมน์มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบ เพื่อใช้ประเมินหาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม ประเมินการไหลลัดวงจรในระบบและสามารถประเมินลักษณะการไหลในชุดคอลัมน์ จากผลการศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) ของชุดทดลองคอลัมน์ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 2.632 และ 12.105 m³/m²-d โดยใช้ สมการ (3.1) – (3.5) ในการศึกษาครั้งนี้เลือกทดสอบสารติดตามที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 2.632 m³/m²-d และค่ามากที่สุดเท่ากับ 12.105 m³/m²-d (ผลการศึกษาสารติดตามดังแสดงในรูปที่ 4-1 (ก) และ(ข) จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลา ผลการศึกษาได้เส้นกราฟเป็นรูปประซังคว่ำ โดยในช่วงแรกความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของคลอไรด์ใกล้เคียงความเข้มข้นเริ่มต้นโดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันทั้งในทุกชุดคอลัมน์ และนำผลการศึกษาสารติดตาม มาคำนวณหาค่าการกระจายการไหล ดังสรุปในตารางที่ 4-3 (ก) และ(ข) พบว่า ค่า T_{theory} ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าน้อยกว่า

T_{mean} ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 2 ระดับ เนื่องมาจากการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลางหินดินดาน กรวดและทราย และเมื่อพิจารณาค่าการกระจายการไหล (d) ของอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ทั้ง 2 ระดับ ของชุดทดลองคอลัมน์ พบว่าที่ HLR $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ มีค่าเท่ากับ 0.023 จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ กระจัดกระจายน้อย-ปานกลาง และที่ HLR $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ มีค่าเท่ากับ 0.001-0.011 จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบกระจัดกระจายน้อยและเข้าใกล้การไหลแบบท่อ (Metcalf and Eddy, 2004)

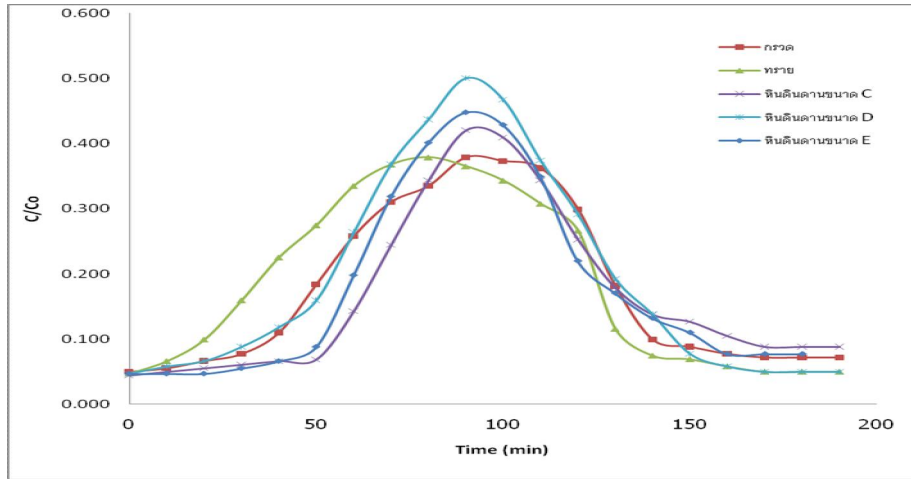
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสารติดตามที่ HLR = $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ (ก) HLR = $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ (ข)

(ก) ที่ HLR = $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$

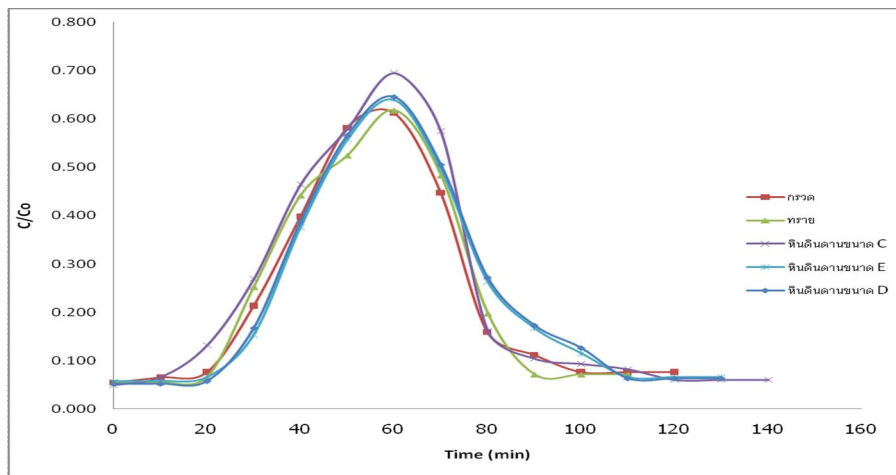
ตัวกลาง	T (hr)		ค่าการกระจายการไหล (d)	ลักษณะการไหล
	T_{theory}	T_{mean}		
กรวด	43.905	119.95	0.023	กระจัดกระจายน้อย
ทราย	38.926	117.14	0.023	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด C	46.566	121.83	0.023	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด D	48.229	115.59	0.023	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด E	48.562	116.97	0.023	กระจัดกระจายน้อย

(ข) ที่ HLR = $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$

ตัวกลาง	T (hr)		ค่าการกระจายการไหล (d)	ลักษณะการไหล
	T_{theory}	T_{mean}		
กรวด	21.953	103.44	0.005	กระจัดกระจายน้อย
ทราย	19.463	100.0	0.003	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด C	23.283	113.31	0.011	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด D	24.115	104.21	0.001	กระจัดกระจายน้อย
หินดินดานขนาด E	24.281	104.74	0.001	กระจัดกระจายน้อย



(ก) ที่ HLR 2.632 m³/m².d



(ข) ที่ HLR 12.105 m³/m².d

รูปที่ 4-1 ผลการศึกษาสารติดตามที่ HLR 2.632 m³/m².d (ก) และที่ HLR 12.105 m³/m².d (ข)

4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

จากผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าแต่ละชุดคอลัมน์ ในแต่ละ RUN ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 145.21-434.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าฟอสฟอรัสมีค่าอยู่ในช่วง 52.43-135.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าแอมโมเนียไนโตรเจน อยู่ในช่วง 29.12-39.79 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะน้ำเสียของชุมชนที่ยังไม่ผ่านการบำบัด ยกเว้นค่าฟอสฟอรัส ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงกว่าความเข้มข้นในน้ำเสียชุมชนที่ใช้อ้างอิงในตารางที่ 4-5 เนื่องจากการศึกษาของ อมรา ดาวโธสง (2550) และ ปิติพร มโนคุ่น (2554) พบว่าหินดินดานมีลักษณะสมบัติทางเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับฟอสเฟตได้ และมีค่าความสามารถในการดูดซับค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 0.051-0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.137 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4-4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (n = 51 ตัวอย่าง)

ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	หน่วย	ค่าต่ำสุด- ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	SD
ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	145.21-434.44	295.94	77.03
แอมโมเนียไนโตรเจน	มิลลิกรัมต่อลิตร	29.12-39.79	33.52	3.36
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัมต่อลิตร	52.43-135.00	75.52	21.74
ความเป็นกรด-ด่าง	-	6.08-6.59	6.28	0.15
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	25.30-28.50	25.58	2.21

4.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง HLR และความสามารถในการดูดซับของ ซีโอดี ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส

ทำการเดินระบบ RUN I ที่ HLR $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ โดยมีลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-4 เก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากชุดทดลองคอลัมน์ทุกๆวัน นำไปตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟต จนกระทั่งอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของน้ำเข้าและน้ำออกเข้าใกล้ 1 จึงหยุดการทดลอง และเปลี่ยนตัวกลางในแต่ละชุดคอลัมน์ เพื่อทำการทดลองใน RUN II และ RUN III ที่ HLR มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 6.316 และ 12.105 $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ตามลำดับ ข้อมูลความเข้มข้นของน้ำเข้า-ออกที่ได้จากการทดลอง (รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ง) นำมาคำนวณหาเพื่อประเมินการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟตของชุดทดลองคอลัมน์ นำมาหาค่าความสามารถในการดูดซับสาร $X_e = \frac{x}{m}$ ดังสรุปในตารางที่ 4-5 นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า X_e และ HLR เพื่อประเมินหาช่วง HLR ที่เหมาะสมในการเดินระบบ รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

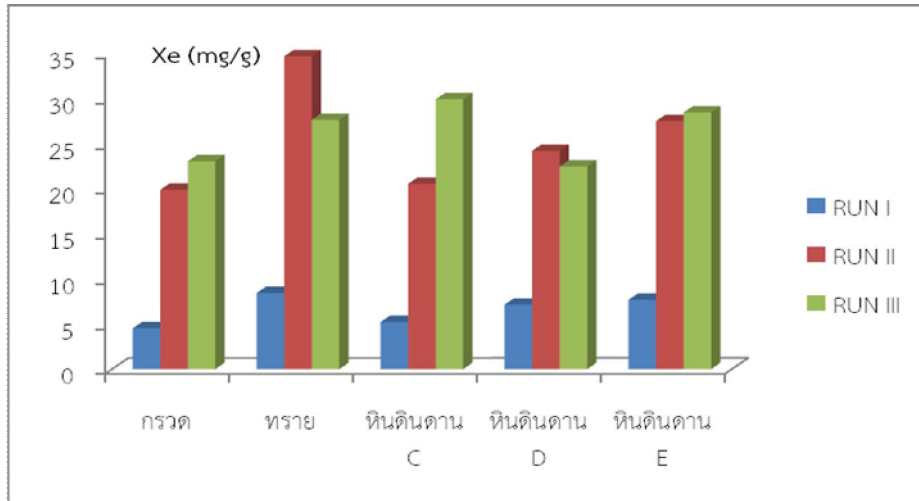
4.4.1 ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่า ซีโอดี

จากตารางที่ 4-5 และ รูปที่ 4-2 จะเห็นได้ว่า RUN II และ III ที่มีค่า HLR เท่ากับ 6.316 และ 12.105 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ตามลำดับ มีค่า X_e สูงใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 22.751-29.904 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยชุดคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวกลางหินดินดาน C มีค่าซีโอดี สละสมในระบบสูงสุด รองลงมาได้แก่ หินดินดาน E, ตัวกลางทราย, หินดินดาน D และ ตัวกลางกรวด ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่าตัวกลางหินดินดานมีค่าซีโอดี สละสมในระบบต่อหน้าหนักตัวกลางอยู่ในช่วง 22.451-29.904 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทราย (27.620 มิลลิกรัมต่อกรัม) โดยทั่วไปกลไกหลักในการกำจัดสารอินทรีย์ ได้แก่ ปฏิกิริยาทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน และตัวกลางที่มีค่าความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูง เพราะจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้ตัวกลางเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและยึดเกาะได้ดี (US.EPA, 2000) จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของหินดินดานในตารางที่ 4-1 พบว่ามีค่าพื้นที่ผิว

จำเพาะสูงกว่าตัวกลางกรวดและทราย ส่วนตัวกลางทรายจะมีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 0.30-0.35 และมีค่าสภาพน้ำเชิงกลศาสตร์อยู่ในช่วง 500-5,000 เมตรต่อวัน (US.EPA, 2000) ซึ่งสูงกว่าหินดินดาน จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการกำจัดสารอินทรีย์ของชุดทดลองคอลัมน์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มค่า HLR จาก RUN I เป็น RUN II และ RUN III ซึ่งมี HLR สูงกว่า จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป ซีไอดี ของตัวกลางทรายจะมีค่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์สูงที่สุด (34.661 mg/g) และสูงกว่าตัวกลางหินดินดาน แต่เมื่อเพิ่ม HLR พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของตัวกลางทรายเริ่มลดลง และมีค่าน้อยกว่าหินดินดานขนาด C และ E โดยเฉพาะในชุดทดลองคอลัมน์ตัวกลางกรวด เมื่อมีการเพิ่ม HLR พบว่าค่า X มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าตัวกลางกรวดและทรายมีแนวโน้มจะอุดตันเร็วกว่าตัวกลางหินดินดาน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Drizo (1999) ได้คาดการณ์อายุของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง มีอายุของระบบสูงถึง 20 ปี ในขณะที่ระบบที่มีตัวกลางเป็นกรวดหรือทราย จะมีอายุใช้งานเพียง 2-5 ปี

ตารางที่ 4-5 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ ซีไอดี ฟอสเฟต และ แอมโมเนีย ที่ HLR ต่างกัน

	HLR (m ³ /m ² .d)	X _e (x/m) (mg/g)				
		กรวด	ทราย	หินดินดาน C	หินดินดาน D	หินดินดาน E
COD	2.632	4.520	8.440	5.218	7.147	7.676
	6.316	19.874	34.661	20.536	24.190	27.493
	12.105	23.030	27.620	29.904	22.451	28.450
Phosphate	2.632	0.463	0.513	0.618	0.951	1.335
	6.316	0.333	0.723	0.636	1.436	1.487
	12.105	1.264	5.304	2.009	3.622	6.823
NH ₃ -N	2.632	0.037	0.082	0.107	0.175	0.215
	6.316	0.387	0.761	0.477	0.619	0.613
	12.105	0.310	1.587	0.413	0.658	0.697



รูปที่ 4-2 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีไอต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR แตกต่างกัน

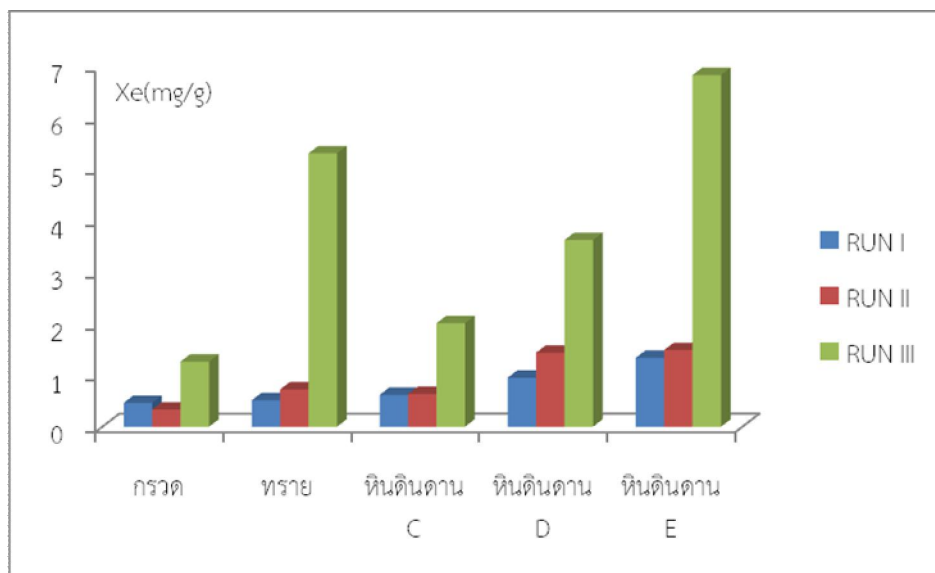
4.4.2 ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่า ฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4-5 และ รูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า RUN III ที่มีค่า HLR เท่ากับ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.310-1.587 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยชุดคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวกลางทราย มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในระบบสูงสุด รองลงมาได้แก่ หินดินดาน E, C, D และตัวกลางกรวด ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสที่ RUN I และ II ของแต่ละชุดคอลัมน์มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มค่า HLR เป็น $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ความสามารถในการดูดซับของแต่ละตัวกลางในชุดทดลองคอลัมน์ เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า โดยเฉพาะในตัวกลางหินดินดาน จากผลการศึกษาคู่ประเภทย่อยของหินดินดาน ได้แก่ ซิลิกอน อลูมิเนียมและแคลเซียม สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Drizo et al. (1999) และ Bubba et al. (2003) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวกลางจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส โดยจะเกิดพันธะระหว่างฟอสฟอรัสกับเพอริก อะลูมิเนียม และแคลเซียม จะทำให้เกิดสารประกอบ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, FePO_4 และ AlPO_4 ดังนั้นตัวกลางหินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีที่สนับสนุนให้เกิดการดูดซับกับฟอสฟอรัส และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับของฟอสฟอรัสจากผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสเพิ่ม โดยที่ความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร หินดินดานมีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.25-1.08 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ในช่วง 52.43-135.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษาของอมรา ดาวโรสง ประมาณ 2-3 เท่า และมีผลทำให้การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานมากกว่า อยู่ในช่วง 2.009-6.823 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาของ Seo et al. (2005) ; Wu et al (2006); Prochaska et al (2005) ตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในปัจจุบัน เช่น ทราย กรวด โดยมีค่าการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.020-0.129 และ 0.0077-0.0225 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ Arias et al. (2001) ศึกษาพบว่าทรายมีความสามารถ

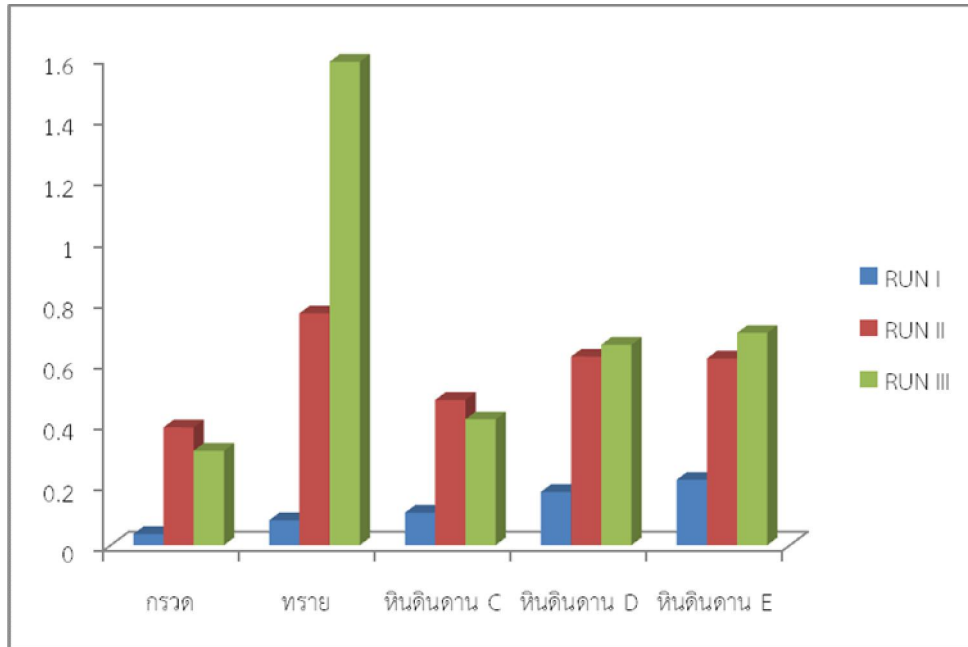
สูงสุดในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.169-0.266 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าชุดคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางกรวด และทราย มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.333-1.264 และ 0.513-5.304 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความสามารถฟอสฟอรัสในตัวกลางที่นำไปกระตุ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับเป็นตัวดูดซับ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่าหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับตัวดูดซับบางตัวที่นำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นก่อน เช่น Coal ash และ shell sand และมีค่าสูงกว่าตัวกลางทรายและกรวด ที่มักนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ 4-6 การศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสที่ผ่านมา

Material	Study type	X(mg P/g)	Reference
Coal ash	Batch	0.862	Drizo,1999
	Column	0.300	
Shell sand	Batch	9.6	Adam et al, 2007
	Column	0.497	
Sediment of oil shell	Batch	>65	Kaasik et al, 2008



รูปที่ 4-3 ปริมาณฟอสเฟตต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR แตกต่างกัน



รูปที่ 4-4 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนต่อปริมาณตัวกลางในชุดคอลัมน์ ที่ HLR ต่างกัน

4.4.3 ค่า HLR ที่เหมาะสมในการกำจัดค่า แอมโมเนียไนโตรเจน

จากตารางที่ 4-5 และ รูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่า RUN II และ III ที่ HLR เท่ากับ 6.316 และ 12.105 $m^3/m^2 \cdot d$ ตามลำดับ มีค่า X_e ของแอมโมเนียไนโตรเจนใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.310-1.587 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยชุดคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวกลางทราย จะมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในระบบสูงสุด รองลงมาได้แก่ หินดินดาน E, D, C และ ตัวกลางกล้วย ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าที่ RUN I มากกว่า 2-3 เท่า จากผลการศึกษาก็จะเห็นได้ว่าชุดคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางหินดินดานมีค่า X_e ของแอมโมเนียไนโตรเจน สูงกว่าตัวกลางทรายและกล้วย ใน RUN I ที่ HLR ต่ำ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวไฮสง (2550) ซึ่งศึกษาพบว่าหินดินดานมีค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเท่ากับ 0.23-0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนถึง 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนเริ่มคงที่ ในงานวิจัยครั้งนี้พบว่าหินดินดานขนาด C-E มีค่าความสามารถในการดูดซับหินดินดานอยู่ในช่วง 0.175-0.697 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่า ค่าการดูดซับสูงสุดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของผลการศึกษาของอมรา มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยตัวกลางจะเป็นการดูดซับไอออนบวกของตัวกลาง และแอมโมเนียไนโตรเจนยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะอยู่บริเวณผิวของตัวกลางได้ ได้แก่ โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน เป็นต้น (ปัทมา วิทยากร, 2533; Evangelou, 1998; Demir et al., 2002)

4.4.4 สรุปผลการศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HLR และค่าความสามารถในการดูดซับสารในชุดคอลัมน์ จากผลการการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเดินระบบโดยการเพิ่มค่า HLR มีผลทำให้ค่าการดูดซับ ซีโอดี ฟอสเฟต และแอมโมเนียไนโตรเจน ของชุดคอลัมน์หินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่า RUN III ที่ HLR $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต และแอมโมเนียสูงสุด ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีใกล้เคียงกันระหว่าง RUN II และ RUN III ชุดคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางทรายมีค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และแอมโมเนียใกล้เคียงกับชุดคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางหินดินดาน E แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มการดูดซับพบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีแนวโน้มอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวดและทราย ดังนั้นที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ 6.316 และ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ เป็นค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบชุดคอลัมน์เพื่อนำไปกำจัดสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน

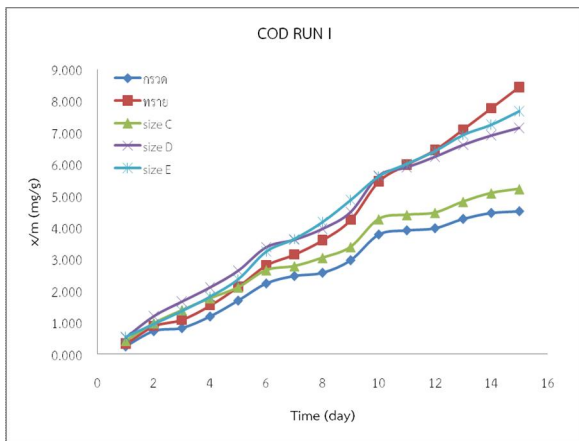
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับระยะเวลาในการเดินระบบ

ทำการเดินระบบ RUN I, II และ III ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากชุดทดลองคอลัมน์ทุกๆ วัน นำไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟต แล้วจึงนำไปคำนวณหาปริมาณการสะสม สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ต่อปริมาณตัวกลาง ที่ระยะเวลาต่างๆ รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก จ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

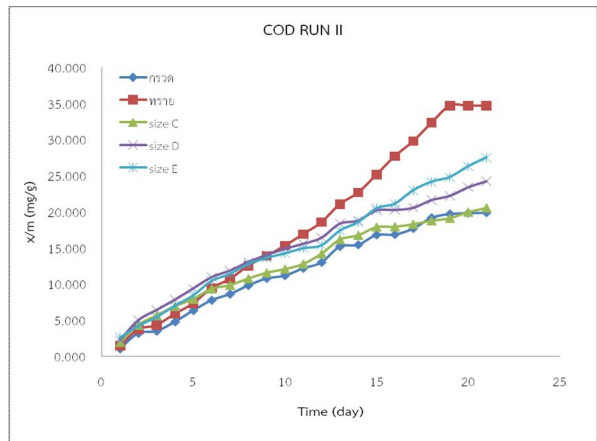
4.5.1 ค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4-5 (ก) แสดงค่าความสามารถในการดูดซับซีโอดี ที่ระยะเวลาในการเดินระบบที่ RUN I เป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นเส้นตรง โดยมีเพียงชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวดและหินดินดาน C เริ่มมีอัตราการดูดซับลดลง และเมื่อเพิ่มค่า HLR ใน RUN II เป็นระยะเวลา 21 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-5 (ข) การดูดซับสารอินทรีย์ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เหมือนกับ RUN I และจะเห็นได้ว่าในชุดคอลัมน์ตัวกลางทรายและกรวด มีค่า X_e ของระบบเริ่มคงที่ ส่วนใน RUN III (รูปที่ 4-5 (ค)) เมื่อเพิ่ม HLR มากยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่าในระยะแรกการเพิ่มขึ้นของ ค่า X_e ของระบบเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และเมื่อเดินระบบผ่านไปประมาณ 10 วัน ค่า X_e ของระบบเริ่มมีแนวโน้มขนานกับแกน X โดยเฉพาะในชุดคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวกลางกรวดและทราย ในขณะที่ชุดคอลัมน์หินดินดานค่า X_e ของระบบยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนผลสรุปการศึกษาวิจัยของ Drizo (1999) และอมรา ดาวโรสง (2550) ได้คาดการณ์อายุตัวกลางของหินดินดานจะใช้นานกว่าหินดินดานและทรายมากกว่า 2-3 เท่า โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์มากยิ่งขึ้น มีผลทำให้ชุดคอลัมน์ตัวกลางทรายและกรวดเริ่มอุดตัน เนื่องจากสารอินทรีย์ต่างๆ ขณะที่ชุดคอลัมน์ตัวกลางหินดินดานในระยะแรกของการเดินระบบ มีค่า X_e ของระบบมีค่าสูงกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด แต่ต่ำกว่าในชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย ขณะที่ชุดคอลัมน์หินดินดานยังคงมีค่า X_e ของระบบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลา กลไกในการกำจัดซีโอดีของการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในระบบให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และ

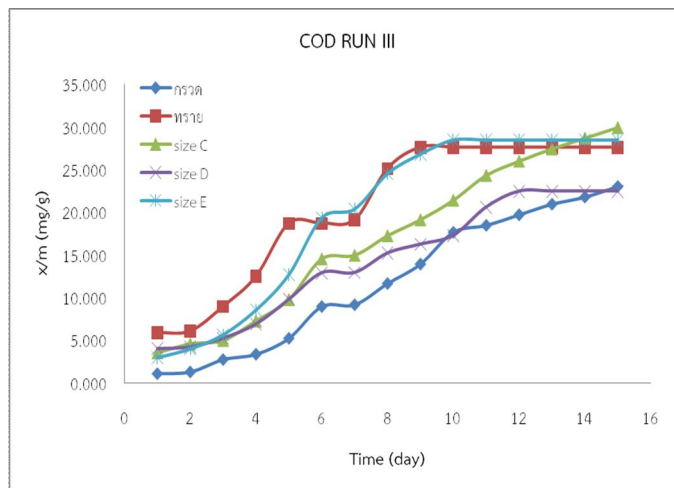
มีเทนให้แก่พืชเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการหายใจระดับเซลล์และสร้างเซลล์เนื้อเยื่อ ตัวกลางที่มีค่าความพรุน และพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สูง เพราะจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้ตัวกลางเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและยึดเกาะได้ดี (US.EPA, 2000) จากการศึกษาของ Akratos et al. (2007) และ Chung et al. (2008) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินทั่วไปซึ่งใช้ทราย กรวด และดิน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 20.00-70.50 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ HLR ที่เท่ากัน ซึ่งคาดการณ์ว่าปริมาณการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นในอัตราที่ใกล้เคียงกัน พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของคอลัมน์หินดินดานมีแนวโน้มสูงกว่าในคอลัมน์กรวดและทราย



(ก) RUN I



(ข) RUN II



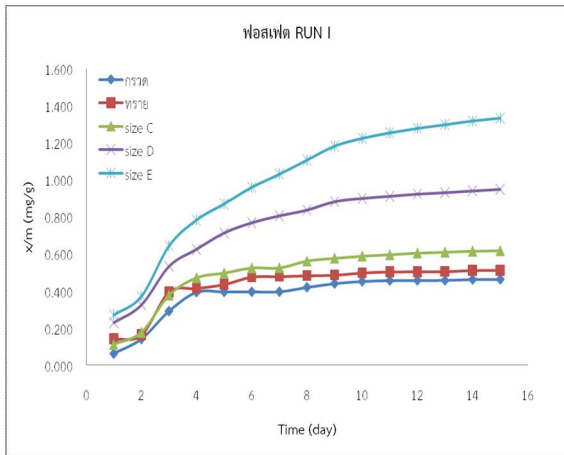
(ค) RUN III

รูปที่ 4-5 ค่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค)

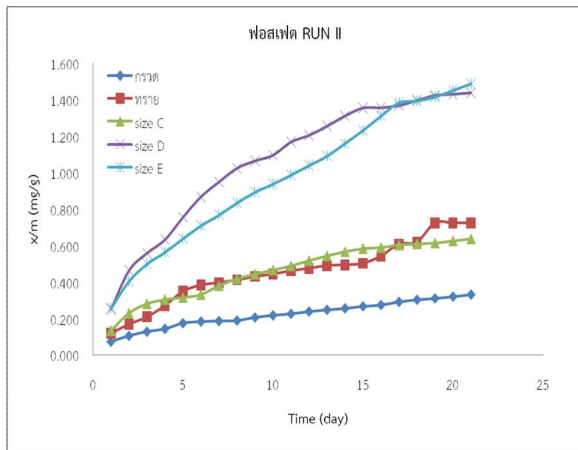
4.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4-6 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานต่อน้ำหนักหินดินดาน ตามระยะเวลาการเดินระบบ จะเห็นได้ว่าใน RUN I ซึ่งมีค่า HLR $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ต่ำสุด เมื่อ

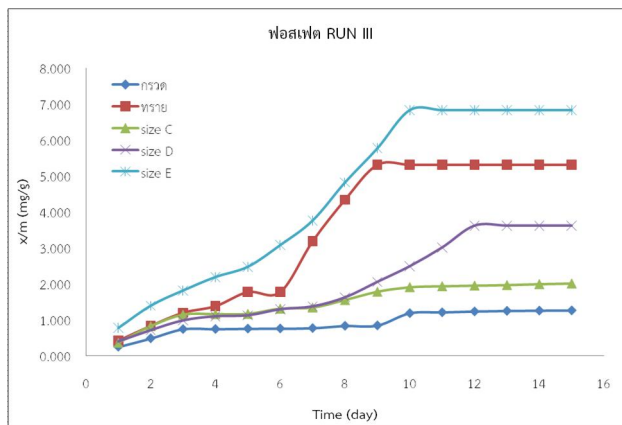
ระบบได้เพียง 4 วัน ค่า X_e ของชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย กรวด หินดินดาน C เริ่มมีค่าคงที่ขนานกับแกน X ในขณะที่ชุดคอลัมน์หินดินดานขนาด D และ E ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มคงที่เมื่อเดินระบบได้ประมาณ 10 วัน และเมื่อเพิ่ม HLR ของระบบใน RUN II (รูปที่ 4-6 (ข)) พบว่าค่า X_e ของระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเดินระบบได้นานมากขึ้น จะเห็นได้ว่าใน RUN II เดินระบบได้มากกว่า 15 วัน จึงพบว่าค่า X_e ของระบบหินดินดาน C, ตัวกลางกรวดและทราย เริ่มมีค่าคงที่ขนานกับแกน X ส่วนชุดคอลัมน์หินดินดาน D และ E ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อเพิ่ม HLR มากยิ่งขึ้นใน RUN III (รูปที่ 4-6 (ค)) จะเห็นได้ว่าค่า X_e ของชุดทดลองมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย และค่า X_e เริ่มมีแนวโน้มคงที่ โดยทั่วไปฟอสฟอรัสจะสร้างพันธะกับธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางตามลำดับดังต่อไปนี้ $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ (Wu et al., 2006) Drizo et al (1999) พบว่าตัวกลางซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วย เพอร์ริกออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มีแนวโน้มที่จะมีอายุการใช้งานที่นานกว่าระบบที่ใช้ตัวกลางทั่วไป เช่น กรวด ทรายและดินถึง 4 เท่า (Drizo et al., 1999) จากผลการศึกษาวิจัยสนับสนุนว่าหินดินดานมีแนวโน้มในการใช้เป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัสได้นานกว่าตัวกลางกรวดและทราย



(ก) RUN I



(ข) RUN II



(ค) RUN III

รูปที่ 4-6 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของชุดคอลัมน์ RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค)

4.5.3 ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ระยะเวลาต่างๆ

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเดินระบบ RUN I ที่ HLR เท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 4-7 (ก) จะเห็นว่าชุดทดลองคอลัมน์ตัวกลางกรวด ททราย และหินดินดาน C มีค่า X_e ต่ำมาก และเริ่มคงที่ขนานกับแกน X หลังจากเดินระบบเพียง 2-3 วัน ส่วนชุดทดลองหินดินดาน D และ E มีค่า X_e สูงกว่าตัวกลางชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตาม ในที่สุดเมื่อเดินระบบไปประมาณ 10 วัน ค่า X_e ของระบบเริ่มคงที่ เมื่อเพิ่มค่า HLR และเดินระบบใน RUN II ดังแสดงในรูปที่ 4-7(ข) พบว่าค่า X_e แอมโมเนียไนโตรเจน มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อเดินระบบมากกว่า 15 วัน จึงพบว่าเริ่มมีค่าคงที่ และในการเดินระบบใน RUN III เมื่อเพิ่มค่า HLR มากยิ่งขึ้น (รูปที่ 4-7 (ค)) พบว่าชุดคอลัมน์ทุกชุดยกเว้นตัวกลางททรายเริ่มคงที่เมื่อเดินระบบไปเพียง 10 วัน ส่วนชุดคอลัมน์ตัวกลางททรายมีค่า X_e เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะแรกของการเดินระบบ และเริ่มคงที่เมื่อเดินระบบไปได้ 8-9 วัน กลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจนจะเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนมาเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน และเกิดการย่อยสลายจากแอมโมเนียไนโตรเจนมาเป็นไนเตรตโดย Nitrifying bacteria ในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ HLR เดียวกัน พบว่าในชุดคอลัมน์ของหินดินดานมีอัตราการกำจัดแอมโมเนียสูงกว่าตัวกลางกรวดและททราย การดูดซับของแอมโมเนียมไนโตรเจนกับตัวกลางโดยไอออนบวก โดยจะเกิดการดูดซับกับอนุภาคตัวกลางที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบ โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของตัวกลางจะทำการยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่น (ปีทมา วิทยากร, 2533) จากผลการศึกษาของ Molle et al. (2008) พบว่าตัวกลางมีความพรุนสูง มีอัตราการไหลของระบบต่ำ จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตง (2550) พบว่าหินดินดานที่มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีความพรุนเท่ากับร้อยละ 35 มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน 0.17 มิลลิกรัมต่อกรัม

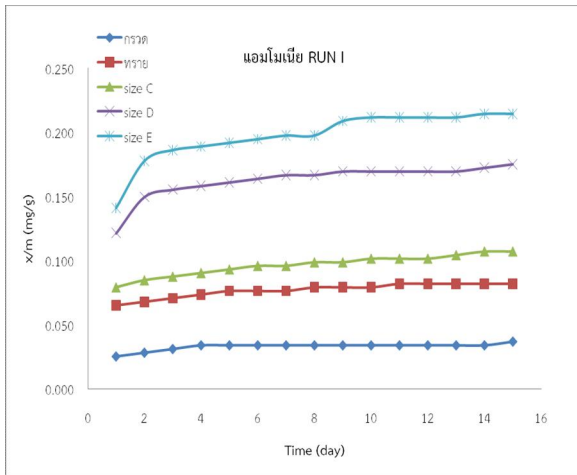
4.6 การประเมินผลการศึกษาจาก breakthrough curve

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาเขียนกราฟ Breakthrough curve เพื่อทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบ อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ และ สภาวะสมดุลของการดูดซับ รายละเอียดผลการคำนวณดังแสดงในตารางภาคผนวก ฉ โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

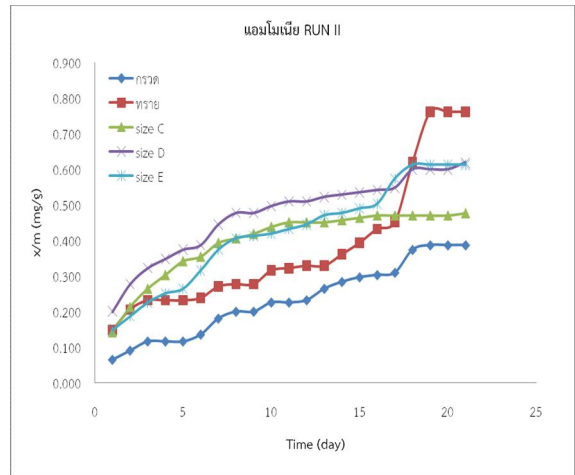
4.6.1 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4-8 แสดงผลการศึกษา breakthrough curve ของฟอสเฟต พบว่าปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ถึงจุดหมดสภาพ ในชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด ททราย หินดินดาน C, D และ E มีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ และที่ RUN II มีปริมาตรน้ำสูงสุดและมีค่าน้อยที่สุดใน RUN III และเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพของการใช้งานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดฟอสฟอรัส ดังแสดงในรูปที่ 4-9 พบว่าที่การเดินระบบ RUN II มีอายุการใช้งานนานที่สุด รองลงมาได้แก่ที่ Run I และ RUN III ตามลำดับ โดยชุดคอลัมน์ที่บรรจุหินดินดาน C,D และ E มีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวดและททราย

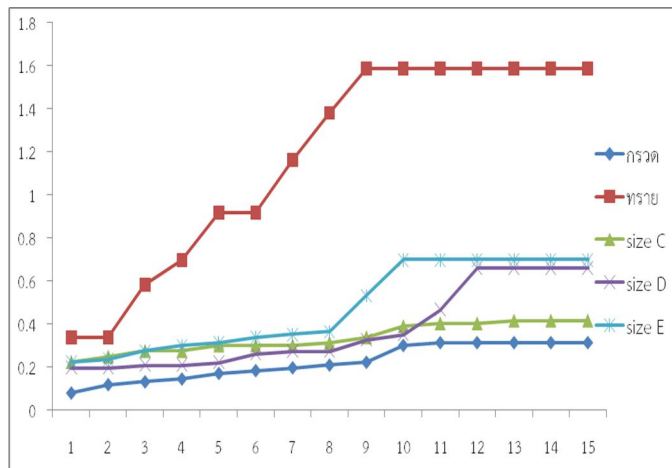
เมื่อพิจารณาข้อมูลผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส ดังแสดงในรูปที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าที่ RUN III มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด รองลงมา ได้แก่ RUN II และ RUN I ตามลำดับ โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสใน RUN III และ Run II จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อประเมินค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4-11 จะเห็นได้ว่าที่ Run III มีค่าสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามใน RUN II มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพมีค่าใกล้เคียงกับ RUN III ยกเว้นในชุดคอลัมน์หินดินดาน E ซึ่งจะมีค่าสูงกว่ามาก แตกต่างจากชุดคอลัมน์อื่นอย่างเห็นได้ชัด



(ก) RUN I



(ข) RUN II



(ค) RUN III

รูปที่ 4-7 ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียของชุดคอลัมน์ RUN I (ก) RUN II (ข) RUN III (ค)

4.6.2 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

จากรูปที่ 4-12 แสดงผลการศึกษาคurve breakthrough ของแอมโมเนียไนโตรเจน พบว่าปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough จนถึงจุดหมดสภาพ ในชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด ทราย หินดินดาน C, D และ E มีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ และที่ RUN II และ RUN III มีปริมาตรน้ำใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าใน RUN I โดยพบว่าที่ RUN III ชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย และหินดินดาน E มีปริมาตรน้ำสูงสุด และเมื่อ

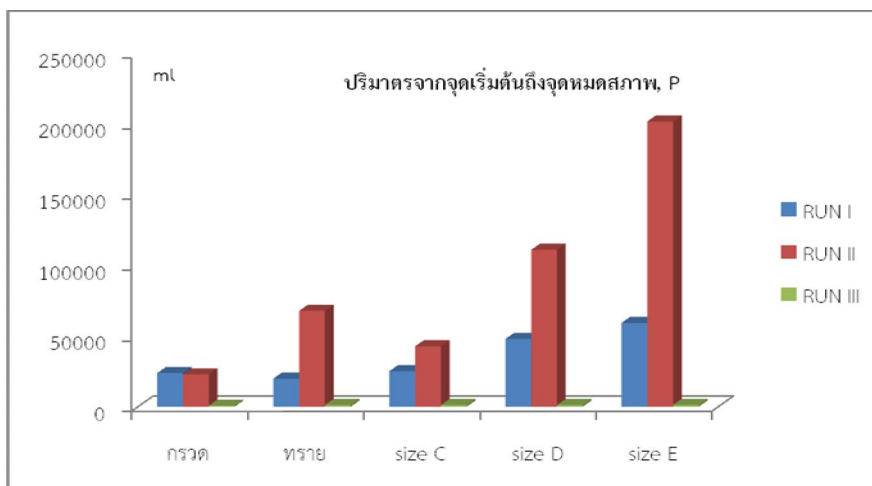
พิจารณาอายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพของการทำงานของชุดคอลัมน์ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4-13 พบว่าที่การเดินระบบ RUN II มีอายุการใช้งานนานที่สุด รองลงมาได้แก่ที่ Run I และ RUN III ตามลำดับ โดยชุดคอลัมน์ที่บรรจุหินดินดาน C,D และ E มีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวดและทราย ผลการศึกษาดังกล่าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการกำจัดฟอสฟอรัส

เมื่อพิจารณาข้อมูลผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4-14 จะเห็นได้ว่าที่ RUN II มีค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุด รองลงมา ได้แก่ RUN III และ RUN I ตามลำดับ โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนใน RUN III และ Run I จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อประเมินค่าปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4-15 จะเห็นได้ว่าที่ Run III มีค่าสูงสุด แตกต่างจาก Run II และ Run I

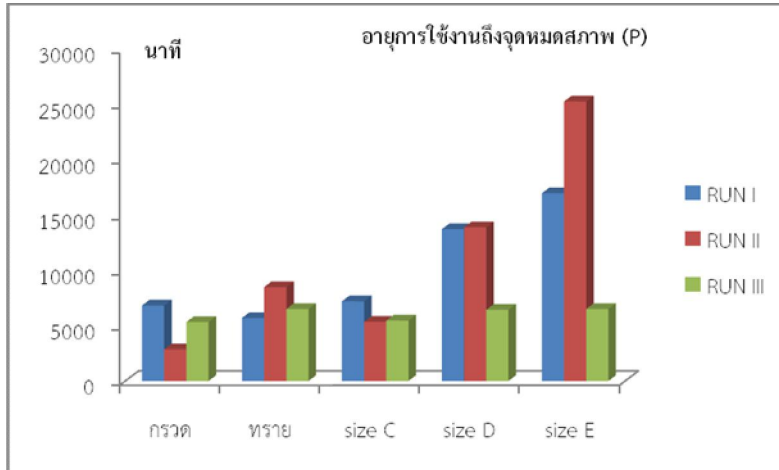
4.6.3 สรุปผลการศึกษา breakthrough curve เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งาน

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าชุดคอลัมน์การดูดซับฟอสฟอรัสที่ RUN II ($HLR = 6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) คาดการณ์ว่าจะมีอายุการใช้งานนานที่สุด และที่ RUN III ($HLR = 12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) จะมีค่าความสามารถในการดูดติดฟอสเฟตเมื่อถึงจุดหมดสภาพมีค่าสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามที่ RUN II มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับ RUN III และพบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวด และทราย และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ดังนั้นในการเดินระบบชุดคอลัมน์หินดินดานควรเลือกอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ $6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ เนื่องจากเป็นช่วง HLR ที่ทำให้ระบบมีอายุการใช้งานที่นานที่สุด และมีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงมากพอ

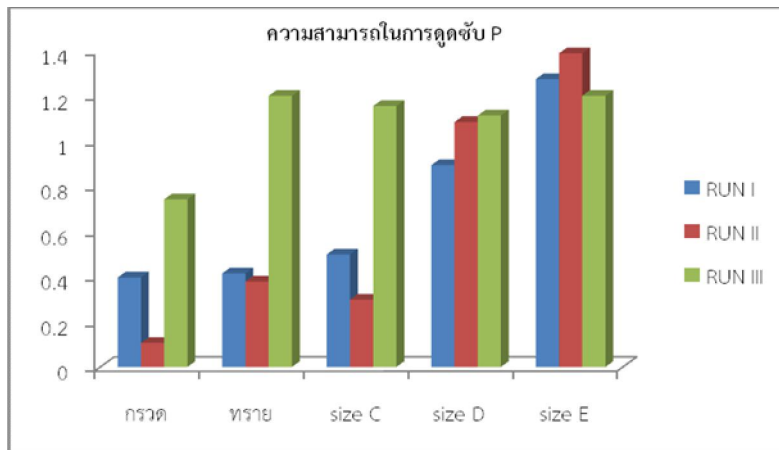
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าชุดคอลัมน์การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนที่ RUN II ($HLR = 6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) คาดการณ์ว่าจะมีอายุการใช้งานนานที่สุด และมีค่าความสามารถในการดูดติดแอมโมเนียไนโตรเจนเมื่อถึงจุดหมดสภาพมี และพบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวด และทราย และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ดังนั้นในการเดินระบบชุดคอลัมน์หินดินดานในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนควรเลือกอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ $6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$



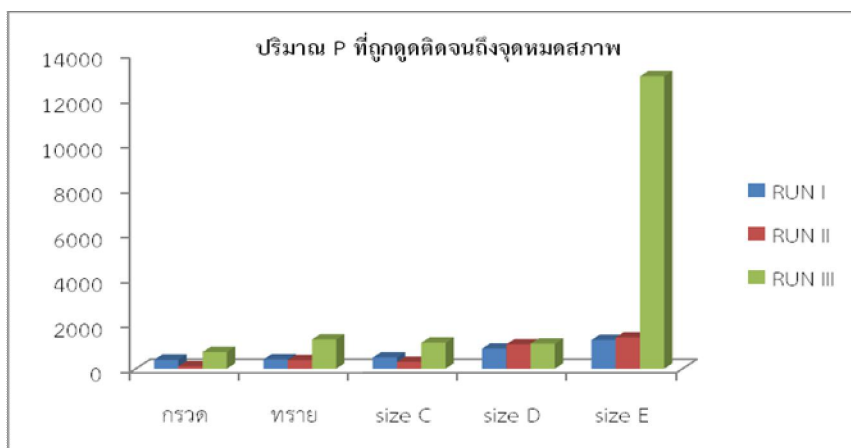
รูปที่ 4-8 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough และจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์ ในการบำบัด ฟอสฟอรัส



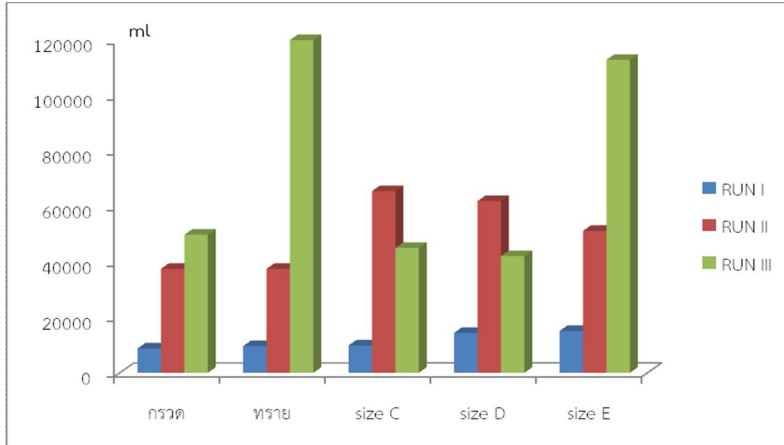
รูปที่ 4-9 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ ในการบำบัด ฟอสฟอรัส



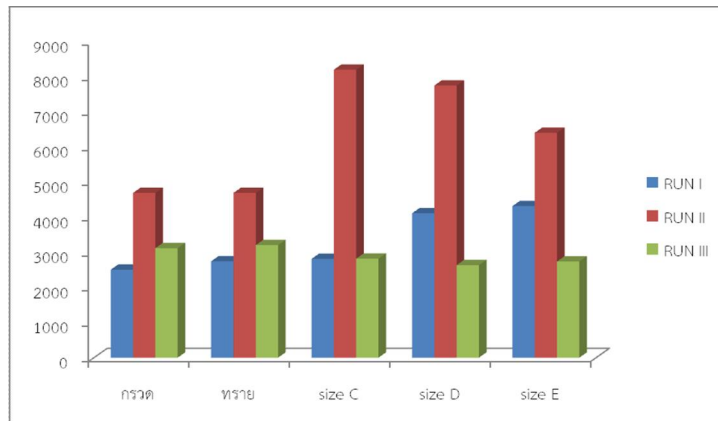
รูปที่ 4-10 ค่าความสามารถในการดูดติดของฟอสเฟตเมื่อถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์



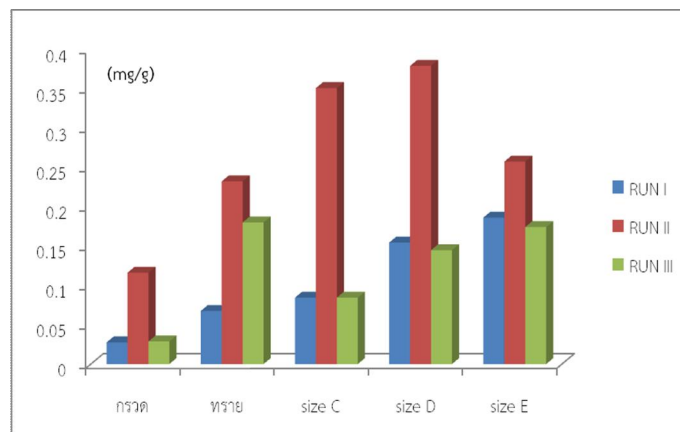
รูปที่ 4-11 ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์



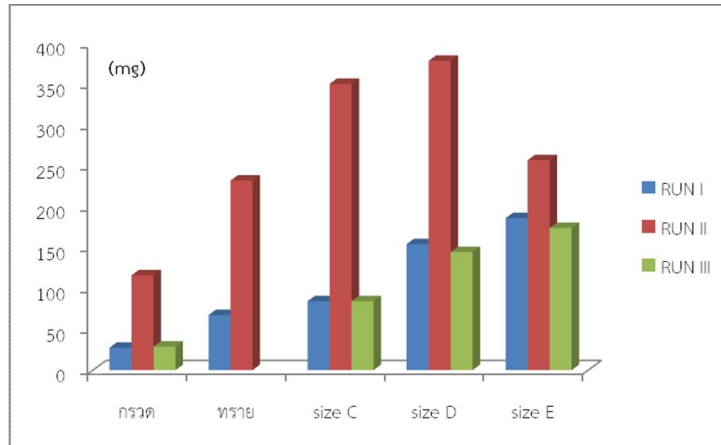
รูปที่ 4-12 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough และจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์ ในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน



รูปที่ 4-13 การคาดการณ์อายุการใช้งานของชุดคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ ในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน



รูปที่ 4-14 ค่าความสามารถในการดูดติดของแอมโมเนียไนโตรเจนเมื่อถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์



รูปที่ 4-15 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพของชุดคอลัมน์

4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ของชุดทดลองคอลัมน์

จาก การเดินระบบ RUN I, II และ III ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออกจากชุดทดลองคอลัมน์ทุกวัน นำไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟต แล้วจึงนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ดังสรุปในตารางที่ 4-7, 4-8 และ 4-9 (รายละเอียดผลการศึกษแสดงในภาคผนวก ข) มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ HLR = 2.632 m³/m².d

		กรวด	ทราย	หินดินดาน		
				C	D	E
COD	Max	55.0	82.0	59.8	77.5	81.4
	Min	4.9	21.8	8.3	22.0	28.0
	Mean	28.0	53.4	32.9	45.6	49.6
	SD	17.2	15.2	17.2	18.2	12.8
ฟอสเฟต	Max	22.04	34.07	29.44	50.09	59.47
	Min	0.07	0.08	0.08	1.54	2.96
	Mean	5.51	6.10	7.42	11.84	16.48
	SD	7.82	10.93	9.35	13.61	15.49
แอมโมเนีย	Max	14.75	37.70	45.90	70.49	81.97
	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Mean	1.39	3.14	4.10	6.63	8.13
SD	3.76	9.59	11.60	18.03	20.99

4.7.1 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ HLR = 2.632 m³/m².d

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E ของ RUN I ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ 2.632 m³/m².d (ตารางที่ 4-7) มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วงร้อยละ 32.9-49.6 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพบว่ามีค่ามากกว่าในชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด (ร้อยละ 28.0) แต่น้อยกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย (ร้อยละ 53.4) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E อยู่ในช่วงร้อยละ 7.42-16.48 และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน อยู่ในช่วงร้อยละ 4.10-8.13 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวดและทราย

ตารางที่ 4-8 ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ HLR = 6.316 m³/m².d

		กรวด	ทราย	หินดินดาน		
				C	D	E
COD	Max	50.2	60.5	55.0	64.6	59.8
	Min	7.0	17.2	16.7	12.3	9.5
	Mean	29.7	45.2	31.2	35.8	36.5
	SD	15.4	10.8	13.8	15.3	13.2
ฟอสเฟต	Max	10.65	16.93	19.39	36.32	36.86
	Min	0.44	0.49	1.67	4.51	6.43
	Mean	2.60	4.92	5.71	13.13	11.89
	SD	2.28	4.92	4.71	9.51	7.54
แอมโมเนีย	Max	16.67	43.33	8.70	13.33	20.00
	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mean	4.17	9.30	1.95	3.74	4.94
	SD	5.06	14.15	8.97	11.86	9.02

4.7.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ HLR = 6.316 m³/m².d

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E ของ RUN II ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ 6.316 m³/m².d (ตารางที่ 4-8) มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วงร้อยละ 31.2-36.5 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพบว่ามีค่ามากกว่าในชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด (ร้อยละ 29.7)

แต่น้อยกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย (ร้อยละ 45.2) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E อยู่ในช่วงร้อยละ 5.71-13.13 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวดและทราย และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E อยู่ในช่วงร้อยละ 1.95-4.94 พบว่ามีค่าน้อยกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย แต่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนใกล้เคียงกับชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด

4.7.3 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ HLR = 12.105 m³/m².d

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E ของ RUN II ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์เท่ากับ 12.105 m³/m².d (ตารางที่ 4-9) มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วงร้อยละ 22.0-34.7 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพบว่ามีค่ามากกว่าในชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด (ร้อยละ 20.3) แต่น้อยกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย (ร้อยละ 47.8) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E อยู่ในช่วงร้อยละ 9.30-48.53 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตใกล้เคียงกับตัวกลางทราย แต่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดคอลัมน์หินดินดาน C-E อยู่ในช่วงร้อยละ 4.05-9.73 พบว่ามีค่าน้อยกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางทราย แต่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวด

ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่ HLR = 12.105 m³/m².d

		กรวด	ทราย	หินดินดาน		
				C	D	E
COD	Max	62.1	100.0	47.9	41.0	66.7
	Min	3.0	3.0	5.5	0.5	15.1
	Mean	20.3	47.8	25.0	22.0	34.7
	SD	15.50	31.50	11.30	13.10	15.90
ฟอสเฟต	Max	27.49	100.00	29.75	41.10	85.10
	Min	0.12	11.92	0.63	2.20	23.50
	Mean	6.06	51.92	9.30	21.11	48.53
	SD	8.91	33.24	10.37	13.08	21.60
แอมโมเนีย	Max	11.54	50	32.69	28.85	32.69
	Min	0.00	0	0.00	0.00	1.85
	Mean	3.01	24.20	4.05	8.05	9.73

	SD	3.69	14.76	8.21	10.69	11.94
--	----	------	-------	------	-------	-------

4.7.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจน

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดหินดินดานมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์ และอัตราการระรับน้ำทางชลศาสตร์ที่ $6.316 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนต่ำสุด ชุดคอลัมน์หินดินดานมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าชุดคอลัมน์ตัวกลางกรวดและทราย ขณะที่ชุดคอลัมน์ตัวกลางทรายมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าชุดคอลัมน์หินดินดาน

4.8 การประเมินราคาในการนำหินดินดานใช้ในการเป็นตัวกลางสำหรับการดูดซับฟอสฟอรัส

จากผลการศึกษาพบว่าหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร สามารถนำไปใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน ได้ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆได้ดี โดยเฉพาะฟอสฟอรัส และหินดินดานมีราคาถูก ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาประเมินค่าใช้จ่ายในการนำหินดินดานมาใช้ในการเป็นตัวกลางเพื่อดูดซับฟอสฟอรัส ได้ตั้งสรุปในตารางที่ 4-10 หากนำหินดินดานขนาด E มาใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับสารฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชน ซึ่งปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 500 ลบ.ม.ต่อวัน และมีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถ้าใช้หินดินดานเป็นตัวกลางในการดูดซับฟอสฟอรัสจะต้องใช้หินดินดาน เท่ากับ 401.22 ตัน ทราย และกรวด เท่ากับ 2,165.74 และ 516.12 ตัน ตามลำดับ ดังนั้นค่าใช้จ่ายสำหรับตัวกลาง หินดินดาน ทราย และกรวด เท่ากับ 50,152.50, 180,642.0 และ 544,835.21 บาท ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าหากใช้หินดินดานเป็นตัวกลางจะมีราคาค่าใช้จ่ายของตัวกลางน้อยกว่าใช้ตัวกลางทราย ประมาณ 3.5 เท่า และตัวกลางกรวด ประมาณ 10 เท่า และหากนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าสัดส่วนค่าใช้จ่ายสำหรับตัวกลางที่ใช้ในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 4-11 ของราคาค่าก่อสร้างทั้งหมด ดังนั้นจึงควรเลือกวัสดุในการนำไปใช้เป็นตัวกลางที่มีราคาต่ำ เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างระบบ ในกรณีนี้หินดินดานจะเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพราะนอกจากลดต้นทุนในการก่อสร้างระบบ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส

ตารางที่ 4-10 เปรียบเทียบราคาตัวกลางแต่ละชนิด

ตัวกลาง	ความสามารถสูงสุด ในการดูดซับฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อกรัม)	อัตราการระบรทุก ฟอสเฟต ¹ (กรัมต่อปี)	ปริมาณที่ใช้ (ตัน)	ราคา (บาทต่อตัน)	ราคาทั้งหมด (บาท)
ทราย	5.304	2737.50	516.12	350 ²	180,642.0
กรวด	1.264	2737.50	2,165.74	251.57 ³	544,835.21
หินดินดาน (E)	6.823	2737.50	401.22	125 ²	50,152.50

หมายเหตุ : ¹ ที่สภาวะอัตราการไหล 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเข้มข้นฟอสเฟต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

² จากข้อมูลกลุ่มส่งเสริมวิสาหกิจเหมืองแร่ สำนักบริหารยุทธศาสตร์ ข้อมูล ณ วันที่ 4 มกราคม 2554

³ จาก กระทรวงพาณิชย์ ราคา ณ วันที่ 30 เมษายน 2551

ตารางที่ 4.11 สัดส่วนราคาในการก่อสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

องค์ประกอบ	ราคา (ร้อยละ)	องค์ประกอบ	ราคา (ร้อยละ)
ตัวกรอง	10.10	ปั๊ม ท่อ และอื่น ๆ	4.30
ตัวกลาง	41.20	ค่าธรรมเนียมในการก่อสร้าง	30.10
พืช	14.30		

หมายเหตุ : จาก Chen et al., 2007

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้นำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลางเพื่อดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และสถานะต่างๆที่เหมาะสม เช่น ขนาดของหินดินดานของหินดินดานในการนำไปใช้เป็นตัวกลางดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย และอัตราการบรรทุกทางกลศาสตร์ในการนำไปใช้ในคอลัมน์สำหรับใช้ในการดูดซับ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำ เพื่อให้มีคุณภาพก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินดินดานที่นำมาศึกษามีขนาดตั้งแต่ 0.25-2.00 มิลลิเมตร พบว่าหินดินดานมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 3.063- 3.787 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อนำมาใช้ในการดูดซับ แต่มีค่ามากกว่าตัวกลางกรวดและทรายที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ อีกทั้งค่าความพรุน และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลางหินดินดานมีค่ามากแสดงให้เห็นถึงการมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้สูง ช่วยลดการอุดตันของระบบ ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวกลางสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้

5.2 ผลการศึกษารอบการประกอบทางเคมีของหินดินดานพบว่าองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของหินดินดานประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 57.80 อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 17.20 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 11.80 และเฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 6.40 ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวกลางในระบบได้นานขึ้น

5.3 ผลการศึกษ้อัตราการรับน้ำทางกลศาสตร์ พบว่าที่ HLR เท่ากับ 6.316 และ 12.105 $m^3/m^2 \cdot d$ มีผลทำให้ค่าปริมาณการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และ แอมโมเนียไนโตรเจนต่อน้ำหนักหินดินดานมีค่ามากที่สุด ขณะที่ HLR เท่ากับ 12.105 $m^3/m^2 \cdot d$ มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสต่อน้ำหนักหินดินดานมีค่ามากที่สุด โดยหินดินดานขนาด E มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 0.310-1.587 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.4 ผลการศึกษ ปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระยะเวลาการเดินระบบ พบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีแนวโน้มมีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวดและทราย

5.5 ผลการศึกษาพบว่าชุดคอลัมน์หินดินดานมีอายุการใช้งานนานกว่าตัวกลางกรวด และทราย และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ดังนั้นในการเดินระบบชุดคอลัมน์หินดินดานควรเลือกอัตราการรับน้ำทางกลศาสตร์ที่ 6.316 $m^3/m^2 \cdot d$ เพราะเป็นช่วงอัตราการรับน้ำทางกลศาสตร์ที่มีค่าการถ่วงอายุการใช้งานนานที่สุด และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน ในปริมาณที่สูง

5.5 ผลการศึกษาพบว่าหินดินดานสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับสารอินทรีย์ ฟอสเฟต และแอมโมเนียไนโตรเจน เนื่องจากมีราคาถูกและนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของ

ระบบ และทำให้ระบบมีอายุการใช้งานได้นานแล้ว อีกทั้งยังมีราคาต่ำ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบได้

บรรณานุกรม

- กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา. (2548). ผลของอุณหภูมิ และภาระบรรทุกทางกลศาสตร์ต่อการดูดติดของสิริแอคทีฟ โดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). **หินแร่ คุณสมบัติ การจำแนก และวัฏจักร**. ธรณีวิทยาวิศวกรรม[ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.sdhabhon.com/Engineering%20Geology.html>
- กรมวิชาการเกษตร. (2546). **คู่มือวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์อุดมสินโรจน์. (2543). **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย**. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์ .
- เกรียงศักดิ์อุดมสินโรจน์. (2547). **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย**. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: เอส.อาร์. พรินติ้งแมสโปรดักส์.
- ธานี สิทธิไพโรจน์สกุล. (2547). **การศึกษาการดูดซับฟอสเฟตด้วยคอลลอยด์สังเคราะห์และคอลลอยด์ธรรมชาติ**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- จิราวัฒน์ บุญศรี. (2543). **การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. (2542). **วิศวกรรมประปา**. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณฑียร กังคศิเทียม. (2541). **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ปิติพร มโนคุ่น. (2554). **สมดุลมวลสมดุลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้** ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปัทมา วิทยาการ. (2533). **ดิน: แหล่งอาหารของพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ปิยะวรรณ หลีชาติ, ไพทิพย์ อีระเวชญาณ, วรรณต์ นาคบรรพต และประไพ อูระกิจ. (ตุลาคม 2545), การบำบัดสิริแอคทีฟโดยใช้แกลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. (2542). **วิศวกรรมประปา**. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวัฒน์ โตธิรกุล. (2547). **หินน้ำมัน (Oil Shale)**. กลุ่มส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมสำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3 กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php>

- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. (2543). **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทํางานเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.
- สถาพร คูวิจิตรจากรุ. (2542). ทดลองปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ไลบรารีไนน์.
- อมรา ดาวโรสง. (2550). การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ASTM. (2004). **Anual Book of ASTM Standards: Soil and Rock**. 04.08-04.09. USA: Baltimore.
- APHA, AWWA. and WEF. (1998). **Standard method for the examination of the water and wastewater**. Washington D. C.: American Public Health Association.
- Adam, K., Krogstad, T., Vrale, L., Sovik, A.K., Jessen, P.D. (2007). Phosphorus retention in the filter materials shellsand and filtralite (P)- batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. **Ecol. Eng.**, 29, 200-208.
- Akratos, C.S. and Tsihrintzis, V.A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland. **Ecological Engineering**. 29: 173-191.
- Arias, C.A., Bubba, M.Del and Brix, H. (2001). Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. **Water Research**. 35(5): 1159-1168.
- Bubba, M.D., Arias, C.A. and Brix H. (2003). Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in surface flow constructed wetlands as measured by the Langmuir isotherm. **Water Research**. 37: 3390-3400.
- Chung, A.K.C., Wu, Y., Tam, N.F.Y. and Wong, M.H. (2008). Nitrogen and phosphate mass balance in sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. **Ecological Engineering**. 32: 81-89.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. and Shute, R.B.E. (1996). **Reed Bed and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. WRc Swindon :Wiltshire.
- Demir, A., Gunay, A. and Debik, E. (2002). Ammonium removal from aqueous solution by ion-exchange using packed bed natural zeolite. **Water SA**. 28 No. 12: 329-335.
- Duran, C.J., Kou, M.R., Lopez, T., Barrios, J.A, Aguilar, D.H., Dominguez, M.I, Odriozola, J.A. and Quintanna. (2007). Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. **Applied Surface Science**. 48: 1-5.

- Drizo, A., Frost C.A., Grace, J. and Smith, K.A. (1997). Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Science and Technology**. 35 (5): 95-102.
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J. and Smith, K.A. (1999). Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. **Water Research**. 33(17): 3595-3602.
- Drizo, A., Frost C.A., Grace, J. and Smith, K.A. (2000). Phosphate and ammonium distribution in pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Research**. 34 (9): 2483-2490.
- Forbes, M.G., Dickson, K.R., Golden, T.D., Hudak, P. and Doyle, R.D. (2004). Dissolved phosphorus retention of light-weight expanded shale and masonry sand used in subsurface flow treatment wetlands. **Environmental Science and technology**. 38: 892-898.
- Kaasik, A., Vohla, C., Motlep, R., Mander, U. and Kirsimae, K. (2007). Hydrate calcareous oil-shale ash as potential filter media for phosphorus removal in constructed wetlands. **Water Research**. 42 (4-5): 1315-1323.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). **Treatment Wetland**. Boca Raton: Lewis Press.
- Karaca, S., Gurses, A., Ejder, M. and Acikyildiz, M. (2004). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of phosphate on dolomite. **Journal of Colloid and Interface Science**. 277: 257-263.
- Karaca, S., Gurses, A., Ejder, M. and Acikyildiz, M. (2006). Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using raw and calcinated dolomite. **Journal of Hazardous Materials**. B128: 273-279.
- Levenspiel, O. (1972). **Chemical reaction engineering** (2nd ed.). New York: Wiley.
- Mahmut Ozacar. (2002). Adsorption of phosphate from aqueous solution onto alunite. **Chemosphere**. 51: 321-327.
- Martin Marietta Material. (2004). **Material Safety Data Sheet of Shale Rock** [On-line]. Available: <http://www.martinmarietta.com/Products/MSDS-Shale.pdf>
- Metcalf and Eddy. (2003). **Wastewater Engineering Treatment and Reuse** (4th edn). Boston Burr Ridge: McGraw-Hill.
- Ozturk, N. and Bektas, T.E. (2004). Nitrate removal from aqueous solution by adsorption onto various materials. **Journal of Hazardous Material**. B112: 155-162.

- Paikary, S., Banerjee, S. and Mukherji, S. (2005). Sorption of arsenic on to Vindhyan shales : Role of pyrite and organic carbon. **Current Science**. 88 (10): 1580-1585.
- Prochaska, C.A and Zouboulis, A.I. (2005). Removal of phosphorus by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. **Ecological Engineering**. 11-22.
- Reyad Shawabkeh, Adnan Al-Harabsheh and Awni Al-Otoom. (2003). Conversion of oil shale ash into zeolite for cadmium and lead removal from wastewater. **Fuel**. 83: 981-985.
- Rouquerol, F., Rouqurol, J. and Sing, K. (1999). **Adsorption by Powders and Porous Solids**. London: Academic Press.
- Sarioglu, M. (2005). Removal of ammonium from municipal wastewater using natural Turkish (Dogantepe) zeolite. **Separation and Purification Technology** . 41: 1-11.
- Sawyer, N, C., Mccarty, L, F., and Parkin, F. G. (2003). **Chemistry for Environmental Engineering and Science** (5th edn). Singapore : McGraw-Hill.
- Seo,, D.C., Cho, J.S., Lee, H.J. and Heo, J.S. (2005). Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. **Water Research**. 39: 2445-2457.
- Tokunaga, T.K., Olson, K.R. and Wan, J. (2003). Moisture characteristic of Handford gravel. **Soil Science of America**. 322-329
- U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment**. Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- Wang, Y., Liu, S., Xu, Z., Han, T., Chuan, S., and Zhu, T. (2006). Ammonia removal from leachate solution using natural Chinese clinoptilolite . **Journal of Hazardous Materials**. 136(3): 735-740.
- Wu, D., Zhang, B., Li, C., Zng, Z. and Kong, H. (2006). Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from fly ash influenced by salt treatment. **Journal of Colloid Interface**. 304: 300-306.
- Xiong, W. and Peng, J., (2008). Development and characterization of ferrihydrite-modified diatomite as a phosphorus adsorbent. **Water Research**, 42, 4869-4877.
- Yang, L., Chang, H.L. and Huang, M.L. (2001). Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and without vegetation. **Ecological Engineering**. 18: 91-105.
- Yu, Lanlan, and Qin, Zhong (2006). Preparation of adsorbents made from sewage sludges for adsorption of organic materials from wastewater. **Journal of Hazardous Materials**,

B137, 359-366.

Yunus Cengloglu, Ali Tor, Mustafa Ersoz and Gulsin Arslan. (2006). Removal of nitrate from aqueous solution by using red mud. **Separation and Purification Technology** [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com>

ภาคผนวก ก
การคำนวณอัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์

การคำนวณอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ ในแต่ละ Run

Run I (3 ml/min)

$$\text{HLR (m/d)} = \frac{Q}{A}$$

$$\text{อัตราการไหล (Q) (m}^3\text{/d)} = \frac{3 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ day}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ ml}} = 0.005 \text{ m}^3\text{/d}$$

$$\text{พื้นที่ (A) (m}^2\text{)} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.05^2}{4} = 0.019 \text{ m}^2$$

$$\text{ดังนั้น HLR (m/d)} = \frac{0.005 \text{ (m}^3\text{/d)}}{0.019 \text{ (m}^2\text{)}} = 2.632 \text{ m}^3\text{/m}^2\text{.d}$$

Run II (8 ml/min)

$$\text{HLR (m/d)} = \frac{Q}{A}$$

$$\text{อัตราการไหล (Q) (m}^3\text{/d)} = \frac{8 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ day}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ ml}} = 0.012 \text{ m}^3\text{/d}$$

$$\text{พื้นที่ (A) (m}^2\text{)} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.05^2}{4} = 0.019 \text{ m}^2$$

$$\text{ดังนั้น HLR (m/d)} = \frac{0.012 \text{ (m}^3\text{/d)}}{0.019 \text{ (m}^2\text{)}} = 6.316 \text{ m}^3\text{/m}^2\text{.d}$$

Run III (16 ml/min)

$$\text{HLR (m/d)} = \frac{Q}{A}$$

$$\text{อัตราการไหล (Q) (m}^3\text{/d)} = \frac{16 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ day}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ ml}} = 0.023 \text{ m}^3\text{/d}$$

$$\text{พื้นที่ (A) (m}^2\text{)} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.05^2}{4} = 0.019 \text{ m}^2$$

$$\text{ดังนั้น HLR (m/d)} = \frac{0.023 \text{ (m}^3\text{/d)}}{0.019 \text{ (m}^2\text{)}} = 12.105 \text{ m}^3\text{/m}^2\text{.d}$$

ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาระดับติดตาม

ตารางที่ ข-1 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางกรวดอัตราภาระรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.60	44.986	0.049	0.000	0.000	0.000
10	10	1.70	49.985	0.055	0.549	5.490	54.902
20	10	1.90	59.981	0.066	0.659	13.176	263.530
30	10	2.10	69.978	0.077	0.769	23.059	691.766
40	10	2.70	99.969	0.110	1.098	43.922	1756.867
50	10	4.05	167.448	0.184	1.839	91.961	4598.049
60	10	5.40	234.927	0.258	2.580	154.824	9289.432
70	10	6.35	282.412	0.310	3.102	217.138	15199.641
80	10	6.80	304.905	0.335	3.349	267.922	21433.772
90	10	7.60	344.893	0.379	3.788	340.942	30684.772
100	10	7.50	339.895	0.373	3.733	373.334	37333.414
110	10	7.30	329.898	0.362	3.624	398.589	43844.800
120	10	6.15	272.416	0.299	2.992	359.060	43087.152
130	10	4.00	164.949	0.181	1.812	235.530	30618.890
140	10	2.50	89.972	0.099	0.988	138.353	19369.454
150	10	2.30	79.975	0.088	0.878	131.765	19764.749
160	10	2.10	69.978	0.077	0.769	122.981	19676.905
170	10	2.00	64.980	0.071	0.714	121.334	20626.711
180	10	2.00	64.980	0.071	0.714	128.471	23124.756
190	10	2.00	64.980	0.071	0.714	135.608	25765.546
sum					20.73	2485.97	313897.15

ตารางที่ ข-2 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางทรายอัตราภาระรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.55	42.487	0.047	0.000	0.000	0.000
10	10	1.90	59.981	0.066	0.659	6.588	65.882
20	10	2.50	89.972	0.099	0.988	19.765	395.295
30	10	3.60	144.955	0.159	1.592	47.765	1432.944
40	10	4.80	204.936	0.225	2.251	90.039	3601.576
50	10	5.70	249.923	0.275	2.745	137.255	6862.760
60	10	6.80	304.905	0.335	3.349	200.942	12056.497
70	10	7.40	334.896	0.368	3.678	257.491	18024.353
80	10	7.60	344.893	0.379	3.788	303.059	24244.758
90	10	7.35	332.397	0.365	3.651	328.589	29573.005
100	10	6.95	312.403	0.343	3.431	343.138	34313.800
110	10	6.30	279.913	0.307	3.075	338.197	37201.649
120	10	5.55	242.425	0.266	2.663	319.530	38343.612
130	10	2.80	104.967	0.115	1.153	149.883	19484.748
140	10	2.05	67.479	0.074	0.741	103.765	14527.090
150	10	1.95	62.481	0.069	0.686	102.941	15441.210
160	10	1.75	52.484	0.058	0.576	92.235	14757.679
170	10	1.60	44.986	0.049	0.494	84.000	14280.031
180	10	1.60	44.986	0.049	0.494	88.941	16009.446
190	10	1.60	44.986	0.049	0.494	93.883	17837.686
sum					17.46	2045.10	251769.95

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด C อัตราการรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.50	39.988	0.044	0.000	0.000	0.000
10	10	1.60	44.986	0.049	0.494	4.941	49.412
20	10	1.70	49.985	0.055	0.549	10.980	219.608
30	10	1.80	54.983	0.060	0.604	18.118	543.531
40	10	1.90	59.981	0.066	0.659	26.353	1054.120
50	10	1.95	62.481	0.069	0.686	34.314	1715.690
60	10	3.30	129.960	0.143	1.427	85.647	5138.835
70	10	5.15	222.431	0.244	2.443	171.020	11971.398
80	10	6.95	312.403	0.343	3.431	274.510	21960.832
90	10	8.35	382.381	0.420	4.200	378.001	34020.073
100	10	8.15	372.385	0.409	4.090	409.020	40902.049
110	10	6.95	312.403	0.343	3.431	377.452	41519.697
120	10	5.30	229.929	0.253	2.525	303.059	36367.137
130	10	3.95	162.450	0.178	1.784	231.961	30154.967
140	10	3.20	124.961	0.137	1.373	192.157	26902.019
150	10	3.00	114.964	0.126	1.263	189.412	28411.826
160	10	2.60	94.971	0.104	1.043	166.902	26704.371
170	10	2.30	79.975	0.088	0.878	149.334	25386.721
180	10	2.30	79.975	0.088	0.878	158.118	28461.238
190	10	2.30	79.975	0.088	0.878	166.902	31711.441
sum					22.35	2722.32	350541.54

ตารางที่ ข-4 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด D อัตราการรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$

Time (min), t_i	Δt_i	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0	0	1.55	42.487	0.047	0.000	0.000	0.000
10	10	1.75	52.484	0.058	0.576	5.765	57.647
20	10	1.90	59.981	0.066	0.659	13.176	263.530
30	10	2.30	79.975	0.088	0.878	26.353	790.590
40	10	2.85	107.467	0.118	1.180	47.216	1888.632
50	10	3.60	144.955	0.159	1.592	79.608	3980.401
60	10	5.50	239.926	0.264	2.635	158.118	9487.079
70	10	7.40	334.896	0.368	3.678	257.491	18024.353
80	10	8.65	397.377	0.436	4.365	349.177	27934.178
90	10	9.80	454.859	0.500	4.996	449.648	40468.323
100	10	9.20	424.868	0.467	4.667	466.668	46666.767
110	10	7.50	339.895	0.373	3.733	410.668	45173.431
120	10	6.00	264.918	0.291	2.910	349.177	41901.267
130	10	4.20	174.946	0.192	1.922	249.804	32474.580
140	10	3.20	124.961	0.137	1.373	192.157	26902.019
150	10	2.10	69.978	0.077	0.769	115.294	17294.155
160	10	1.75	52.484	0.058	0.576	92.235	14757.679
170	10	1.60	44.986	0.049	0.494	84.000	14280.031
180	10	1.60	44.986	0.049	0.494	88.941	16009.446
190	10	1.60	44.986	0.049	0.494	93.883	17837.686
sum					22.43	2592.48	313765.38

ตารางที่ ข-5 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด E อัตราการรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.55	42.487	0.047	0.000	0.000	0.000
10	10	1.55	42.487	0.047	0.467	4.667	46.667
20	10	1.55	42.487	0.047	0.467	9.333	186.667
30	10	1.70	49.985	0.055	0.549	16.471	494.119
40	10	1.90	59.981	0.066	0.659	26.353	1054.120
50	10	2.30	79.975	0.088	0.878	43.922	2196.083
60	10	4.30	179.944	0.198	1.976	118.588	7115.309
70	10	6.50	289.910	0.318	3.184	222.902	15603.171
80	10	8.00	364.887	0.401	4.008	320.628	25650.251
90	10	8.85	407.374	0.447	4.475	402.707	36243.608
100	10	8.50	389.879	0.428	4.282	428.236	42823.622
110	10	7.05	317.402	0.349	3.486	383.491	42184.013
120	10	4.70	199.938	0.220	2.196	263.530	31623.598
130	10	3.80	154.952	0.170	1.702	221.255	28763.199
140	10	3.10	119.963	0.132	1.318	184.471	25825.938
150	10	2.70	99.969	0.110	1.098	164.706	24705.936
160	10	2.10	69.978	0.077	0.769	122.981	19676.905
170	10	2.10	69.978	0.077	0.769	130.667	22213.381
180	10	2.10	69.978	0.077	0.769	138.353	24903.583
sum					20.86	2440.40	298963.78

ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางกรวดอัตราภาระรับน้ำเท่ากับ 12.105 m³/m².d

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.70	49.985	0.055	0.000	0.000	0.000
10	10	1.90	59.981	0.066	0.659	6.588	65.882
20	10	2.10	69.978	0.077	0.769	15.373	307.452
30	10	4.60	194.940	0.214	2.141	64.235	1927.063
40	10	7.95	362.388	0.398	3.980	159.216	6368.641
50	10	11.30	529.836	0.582	5.820	290.981	14549.051
60	10	11.85	557.327	0.612	6.122	367.295	22037.695
70	10	8.85	407.374	0.447	4.475	313.216	21925.145
80	10	3.60	144.955	0.159	1.592	127.373	10189.826
90	10	2.75	102.468	0.113	1.125	101.294	9116.490
100	10	2.10	69.978	0.077	0.769	76.863	7686.291
110	10	2.10	69.978	0.077	0.769	84.549	9300.412
120	10	2.10	69.978	0.077	0.769	92.235	11068.259
sum					3.43	354.94	358.37

ตารางที่ ข-7 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางทรายอัตราภาระรับน้ำเท่ากับ 12.105 m³/m².d

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.70	49.985	0.055	0.000	0.000	0.000
10	10	1.70	49.985	0.055	0.549	5.490	54.902
20	10	1.90	59.981	0.066	0.659	13.176	263.530
30	10	5.30	229.929	0.253	2.525	75.765	2272.946
40	10	8.75	402.375	0.442	4.420	176.785	7071.388
50	10	10.25	477.352	0.524	5.243	262.157	13107.871
60	10	11.95	562.326	0.618	6.176	370.589	22235.342
70	10	9.50	439.864	0.483	4.831	338.197	23673.777
80	10	4.30	179.944	0.198	1.976	158.118	12649.439
90	10	2.00	64.980	0.071	0.714	64.235	5781.189
100	10	2.00	64.980	0.071	0.714	71.373	7137.270
110	10	2.00	64.980	0.071	0.714	78.510	8636.097
sum					2.14	214.12	216.26

ตารางที่ ข-7 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด C อัตราการรับน้ำเท่ากับ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	$C/C_0 = Ci$	$Ci\Delta ti$	$tiCi\Delta ti$	$ti^2Ci\Delta ti$
0	0	1.60	44.986	0.049	0.000	0.000	0.000
10	10	1.90	59.981	0.066	0.659	6.588	65.882
20	10	3.10	119.963	0.132	1.318	26.353	527.060
30	10	5.60	244.924	0.269	2.690	80.706	2421.182
40	10	9.15	422.369	0.464	4.639	185.569	7422.761
50	10	11.25	527.336	0.579	5.792	289.608	14480.423
60	10	13.35	632.304	0.695	6.945	416.707	25002.407
70	10	11.15	522.338	0.574	5.737	401.609	28112.610
80	10	3.65	147.454	0.162	1.620	129.569	10365.513
90	10	2.60	94.971	0.104	1.043	93.883	8449.430
100	10	2.40	84.974	0.093	0.933	93.334	9333.353
110	10	2.20	74.977	0.082	0.824	90.588	9964.727
120	10	1.80	54.983	0.060	0.604	72.471	8696.489
130	10	1.80	54.983	0.060	0.604	78.510	10206.297
140	10	1.80	54.983	0.060	0.604	84.549	11836.888
sum					4.61	513.33	517.95

ตารางที่ ข-8 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด D อัตราการรับน้ำเท่ากับ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (min), t_i	Δt_i	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), C_i	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0	0	1.65	47.485	0.052	0.000	0.000	0.000
10	10	1.65	47.485	0.052	0.522	5.216	52.157
20	10	1.75	52.484	0.058	0.576	11.529	230.589
30	10	3.75	152.453	0.167	1.675	50.235	1507.062
40	10	7.75	352.391	0.387	3.871	154.824	6192.955
50	10	11.00	514.840	0.565	5.655	282.746	14137.285
60	10	12.45	587.318	0.645	6.451	387.060	23223.580
70	10	9.90	459.857	0.505	5.051	353.569	24749.857
80	10	5.65	247.423	0.272	2.718	217.412	17392.979
90	10	3.85	157.451	0.173	1.729	155.647	14008.266
100	10	3.00	114.964	0.126	1.263	126.275	12627.478
110	10	1.85	57.482	0.063	0.631	69.451	7639.624
120	10	1.85	57.482	0.063	0.631	75.765	9091.784
130	10	1.85	57.482	0.063	0.631	82.079	10670.219
sum					4.89	509.22	514.10

ตารางที่ ข-9 ผลการศึกษาสารติดตามตัวกลางหินดินดานขนาด E อัตราการรับน้ำเท่ากับ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (min), ti	Δti	ml AgNO ₃	NaCl (mg/L), Ci	C/C ₀ = Ci	Ci Δti	tiCi Δti	ti ² Ci Δti
0	0	1.75	52.484	0.058	0.000	0.000	0.000
10	10	1.75	52.484	0.058	0.576	5.765	57.647
20	10	1.90	59.981	0.066	0.659	13.176	263.530
30	10	3.50	139.957	0.154	1.537	46.118	1383.532
40	10	7.55	342.394	0.376	3.761	150.432	6017.268
50	10	10.85	507.343	0.557	5.573	278.628	13931.403
60	10	12.35	582.319	0.640	6.396	383.766	23025.932
70	10	9.75	452.360	0.497	4.969	347.805	24346.327
80	10	5.50	239.926	0.264	2.635	210.824	16865.919
90	10	3.75	152.453	0.167	1.675	150.706	13563.559
100	10	2.80	104.967	0.115	1.153	115.294	11529.437
110	10	1.90	59.981	0.066	0.659	72.471	7971.782
120	10	1.90	59.981	0.066	0.659	79.059	9487.079
130	10	1.90	59.981	0.066	0.659	85.647	11134.142
sum					4.80	503.18	507.98

ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าการกระจายการไหล

การคำนวณหาค่าการกระจายไหล จากผลการศึกษา Tracer study

1. Tracer study HLR = 2.632 m³/m².d

1.1 กรวด

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{2485.97}{20.73} = 119.95 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{313897.15}{20.73} - (119.95)^2 = 754.17$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{754.17}{(119.95)^2} = 0.052$$

$$d = 0.023$$

1.2 ทราย

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{2045.10}{17.46} = 117.14 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{251769.95}{17.73} - (117.14)^2 = 699.36$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{699.36}{(117.14)^2} = 0.051$$

$$d = 0.023$$

1.3 หินดินดานขนาด C

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{2722.32}{22.35} = 121.83 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{350541.54}{22.35} - (121.83)^2 = 844.93$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{844.93}{(121.83)^2} = 0.057$$

$$d = 0.023$$

1.4 หินดินดานขนาด D

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{2592.48}{22.43} = 115.59 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{313765.38}{22.43} - (115.59)^2 = 628.32$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{628.32}{(115.59)^2} = 0.047$$

$$d = 0.023$$

1.5 หินดินดานขนาด E

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{2440.40}{20.86} = 116.97 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{298963.78}{20.86} - (116.97)^2 = 647.16$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{647.16}{(116.97)^2} = 0.047$$

$$d = 0.023$$

2. Tracer study HLR = 12.105 m³/m².d

2.1 กรวด

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{354.94}{3.43} = 103.44 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{37171.45}{3.43} - (103.44)^2 = 132.97$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{132.97}{(103.44)^2} = 0.012$$

$$d = 0.005$$

2.2 ทราย

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{214.12}{2.14} = 100.00 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{21554.56}{2.14} - (100.00)^2 = 66.67$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{66.67}{(100.00)^2} = 0.007$$

$$d = 0.003$$

2.3 หินดินดานขนาด C

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{513.33}{4.61} = 111.31 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{58487.19}{4.61} - (111.31)^2 = 292.33$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{292.33}{(111.31)^2} = 0.024$$

$$d = 0.011$$

2.4 หินดินดานขนาด D

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{509.22}{4.89} = 104.21 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{54037.37}{4.89} - (104.21)^2 = 198.54$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{198.54}{(104.21)^2} = 0.018$$

$$d = 0.001$$

2.5 หินดินดานขนาด E

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i c_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} = \frac{503.18}{4.80} = 104.74 \text{ นาที}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 = \frac{53686.00}{4.80} - (104.74)^2 = 204.36$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{204.36}{(104.74)^2} = 0.019$$

$$d = 0.001$$

ตารางที่ ง-1 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	112.320	160.000	0.702	806.400	566.093	240.307
2	5040	90.530	186.670	0.485	940.817	456.271	484.546
3	5040	167.760	186.670	0.899	940.817	845.510	95.306
4	5040	113.860	186.670	0.610	940.817	573.854	366.962
5	5040	113.510	213.330	0.532	1075.183	572.090	503.093
6	5040	105.610	213.330	0.495	1075.183	532.274	542.909
7	5040	166.400	213.330	0.780	1075.183	838.656	236.527
8	5040	193.070	213.330	0.905	1075.183	973.073	102.110
9	5040	161.070	240.000	0.671	1209.600	811.793	397.807
10	5040	132.010	293.330	0.450	1478.383	665.330	813.053
11	5040	118.810	145.210	0.818	731.858	598.802	133.056
12	5040	145.210	158.420	0.917	798.437	731.858	66.578
13	5040	180.270	238.930	0.754	1204.207	908.561	295.646
14	5040	190.930	228.270	0.836	1150.481	962.287	188.194
15	5040	206.930	217.600	0.951	1096.704	1042.927	53.777
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							4519.872
ปริมาณกรวด (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณกรวด (mg/g)							4.520

ตารางที่ ง-2 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	282.670	371.560	0.761	4280.371	3256.358	1024.013
2	11520	184.890	371.560	0.498	4280.371	2129.933	2150.438
3	11520	282.670	309.330	0.914	3563.482	3256.358	307.123
4	11520	207.420	318.540	0.651	3669.581	2389.478	1280.102
5	11520	170.380	306.200	0.556	3527.424	1962.778	1564.646
6	11520	182.730	306.200	0.597	3527.424	2105.050	1422.374
7	11520	177.790	251.870	0.706	2901.542	2048.141	853.402
8	11520	162.980	266.690	0.611	3072.269	1877.530	1194.739
9	11520	167.910	251.870	0.667	2901.542	1934.323	967.219
10	11520	232.120	266.690	0.870	3072.269	2674.022	398.246
11	11520	252.080	339.540	0.742	3911.501	2903.962	1007.539
12	11520	308.670	380.700	0.811	4385.664	3555.878	829.786
13	11520	225.330	415.680	0.542	4788.634	2595.802	2192.832
14	11520	272.660	293.240	0.930	3378.125	3141.043	237.082
15	11520	261.340	379.670	0.688	4373.798	3010.637	1363.162
16	11520	395.100	400.240	0.987	4610.765	4551.552	59.213
17	11520	293.240	365.260	0.803	4207.795	3378.125	829.670
18	11520	252.080	380.700	0.662	4385.664	2903.962	1481.702
19	11520	298.380	344.680	0.866	3970.714	3437.338	533.376
20	11520	354.970	365.260	0.972	4207.795	4089.254	118.541
21	11520	349.830	354.970	0.986	4089.254	4030.042	59.213
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							19874.419
ปริมาณกรวด (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณกรวด (mg/g)							19.874

ตารางที่ ง-3 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	389.380	434.440	0.896	10009.498	8971.315	1038.182
2	23040	290.230	299.240	0.970	6894.490	6686.899	207.590
3	23040	263.190	326.280	0.807	7517.491	6063.898	1453.594
4	23040	362.340	389.380	0.931	8971.315	8348.314	623.002
5	23040	308.260	389.380	0.792	8971.315	7102.310	1869.005
6	23040	270.400	432.640	0.625	9968.026	6230.016	3738.010
7	23040	198.290	207.310	0.956	4776.422	4568.602	207.821
8	23040	234.350	342.510	0.684	7891.430	5399.424	2492.006
9	23040	198.290	297.440	0.667	6853.018	4568.602	2284.416
10	23040	99.150	261.390	0.379	6022.426	2284.416	3738.010
11	23040	316.370	351.520	0.900	8099.021	7289.165	809.856
12	23040	297.440	351.520	0.846	8099.021	6853.018	1246.003
13	23040	252.370	306.450	0.824	7060.608	5814.605	1246.003
14	23040	261.390	297.440	0.879	6853.018	6022.426	830.592
15	23040	216.320	270.400	0.800	6230.016	4984.013	1246.003
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		23030.093
					ปริมาณกรวด (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณกรวด (mg/g)		23.030

ตารางที่ ง-4 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	96.160	160.000	0.601	806.400	484.646	321.754
2	5040	74.660	186.670	0.400	940.817	376.286	564.530
3	5040	145.970	186.670	0.782	940.817	735.689	205.128
4	5040	98.000	186.670	0.525	940.817	493.920	446.897
5	5040	95.990	213.330	0.450	1075.183	483.790	591.394
6	5040	79.210	213.330	0.371	1075.183	399.218	675.965
7	5040	145.070	213.330	0.680	1075.183	731.153	344.030
8	5040	123.730	213.330	0.580	1075.183	623.599	451.584
9	5040	113.070	240.000	0.471	1209.600	569.873	639.727
10	5040	52.810	293.330	0.180	1478.383	266.162	1212.221
11	5040	39.600	145.210	0.273	731.858	199.584	532.274
12	5040	66.010	158.420	0.417	798.437	332.690	465.746
13	5040	110.930	238.930	0.464	1204.207	559.087	645.120
14	5040	94.930	228.270	0.416	1150.481	478.447	672.034
15	5040	84.270	217.600	0.387	1096.704	424.721	671.983
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		8440.387
					ปริมาณทราย (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณทราย (mg/g)		8.440

ตารางที่ ง-5 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	247.110	371.560	0.665	4280.371	2846.707	1433.664
2	11520	176.000	371.560	0.474	4280.371	2027.520	2252.851
3	11520	256.000	309.330	0.828	3563.482	2949.120	614.362
4	11520	182.730	318.540	0.574	3669.581	2105.050	1564.531
5	11520	182.730	306.200	0.597	3527.424	2105.050	1422.374
6	11520	121.000	306.200	0.395	3527.424	1393.920	2133.504
7	11520	143.220	251.870	0.569	2901.542	1649.894	1251.648
8	11520	108.650	266.690	0.407	3072.269	1251.648	1820.621
9	11520	133.340	251.870	0.529	2901.542	1536.077	1365.466
10	11520	143.220	266.690	0.537	3072.269	1649.894	1422.374
11	11520	200.640	339.540	0.591	3911.501	2311.373	1600.128
12	11520	236.650	380.700	0.622	4385.664	2726.208	1659.456
13	11520	199.610	415.680	0.480	4788.634	2299.507	2489.126
14	11520	154.340	293.240	0.526	3378.125	1777.997	1600.128
15	11520	163.600	379.670	0.431	4373.798	1884.672	2489.126
16	11520	179.030	400.240	0.447	4610.765	2062.426	2548.339
17	11520	185.200	365.260	0.507	4207.795	2133.504	2074.291
18	11520	159.480	380.700	0.419	4385.664	1837.210	2548.454
19	11520	138.900	344.680	0.403	3970.714	1600.128	2370.586
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							34661.030
ปริมาณทราย (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณทราย (mg/g)							34.661

ตารางที่ ง-6 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	182.070	434.440	0.419	10009.498	4194.893	5814.605
2	23040	290.230	299.240	0.970	6894.490	6686.899	207.590
3	23040	200.100	326.280	0.613	7517.491	4610.304	2907.187
4	23040	236.150	389.380	0.606	8971.315	5440.896	3530.419
5	23040	118.980	389.380	0.306	8971.315	2741.299	6230.016
6	23040		432.640	0.000	9968.026		
7	23040	189.280	207.310	0.913	4776.422	4361.011	415.411
8	23040	81.120	342.510	0.237	7891.430	1869.005	6022.426
9	23040	189.280	297.440	0.636	6853.018	4361.011	2492.006
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							27619.661
ปริมาณทราย (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณทราย (mg/g)							27.620

ตารางที่ ง-7 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	78.240	160.000	0.489	806.400	394.330	412.070
2	5040	75.040	186.670	0.402	940.817	378.202	562.615
3	5040	105.280	186.670	0.564	940.817	530.611	410.206
4	5040	111.620	186.670	0.598	940.817	562.565	378.252
5	5040	145.170	213.330	0.680	1075.183	731.657	343.526
6	5040	105.610	213.330	0.495	1075.183	532.274	542.909
7	5040	187.730	213.330	0.880	1075.183	946.159	129.024
8	5040	161.070	213.330	0.755	1075.183	811.793	263.390
9	5040	171.730	240.000	0.716	1209.600	865.519	344.081
10	5040	118.810	293.330	0.405	1478.383	598.802	879.581
11	5040	118.810	145.210	0.818	731.858	598.802	133.056
12	5040	145.210	158.420	0.917	798.437	731.858	66.578
13	5040	169.600	238.930	0.710	1204.207	854.784	349.423
14	5040	174.930	228.270	0.766	1150.481	881.647	268.834
15	5040	190.930	217.600	0.877	1096.704	962.287	134.417
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		5217.962
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		5.218

ตารางที่ ง-8 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีโอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีโอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีโอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	202.670	371.560	0.545	4280.371	2334.758	1945.613
2	11520	167.110	371.560	0.450	4280.371	1925.107	2355.264
3	11520	193.780	309.330	0.626	3563.482	2232.346	1331.136
4	11520	207.420	318.540	0.651	3669.581	2389.478	1280.102
5	11520	219.770	306.200	0.718	3527.424	2531.750	995.674
6	11520	182.730	306.200	0.597	3527.424	2105.050	1422.374
7	11520	207.420	251.870	0.824	2901.542	2389.478	512.064
8	11520	187.670	266.690	0.704	3072.269	2161.958	910.310
9	11520	182.730	251.870	0.725	2901.542	2105.050	796.493
10	11520	222.240	266.690	0.833	3072.269	2560.205	512.064
11	11520	277.800	339.540	0.818	3911.501	3200.256	711.245
12	11520	257.230	380.700	0.676	4385.664	2963.290	1422.374
13	11520	245.910	415.680	0.592	4788.634	2832.883	1955.750
14	11520	241.790	293.240	0.825	3378.125	2785.421	592.704
15	11520	281.920	379.670	0.743	4373.798	3247.718	1126.080
16	11520	395.100	400.240	0.987	4610.765	4551.552	59.213
17	11520	334.390	365.260	0.915	4207.795	3852.173	355.622
18	11520	339.540	380.700	0.892	4385.664	3911.501	474.163
19	11520	313.820	344.680	0.910	3970.714	3615.206	355.507
20	11520	293.240	365.260	0.803	4207.795	3378.125	829.670
21	11520	303.530	354.970	0.855	4089.254	3496.666	592.589
ปริมาณซีโอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							20536.013
ปริมาณหินดินดาน C (g)							1000.000
ปริมาณซีโอดี/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)							20.536

ตารางที่ ง-9 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	281.220	434.440	0.647	10009.498	6479.309	3530.189
2	23040	254.180	299.240	0.849	6894.490	5856.307	1038.182
3	23040	308.260	326.280	0.945	7517.491	7102.310	415.181
4	23040	290.230	389.380	0.745	8971.315	6686.899	2284.416
5	23040	281.220	389.380	0.722	8971.315	6479.309	2492.006
6	23040	225.330	432.640	0.521	9968.026	5191.603	4776.422
7	23040	189.280	207.310	0.913	4776.422	4361.011	415.411
8	23040	243.360	342.510	0.711	7891.430	5607.014	2284.416
9	23040	216.320	297.440	0.727	6853.018	4984.013	1869.005
10	23040	162.240	261.390	0.621	6022.426	3738.010	2284.416
11	23040	225.330	351.520	0.641	8099.021	5191.603	2907.418
12	23040	279.410	351.520	0.795	8099.021	6437.606	1661.414
13	23040	243.360	306.450	0.794	7060.608	5607.014	1453.594
14	23040	243.360	297.440	0.818	6853.018	5607.014	1246.003
15	23040	216.320	270.400	0.800	6230.016	4984.013	1246.003
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		29904.077
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		29.904

ตารางที่ ง-10 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	56.960	160.000	0.356	806.400	287.078	519.322
2	5040	52.360	186.670	0.280	940.817	263.894	676.922
3	5040	95.200	186.670	0.510	940.817	479.808	461.009
4	5040	97.620	186.670	0.523	940.817	492.005	448.812
5	5040	108.700	213.330	0.510	1075.183	547.848	527.335
6	5040	66.010	213.330	0.309	1075.183	332.690	742.493
7	5040	166.400	213.330	0.780	1075.183	838.656	236.527
8	5040	145.070	213.330	0.680	1075.183	731.153	344.030
9	5040	134.400	240.000	0.560	1209.600	677.376	532.224
10	5040	66.010	293.330	0.225	1478.383	332.690	1145.693
11	5040	92.410	145.210	0.636	731.858	465.746	266.112
12	5040	92.410	158.420	0.583	798.437	465.746	332.690
13	5040	164.270	238.930	0.688	1204.207	827.921	376.286
14	5040	169.600	228.270	0.743	1150.481	854.784	295.697
15	5040	169.600	217.600	0.779	1096.704	854.784	241.920
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		7147.073
					ปริมาณหินดินดาน D (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)		7.147

ตารางที่ ง-11 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	184.890	371.560	0.498	4280.371	2129.933	2150.438
2	11520	131.560	371.560	0.354	4280.371	1515.571	2764.800
3	11520	184.890	309.330	0.598	3563.482	2129.933	1433.549
4	11520	195.080	318.540	0.612	3669.581	2247.322	1422.259
5	11520	170.380	306.200	0.556	3527.424	1962.778	1564.646
6	11520	170.380	306.200	0.556	3527.424	1962.778	1564.646
7	11520	172.850	251.870	0.686	2901.542	1991.232	910.310
8	11520	162.980	266.690	0.611	3072.269	1877.530	1194.739
9	11520	167.910	251.870	0.667	2901.542	1934.323	967.219
10	11520	192.610	266.690	0.722	3072.269	2218.867	853.402
11	11520	277.800	339.540	0.818	3911.501	3200.256	711.245
12	11520	308.670	380.700	0.811	4385.664	3555.878	829.786
13	11520	245.910	415.680	0.592	4788.634	2832.883	1955.750
14	11520	257.230	293.240	0.877	3378.125	2963.290	414.835
15	11520	256.200	379.670	0.675	4373.798	2951.424	1422.374
16	11520	395.100	400.240	0.987	4610.765	4551.552	59.213
17	11520	339.540	365.260	0.930	4207.795	3911.501	296.294
18	11520	288.090	380.700	0.757	4385.664	3318.797	1066.867
19	11520	293.240	344.680	0.851	3970.714	3378.125	592.589
20	11520	262.370	365.260	0.718	4207.795	3022.502	1185.293
21	11520	282.950	354.970	0.797	4089.254	3259.584	829.670
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							24189.926
ปริมาณหินดินดาน D (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)							24.190

ตารางที่ ง-12 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีโอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีโอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีโอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	263.190	434.440	0.606	10009.498	6063.898	3945.600
2	23040	290.230	299.240	0.970	6894.490	6686.899	207.590
3	23040	281.220	326.280	0.862	7517.491	6479.309	1038.182
4	23040	317.270	389.380	0.815	8971.315	7309.901	1661.414
5	23040	263.190	389.380	0.676	8971.315	6063.898	2907.418
6	23040	297.440	432.640	0.688	9968.026	6853.018	3115.008
7	23040	206.320	207.310	0.995	4776.422	4753.613	22.810
8	23040	243.360	342.510	0.711	7891.430	5607.014	2284.416
9	23040	252.370	297.440	0.848	6853.018	5814.605	1038.413
10	23040	216.320	261.390	0.828	6022.426	4984.013	1038.413
11	23040	207.310	351.520	0.590	8099.021	4776.422	3322.598
12	23040	270.400	351.520	0.769	8099.021	6230.016	1869.005
					ปริมาณซีโอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		22450.867
					ปริมาณหินดินดาน D (g)		1000.000
					ปริมาณซีโอดี/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)		22.451

ตารางที่ ง-13 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	51.200	160.000	0.320	806.400	258.048	548.352
2	5040	105.840	186.670	0.567	940.817	533.434	407.383
3	5040	104.900	186.670	0.562	940.817	528.696	412.121
4	5040	97.060	186.670	0.520	940.817	489.182	451.634
5	5040	104.310	213.330	0.489	1075.183	525.722	549.461
6	5040	39.600	213.330	0.186	1075.183	199.584	875.599
7	5040	134.400	213.330	0.630	1075.183	677.376	397.807
8	5040	107.730	213.330	0.505	1075.183	542.959	532.224
9	5040	102.400	240.000	0.427	1209.600	516.096	693.504
10	5040	145.210	293.330	0.495	1478.383	731.858	746.525
11	5040	66.010	145.210	0.455	731.858	332.690	399.168
12	5040	79.210	158.420	0.500	798.437	399.218	399.218
13	5040	137.600	238.930	0.576	1204.207	693.504	510.703
14	5040	164.270	228.270	0.720	1150.481	827.921	322.560
15	5040	132.270	217.600	0.608	1096.704	666.641	430.063
					ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		7676.323
					ปริมาณหินดินดาน E (g)		1000.000
					ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)		7.676

ตารางที่ ง-14 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	149.330	371.560	0.402	4280.371	1720.282	2560.090
2	11520	229.330	371.560	0.617	4280.371	2641.882	1638.490
3	11520	202.670	309.330	0.655	3563.482	2334.758	1228.723
4	11520	182.730	318.540	0.574	3669.581	2105.050	1564.531
5	11520	182.730	306.200	0.597	3527.424	2105.050	1422.374
6	11520	133.340	306.200	0.435	3527.424	1536.077	1991.347
7	11520	167.910	251.870	0.667	2901.542	1934.323	967.219
8	11520	148.160	266.690	0.556	3072.269	1706.803	1365.466
9	11520	177.790	251.870	0.706	2901.542	2048.141	853.402
10	11520	212.360	266.690	0.796	3072.269	2446.387	625.882
11	11520	277.800	339.540	0.818	3911.501	3200.256	711.245
12	11520	344.680	380.700	0.905	4385.664	3970.714	414.950
13	11520	240.760	415.680	0.579	4788.634	2773.555	2015.078
14	11520	190.350	293.240	0.649	3378.125	2192.832	1185.293
15	11520	215.040	379.670	0.566	4373.798	2477.261	1896.538
16	11520	343.650	400.240	0.859	4610.765	3958.848	651.917
17	11520	205.780	365.260	0.563	4207.795	2370.586	1837.210
18	11520	277.800	380.700	0.730	4385.664	3200.256	1185.408
19	11520	288.090	344.680	0.836	3970.714	3318.797	651.917
20	11520	236.650	365.260	0.648	4207.795	2726.208	1481.587
21	11520	246.940	354.970	0.696	4089.254	2844.749	1244.506
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							27493.171
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							27.493

ตารางที่ ง-15 ผลการคำนวณปริมาณ เข้า-ออกซีไอดี ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณซีไอดีที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณซีไอดีที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	308.260	434.440	0.710	10009.498	7102.310	2907.187
2	23040	254.180	299.240	0.849	6894.490	5856.307	1038.182
3	23040	254.180	326.280	0.779	7517.491	5856.307	1661.184
4	23040	263.190	389.380	0.676	8971.315	6063.898	2907.418
5	23040	209.110	389.380	0.537	8971.315	4817.894	4153.421
6	23040	144.210	432.640	0.333	9968.026	3322.598	6645.427
7	23040	162.240	207.310	0.783	4776.422	3738.010	1038.413
8	23040	162.240	342.510	0.474	7891.430	3738.010	4153.421
9	23040	198.290	297.440	0.667	6853.018	4568.602	2284.416
10	23040	189.280	261.390	0.724	6022.426	4361.011	1661.414
ปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							28450.483
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณซีไอดี/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							28.450

ตารางที่ ง-16 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	77.833	90.667	0.858	456.962	392.278	64.683
2	5040	78.500	94.000	0.835	473.760	395.640	78.120
3	5040	105.250	135.000	0.780	680.400	530.460	149.940
4	5040	92.500	112.667	0.821	567.842	466.200	101.642
5	5040	100.172	100.498	0.997	506.510	504.867	1.643
6	5040	109.485	109.567	0.999	552.218	551.804	0.413
7	5040	101.642	101.724	0.999	512.689	512.276	0.413
8	5040	104.093	108.750	0.957	548.100	524.629	23.471
9	5040	126.397	130.482	0.969	657.629	637.041	20.588
10	5040	105.319	107.606	0.979	542.334	530.808	11.526
11	5040	99.600	100.498	0.991	506.510	501.984	4.526
12	5040	101.315	101.479	0.998	511.454	510.628	0.827
13	5040	100.743	100.825	0.999	508.158	507.745	0.413
14	5040	100.825	101.724	0.991	512.689	508.158	4.531
15	5040	102.214	102.296	0.999	515.572	515.159	0.413
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							463.151
ปริมาณกรวด (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณกรวด (mg/g)							0.463

ตารางที่ ง-17 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	53.993	60.429	0.893	696.142	621.999	74.143
2	11520	54.901	57.706	0.951	664.773	632.460	32.314
3	11520	50.446	52.426	0.962	603.948	581.138	22.810
4	11520	53.581	54.901	0.976	632.460	617.253	15.206
5	11520	56.386	59.109	0.954	680.936	649.567	31.369
6	11520	68.680	69.422	0.989	799.741	791.194	8.548
7	11520	53.911	54.158	0.995	623.900	621.055	2.845
8	11520	56.139	56.386	0.996	649.567	646.721	2.845
9	11520	57.129	58.614	0.975	675.233	658.126	17.107
10	11520	59.356	60.347	0.984	695.197	683.781	11.416
11	11520	61.337	62.079	0.988	715.150	706.602	8.548
12	11520	62.987	64.059	0.983	737.960	725.610	12.349
13	11520	64.719	65.545	0.987	755.078	745.563	9.516
14	11520	66.617	67.277	0.990	775.031	767.428	7.603
15	11520	66.535	67.525	0.985	777.888	766.483	11.405
16	11520	68.102	68.762	0.990	792.138	784.535	7.603
17	11520	68.515	70.000	0.979	806.400	789.293	17.107
18	11520	56.634	57.624	0.983	663.828	652.424	11.405
19	11520	57.624	58.284	0.989	671.432	663.828	7.603
20	11520	70.908	71.733	0.988	826.364	816.860	9.504
21	11520	75.198	76.188	0.987	877.686	866.281	11.405
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							332.652
ปริมาณกรวด (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณกรวด (mg/g)							0.333

ตารางที่ ง-18 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	44.360	55.080	0.805	1269.043	1022.054	246.989
2	23040	56.900	67.130	0.848	1546.675	1310.976	235.699
3	23040	57.230	68.450	0.836	1577.088	1318.579	258.509
4	23040	66.390	66.470	0.999	1531.469	1529.626	1.843
5	23040	52.190	52.690	0.991	1213.978	1202.458	11.520
6	23040	64.160	64.320	0.998	1481.933	1478.246	3.686
7	23040	64.650	65.150	0.992	1501.056	1489.536	11.520
8	23040	61.440	64.160	0.958	1478.246	1415.578	62.669
9	23040	61.110	61.600	0.992	1419.264	1407.974	11.290
10	23040	39.160	54.010	0.725	1244.390	902.246	342.144
11	23040	64.490	65.560	0.984	1510.502	1485.850	24.653
12	23040	63.170	64.240	0.983	1480.090	1455.437	24.653
13	23040	61.770	62.430	0.989	1438.387	1423.181	15.206
14	23040	64.900	65.230	0.995	1502.899	1495.296	7.603
15	23040	64.410	64.650	0.996	1489.536	1484.006	5.530
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		1263.514
					ปริมาณกรวด (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณกรวด (mg/g)		1.264

ตารางที่ ง-19 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	62.667	90.667	0.691	456.962	315.842	141.120
2	5040	89.500	94.000	0.952	473.760	451.080	22.680
3	5040	89.000	135.000	0.659	680.400	448.560	231.840
4	5040	108.750	112.667	0.965	567.842	548.100	19.742
5	5040	96.250	100.498	0.958	506.510	485.100	21.410
6	5040	101.642	109.567	0.928	552.218	512.276	39.942
7	5040	101.152	101.724	0.994	512.689	509.806	2.883
8	5040	107.851	108.750	0.992	548.100	543.569	4.531
9	5040	129.910	130.482	0.996	657.629	654.746	2.883
10	5040	105.155	107.606	0.977	542.334	529.981	12.353
11	5040	99.436	100.498	0.989	506.510	501.157	5.352
12	5040	101.315	101.479	0.998	511.454	510.628	0.827
13	5040	100.743	100.825	0.999	508.158	507.745	0.413
14	5040	100.417	101.724	0.987	512.689	506.102	6.587
15	5040	102.214	102.296	0.999	515.572	515.159	0.413
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		512.976
					ปริมาณทราย (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณทราย (mg/g)		0.513

ตารางที่ ง-20 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	50.198	60.429	0.831	696.142	578.281	117.861
2	11520	53.333	57.706	0.924	664.773	614.396	50.377
3	11520	48.96	52.426	0.934	603.948	564.019	39.928
4	11520	49.538	54.901	0.902	632.460	570.678	61.782
5	11520	52.261	59.109	0.884	680.936	602.047	78.889
6	11520	66.535	69.422	0.958	799.741	766.483	33.258
7	11520	52.921	54.158	0.977	623.900	609.650	14.250
8	11520	55.149	56.386	0.978	649.567	635.316	14.250
9	11520	56.964	58.614	0.972	675.233	656.225	19.008
10	11520	59.191	60.347	0.981	695.197	681.880	13.317
11	11520	60.512	62.079	0.975	715.150	697.098	18.052
12	11520	62.904	64.059	0.982	737.960	724.654	13.306
13	11520	64.224	65.545	0.980	755.078	739.860	15.218
14	11520	66.947	67.277	0.995	775.031	771.229	3.802
15	11520	66.782	67.525	0.989	777.888	769.329	8.559
16	11520	65.297	68.762	0.950	792.138	752.221	39.917
17	11520	64.307	70.000	0.919	806.400	740.817	65.583
18	11520	56.634	57.624	0.983	663.828	652.424	11.405
19	11520	49.208	58.284	0.844	671.432	566.876	104.556
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		723.318
					ปริมาณทราย (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณทราย (mg/g)		0.723

ตารางที่ ง-21 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกจากระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	36.930	55.080	0.670	1269.043	850.867	418.176
2	23040	49.140	67.130	0.732	1546.675	1132.186	414.490
3	23040	52.690	68.450	0.770	1577.088	1213.978	363.110
4	23040	58.550	66.470	0.881	1531.469	1348.992	182.477
5	23040	35.690	52.690	0.677	1213.978	822.298	391.680
6	23040		64.320	0.000	1481.933		
7	23040	40.010	65.150	0.614	1501.056	921.830	579.226
8	23040	41.080	64.160	0.640	1478.246	946.483	531.763
9	23040	49.440	61.600	0.803	1419.264	1139.098	280.166
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							3161.088
ปริมาณทราย (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณทราย (mg/g)							3.161

ตารางที่ ง-22 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	68.333	90.667	0.754	456.962	344.398	112.563
2	5040	81.000	94.000	0.862	473.760	408.240	65.520
3	5040	95.250	135.000	0.706	680.400	480.060	200.340
4	5040	94.000	112.667	0.834	567.842	473.760	94.082
5	5040	95.515	100.498	0.950	506.510	481.396	25.114
6	5040	104.093	109.567	0.950	552.218	524.629	27.589
7	5040	101.642	101.724	0.999	512.689	512.276	0.413
8	5040	101.397	108.750	0.932	548.100	511.041	37.059
9	5040	127.459	130.482	0.977	657.629	642.393	15.236
10	5040	105.400	107.606	0.980	542.334	531.216	11.118
11	5040	98.946	100.498	0.985	506.510	498.688	7.822
12	5040	99.763	101.479	0.983	511.454	502.806	8.649
13	5040	99.845	100.825	0.990	508.158	503.219	4.939
14	5040	100.662	101.724	0.990	512.689	507.336	5.352
15	5040	101.806	102.296	0.995	515.572	513.102	2.470
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		618.267
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		0.618

ตารางที่ ง-23 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	48.710	60.429	0.806	696.142	561.139	135.003
2	11520	49.460	57.706	0.857	664.773	569.779	94.994
3	11520	47.970	52.426	0.915	603.948	552.614	51.333
4	11520	52.920	54.901	0.964	632.460	609.638	22.821
5	11520	58.120	59.109	0.983	680.936	669.542	11.393
6	11520	68.020	69.422	0.980	799.741	783.590	16.151
7	11520	49.950	54.158	0.922	623.900	575.424	48.476
8	11520	53.170	56.386	0.943	649.567	612.518	37.048
9	11520	56.390	58.614	0.962	675.233	649.613	25.620
10	11520	58.370	60.347	0.967	695.197	672.422	22.775
11	11520	60.100	62.079	0.968	715.150	692.352	22.798
12	11520	61.580	64.059	0.961	737.960	709.402	28.558
13	11520	63.320	65.545	0.966	755.078	729.446	25.632
14	11520	65.300	67.277	0.971	775.031	752.256	22.775
15	11520	66.040	67.525	0.978	777.888	760.781	17.107
16	11520	68.270	68.762	0.993	792.138	786.470	5.668
17	11520	68.760	70.000	0.982	806.400	792.115	14.285
18	11520	57.130	57.624	0.991	663.828	658.138	5.691
19	11520	57.870	58.284	0.993	671.432	666.662	4.769
20	11520	70.740	71.733	0.986	826.364	814.925	11.439
21	11520	75.200	76.188	0.987	877.686	866.304	11.382
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							635.720
ปริมาณหินดินดาน C (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)							0.636

ตารางที่ ง-24 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	39.240	55.080	0.712	1269.043	904.090	364.954
2	23040	47.160	67.130	0.703	1546.675	1086.566	460.109
3	23040	54.590	68.450	0.798	1577.088	1257.754	319.334
4	23040	65.890	66.470	0.991	1531.469	1518.106	13.363
5	23040	52.360	52.690	0.994	1213.978	1206.374	7.603
6	23040	57.970	64.320	0.901	1481.933	1335.629	146.304
7	23040	63.910	65.150	0.981	1501.056	1472.486	28.570
8	23040	55.000	64.160	0.857	1478.246	1267.200	211.046
9	23040	51.620	61.600	0.838	1419.264	1189.325	229.939
10	23040	48.560	54.010	0.899	1244.390	1118.822	125.568
11	23040	64.410	65.560	0.982	1510.502	1484.006	26.496
12	23040	63.500	64.240	0.988	1480.090	1463.040	17.050
13	23040	61.770	62.430	0.989	1438.387	1423.181	15.206
14	23040	64.080	65.230	0.982	1502.899	1476.403	26.496
15	23040	63.910	64.650	0.989	1489.536	1472.486	17.050
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		2009.088
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		2.009

ตารางที่ ง-25 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	45.25	90.667	0.499	456.962	228.060	228.902
2	5040	74.917	94	0.797	473.760	377.582	96.178
3	5040	93.583	135	0.693	680.400	471.658	208.742
4	5040	94.25	112.667	0.837	567.842	475.020	92.822
5	5040	83.015	100.498	0.826	506.510	418.396	88.114
6	5040	98.619	109.567	0.900	552.218	497.040	55.178
7	5040	94.289	101.724	0.927	512.689	475.217	37.472
8	5040	102.541	108.75	0.943	548.100	516.807	31.293
9	5040	121.495	130.482	0.931	657.629	612.335	45.294
10	5040	104.093	107.606	0.967	542.334	524.629	17.706
11	5040	98.211	100.498	0.977	506.510	494.983	11.526
12	5040	99.191	101.479	0.977	511.454	499.923	11.532
13	5040	99.273	100.825	0.985	508.158	500.336	7.822
14	5040	99.845	101.724	0.982	512.689	503.219	9.470
15	5040	100.58	102.296	0.983	515.572	506.923	8.649
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		950.700
					ปริมาณหินดินดาน D (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน (mg/g)		0.951

ตารางที่ ง-26 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	45.25	90.667	0.499	456.962	228.060	228.902
2	5040	74.917	94	0.797	473.760	377.582	96.178
3	5040	93.583	135	0.693	680.400	471.658	208.742
4	5040	94.25	112.667	0.837	567.842	475.020	92.822
5	5040	83.015	100.498	0.826	506.510	418.396	88.114
6	5040	98.619	109.567	0.900	552.218	497.040	55.178
7	5040	94.289	101.724	0.927	512.689	475.217	37.472
8	5040	102.541	108.75	0.943	548.100	516.807	31.293
9	5040	121.495	130.482	0.931	657.629	612.335	45.294
10	5040	104.093	107.606	0.967	542.334	524.629	17.706
11	5040	98.211	100.498	0.977	506.510	494.983	11.526
12	5040	99.191	101.479	0.977	511.454	499.923	11.532
13	5040	99.273	100.825	0.985	508.158	500.336	7.822
14	5040	99.845	101.724	0.982	512.689	503.219	9.470
15	5040	100.58	102.296	0.983	515.572	506.923	8.649
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		950.700
					ปริมาณหินดินดาน D (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน (mg/g)		0.951

ตารางที่ ง-27 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	37.670	55.080	0.684	1269.043	867.917	401.126
2	23040	53.510	67.130	0.797	1546.675	1232.870	313.805
3	23040	56.650	68.450	0.828	1577.088	1305.216	271.872
4	23040	61.520	66.470	0.926	1531.469	1417.421	114.048
5	23040	51.530	52.690	0.978	1213.978	1187.251	26.726
6	23040	56.980	64.320	0.886	1481.933	1312.819	169.114
7	23040	61.680	65.150	0.947	1501.056	1421.107	79.949
8	23040	53.270	64.160	0.830	1478.246	1227.341	250.906
9	23040	42.870	61.600	0.696	1419.264	987.725	431.539
10	23040	35.200	54.010	0.652	1244.390	811.008	433.382
11	23040	42.950	65.560	0.655	1510.502	989.568	520.934
12	23040	37.840	64.240	0.589	1480.090	871.834	608.256
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							3621.658
ปริมาณหินดินดาน D (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)							3.622

ตารางที่ ง-28 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	36.75	90.667	0.405	456.962	185.220	271.742
2	5040	74	94	0.787	473.760	372.960	100.800
3	5040	81	135	0.600	680.400	408.240	272.160
4	5040	84.75	112.667	0.752	567.842	427.140	140.702
5	5040	83.26	100.498	0.828	506.510	419.630	86.880
6	5040	91.838	109.567	0.838	552.218	462.864	89.354
7	5040	87.672	101.724	0.862	512.689	441.867	70.822
8	5040	93.636	108.75	0.861	548.100	471.925	76.175
9	5040	115.531	130.482	0.885	657.629	582.276	75.353
10	5040	99.273	107.606	0.923	542.334	500.336	41.998
11	5040	94.616	100.498	0.941	506.510	476.865	29.645
12	5040	96.658	101.479	0.952	511.454	487.156	24.298
13	5040	96.904	100.825	0.961	508.158	488.396	19.762
14	5040	97.721	101.724	0.961	512.689	492.514	20.175
15	5040	99.273	102.296	0.970	515.572	500.336	15.236
					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		1335.101
					ปริมาณหินดินดาน E (g)		1000.000
					ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)		1.335

ตารางที่ ง-29 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	38.152	60.429	0.631	696.142	439.511	256.631
2	11520	44.835	57.706	0.777	664.773	516.499	148.274
3	11520	44.257	52.426	0.844	603.948	509.841	94.107
4	11520	49.290	54.901	0.898	632.460	567.821	64.639
5	11520	52.673	59.109	0.891	680.936	606.793	74.143
6	11520	63.234	69.422	0.911	799.741	728.456	71.286
7	11520	49.125	54.158	0.907	623.900	565.920	57.980
8	11520	50.611	56.386	0.898	649.567	583.039	66.528
9	11520	53.498	58.614	0.913	675.233	616.297	58.936
10	11520	56.469	60.347	0.936	695.197	650.523	44.675
11	11520	57.789	62.079	0.931	715.150	665.729	49.421
12	11520	59.521	64.059	0.929	737.960	685.682	52.278
13	11520	61.089	65.545	0.932	755.078	703.745	51.333
14	11520	61.254	67.277	0.910	775.031	705.646	69.385
15	11520	61.337	67.525	0.908	777.888	706.602	71.286
16	11520	61.914	68.762	0.900	792.138	713.249	78.889
17	11520	63.647	70.000	0.909	806.400	733.213	73.187
18	11520	56.799	57.624	0.986	663.828	654.324	9.504
19	11520	56.386	58.284	0.967	671.432	649.567	21.865
20	11520	68.597	71.733	0.956	826.364	790.237	36.127
21	11520	73.053	76.188	0.959	877.686	841.571	36.115
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							1486.587
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							1.487

ตารางที่ ง-30 ผลการคำนวณปริมาณฟอสเฟต เข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณฟอสเฟตที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	21.17	55.080	0.384	1269.043	487.757	781.286
2	23040	40.31	67.130	0.600	1546.675	928.742	617.933
3	23040	50.13	68.450	0.732	1577.088	1154.995	422.093
4	23040	50.3	66.470	0.757	1531.469	1158.912	372.557
5	23040	40.31	52.690	0.765	1213.978	928.742	285.235
6	23040	38.25	64.320	0.595	1481.933	881.280	600.653
7	23040	35.61	65.150	0.547	1501.056	820.454	680.602
8	23040	18.28	64.160	0.285	1478.246	421.171	1057.075
9	23040	20.51	61.600	0.333	1419.264	472.550	946.714
10	23040	8.05	54.010	0.149	1244.390	185.472	1058.918
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							6823.066
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							6.823

ตารางที่ ง-31 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	29.120	34.160	0.852	172.166	146.765	25.402
2	5040	37.520	38.080	0.985	191.923	189.101	2.822
3	5040	33.600	34.160	0.984	172.166	169.344	2.822
4	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
5	5040	33.600	33.600	1.000	169.344	169.344	0.000
6	5040	32.480	32.480	1.000	163.699	163.699	0.000
7	5040	34.720	34.720	1.000	174.989	174.989	0.000
8	5040	36.400	36.400	1.000	183.456	183.456	0.000
9	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
10	5040	35.840	35.840	1.000	180.634	180.634	0.000
11	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
12	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
13	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
14	5040	38.640	38.640	1.000	194.746	194.746	0.000
15	5040	39.200	39.760	0.986	200.390	197.568	2.822
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		36.691
					ปริมาณกรวด (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณกรวด (mg/g)		0.037

ตารางที่ ง-32 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	26.880	32.480	0.828	374.170	309.658	64.512
2	11520	29.680	31.920	0.930	367.718	341.914	25.805
3	11520	31.360	33.600	0.933	387.072	361.267	25.805
4	11520	34.720	34.720	1.000	399.974	399.974	0.000
5	11520	35.840	35.840	1.000	412.877	412.877	0.000
6	11520	35.840	37.520	0.955	432.230	412.877	19.354
7	11520	34.720	38.640	0.899	445.133	399.974	45.158
8	11520	36.960	38.640	0.957	445.133	425.779	19.354
9	11520	38.640	38.640	1.000	445.133	445.133	0.000
10	11520	32.480	34.720	0.935	399.974	374.170	25.805
11	11520	38.080	38.080	1.000	438.682	438.682	0.000
12	11520	34.720	35.280	0.984	406.426	399.974	6.451
13	11520	35.840	38.640	0.928	445.133	412.877	32.256
14	11520	29.120	30.800	0.945	354.816	335.462	19.354
15	11520	30.240	31.360	0.964	361.267	348.365	12.902
16	11520	31.360	31.920	0.982	367.718	361.267	6.451
17	11520	30.240	30.800	0.982	354.816	348.365	6.451
18	11520	28.000	33.600	0.833	387.072	322.560	64.512
19	11520	30.240	31.360	0.964	361.267	348.365	12.902
20	11520	30.240	30.240	1.000	348.365	348.365	0.000
21	11520	35.840	35.840	1.000	412.877	412.877	0.000
ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							387.072
ปริมาณกรวด (g)							1000.000
ปริมาณฟอสเฟต/ปริมาณกรวด (mg/g)							0.387

ตารางที่ ง-33 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางกรวด RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	25.760	29.120	0.885	670.925	593.510	77.414
2	23040	28.560	30.240	0.944	696.730	658.022	38.707
3	23040	29.120	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
4	23040	28.560	29.120	0.981	670.925	658.022	12.902
5	23040	29.120	30.240	0.963	696.730	670.925	25.805
6	23040	29.120	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
7	23040	29.680	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
8	23040	28.560	29.120	0.981	670.925	658.022	12.902
9	23040	29.120	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
10	23040	26.880	30.240	0.889	696.730	619.315	77.414
11	23040	29.120	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
12	23040	29.680	29.680	1.000	683.827	683.827	0.000
13	23040	30.240	30.240	1.000	696.730	696.730	0.000
14	23040	29.120	29.120	1.000	670.925	670.925	0.000
15	23040	29.680	29.680	1.000	683.827	683.827	0.000
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		309.658
					ปริมาณกรวด (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณกรวด (mg/g)		0.310

ตารางที่ ง-34 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	21.280	34.160	0.623	172.166	107.251	64.915
2	5040	37.520	38.080	0.985	191.923	189.101	2.822
3	5040	33.600	34.160	0.984	172.166	169.344	2.822
4	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
5	5040	33.040	33.600	0.983	169.344	166.522	2.822
6	5040	32.480	32.480	1.000	163.699	163.699	0.000
7	5040	34.720	34.720	1.000	174.989	174.989	0.000
8	5040	35.840	36.400	0.985	183.456	180.634	2.822
9	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
10	5040	35.840	35.840	1.000	180.634	180.634	0.000
11	5040	36.960	37.520	0.985	189.101	186.278	2.822
12	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
13	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
14	5040	38.640	38.640	1.000	194.746	194.746	0.000
15	5040	39.760	39.760	1.000	200.390	200.390	0.000
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		81.850
					ปริมาณทราย (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณทราย (mg/g)		0.082

ตารางที่ ง-35 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกจากระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	19.600	32.480	0.603	374.170	225.792	148.378
2	11520	26.880	31.920	0.842	367.718	309.658	58.061
3	11520	31.360	33.600	0.933	387.072	361.267	25.805
4	11520	34.720	34.720	1.000	399.974	399.974	0.000
5	11520	35.840	35.840	1.000	412.877	412.877	0.000
6	11520	36.960	37.520	0.985	432.230	425.779	6.451
7	11520	35.840	38.640	0.928	445.133	412.877	32.256
8	11520	38.080	38.640	0.986	445.133	438.682	6.451
9	11520	38.640	38.640	1.000	445.133	445.133	0.000
10	11520	31.360	34.720	0.903	399.974	361.267	38.707
11	11520	37.520	38.080	0.985	438.682	432.230	6.451
12	11520	34.720	35.280	0.984	406.426	399.974	6.451
13	11520	38.640	38.640	1.000	445.133	445.133	0.000
14	11520	28.000	30.800	0.909	354.816	322.560	32.256
15	11520	28.560	31.360	0.911	361.267	329.011	32.256
16	11520	28.560	31.920	0.895	367.718	329.011	38.707
17	11520	29.120	30.800	0.945	354.816	335.462	19.354
18	11520	19.040	33.600	0.567	387.072	219.341	167.731
19	11520	19.040	31.360	0.607	361.267	219.341	141.926
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							761.242
ปริมาณทราย (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณทราย (mg/g)							0.761

ตารางที่ ง-36 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางทราย RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกจากระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	14.56	29.120	0.500	670.925	335.462	335.462
2	23040	30.24	30.240	1.000	696.730	696.730	0.000
3	23040	19.04	29.680	0.642	683.827	438.682	245.146
4	23040	24.08	29.120	0.827	670.925	554.803	116.122
5	23040	20.72	30.240	0.685	696.730	477.389	219.341
6	23040		29.680	0.000	683.827		
7	23040	19.6	30.240	0.648	696.730	451.584	245.146
8	23040	19.6	29.120	0.673	670.925	451.584	219.341
9	23040	20.72	29.680	0.698	683.827	477.389	206.438
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							1586.995
ปริมาณทราย (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณทราย (mg/g)							1.587

ตารางที่ ง-37 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	18.480	34.160	0.541	172.166	93.139	79.027
2	5040	36.960	38.080	0.971	191.923	186.278	5.645
3	5040	33.600	34.160	0.984	172.166	169.344	2.822
4	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
5	5040	33.040	33.600	0.983	169.344	166.522	2.822
6	5040	31.920	32.480	0.983	163.699	160.877	2.822
7	5040	34.720	34.720	1.000	174.989	174.989	0.000
8	5040	35.840	36.400	0.985	183.456	180.634	2.822
9	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
10	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
11	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
12	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
13	5040	36.960	37.520	0.985	189.101	186.278	2.822
14	5040	38.080	38.640	0.986	194.746	191.923	2.822
15	5040	39.760	39.760	1.000	200.390	200.390	0.000
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		107.251
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		0.107

ตารางที่ ง-38 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	20.160	32.480	0.621	374.170	232.243	141.926
2	11520	25.760	31.920	0.807	367.718	296.755	70.963
3	11520	29.120	33.600	0.867	387.072	335.462	51.610
4	11520	31.360	34.720	0.903	399.974	361.267	38.707
5	11520	32.480	35.840	0.906	412.877	374.170	38.707
6	11520	36.400	37.520	0.970	432.230	419.328	12.902
7	11520	35.280	38.640	0.913	445.133	406.426	38.707
8	11520	37.520	38.640	0.971	445.133	432.230	12.902
9	11520	37.520	38.640	0.971	445.133	432.230	12.902
10	11520	33.040	34.720	0.952	399.974	380.621	19.354
11	11520	36.960	38.080	0.971	438.682	425.779	12.902
12	11520	35.280	35.280	1.000	406.426	406.426	0.000
13	11520	38.640	38.640	1.000	445.133	445.133	0.000
14	11520	30.240	30.800	0.982	354.816	348.365	6.451
15	11520	30.800	31.360	0.982	361.267	354.816	6.451
16	11520	31.360	31.920	0.982	367.718	361.267	6.451
17	11520	30.800	30.800	1.000	354.816	354.816	0.000
18	11520	33.600	33.600	1.000	387.072	387.072	0.000
19	11520	31.360	31.360	1.000	361.267	361.267	0.000
20	11520	30.240	30.240	1.000	348.365	348.365	0.000
21	11520	35.280	35.840	0.984	412.877	406.426	6.451
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							477.389
ปริมาณหินดินดาน C (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)							0.477

ตารางที่ ง-39 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน C RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	19.600	29.120	0.673	670.925	451.584	219.341
2	23040	29.120	30.240	0.963	696.730	670.925	25.805
3	23040	28.560	29.680	0.962	683.827	658.022	25.805
4	23040	29.120	29.120	1.000	670.925	670.925	0.000
5	23040	29.120	30.240	0.963	696.730	670.925	25.805
6	23040	29.680	29.680	1.000	683.827	683.827	0.000
7	23040	30.240	30.240	1.000	696.730	696.730	0.000
8	23040	28.560	29.120	0.981	670.925	658.022	12.902
9	23040	28.560	29.680	0.962	683.827	658.022	25.805
10	23040	28.000	30.240	0.926	696.730	645.120	51.610
11	23040	29.120	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
12	23040	29.680	29.680	1.000	683.827	683.827	0.000
13	23040	29.680	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
14	23040	29.120	29.120	1.000	670.925	670.925	0.000
15	23040	29.680	29.680	1.000	683.827	683.827	0.000
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		412.877
					ปริมาณหินดินดาน C (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน C (mg/g)		0.413

ตารางที่ ง-40 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	10.080	34.160	0.295	172.166	50.803	121.363
2	5040	32.480	38.080	0.853	191.923	163.699	28.224
3	5040	33.040	34.160	0.967	172.166	166.522	5.645
4	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
5	5040	33.040	33.600	0.983	169.344	166.522	2.822
6	5040	31.920	32.480	0.983	163.699	160.877	2.822
7	5040	34.160	34.720	0.984	174.989	172.166	2.822
8	5040	36.400	36.400	1.000	183.456	183.456	0.000
9	5040	34.720	35.280	0.984	177.811	174.989	2.822
10	5040	35.840	35.840	1.000	180.634	180.634	0.000
11	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
12	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
13	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
14	5040	38.080	38.640	0.986	194.746	191.923	2.822
15	5040	39.200	39.760	0.986	200.390	197.568	2.822
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							174.989
ปริมาณหินดินดาน D (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)							0.175

ตารางที่ ง-41 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	15.120	32.480	0.466	374.170	174.182	199.987
2	11520	25.200	31.920	0.789	367.718	290.304	77.414
3	11520	29.680	33.600	0.883	387.072	341.914	45.158
4	11520	32.480	34.720	0.935	399.974	374.170	25.805
5	11520	33.600	35.840	0.938	412.877	387.072	25.805
6	11520	36.400	37.520	0.970	432.230	419.328	12.902
7	11520	33.600	38.640	0.870	445.133	387.072	58.061
8	11520	35.840	38.640	0.928	445.133	412.877	32.256
9	11520	38.640	38.640	1.000	445.133	445.133	0.000
10	11520	33.040	34.720	0.952	399.974	380.621	19.354
11	11520	36.960	38.080	0.971	438.682	425.779	12.902
12	11520	35.280	35.280	1.000	406.426	406.426	0.000
13	11520	37.520	38.640	0.971	445.133	432.230	12.902
14	11520	30.240	30.800	0.982	354.816	348.365	6.451
15	11520	30.800	31.360	0.982	361.267	354.816	6.451
16	11520	31.360	31.920	0.982	367.718	361.267	6.451
17	11520	30.240	30.800	0.982	354.816	348.365	6.451
18	11520	29.120	33.600	0.867	387.072	335.462	51.610
19	11520	31.360	31.360	1.000	361.267	361.267	0.000
20	11520	30.240	30.240	1.000	348.365	348.365	0.000
21	11520	34.160	35.840	0.953	412.877	393.523	19.354
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							619.315
ปริมาณหินดินดาน D (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)							0.619

ตารางที่ ง-42 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน D RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกจากระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	20.72	29.120	0.712	670.925	477.389	193.536
2	23040	30.24	30.240	1.000	696.730	696.730	0.000
3	23040	29.12	29.680	0.981	683.827	670.925	12.902
4	23040	29.12	29.120	1.000	670.925	670.925	0.000
5	23040	29.68	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
6	23040	28	29.680	0.943	683.827	645.120	38.707
7	23040	29.68	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
8	23040	29.12	29.120	1.000	670.925	670.925	0.000
9	23040	27.44	29.680	0.925	683.827	632.218	51.610
10	23040	29.12	30.240	0.963	696.730	670.925	25.805
11	23040	24.64	29.680	0.830	683.827	567.706	116.122
12	23040	21.28	29.680	0.717	683.827	490.291	193.536
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							658.022
ปริมาณหินดินดาน D (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน D (mg/g)							0.658

ตารางที่ ง-43 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN I

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	5040	6.160	34.160	0.180	172.166	31.046	141.120
2	5040	30.800	38.080	0.809	191.923	155.232	36.691
3	5040	32.480	34.160	0.951	172.166	163.699	8.467
4	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
5	5040	33.040	33.600	0.983	169.344	166.522	2.822
6	5040	31.920	32.480	0.983	163.699	160.877	2.822
7	5040	34.160	34.720	0.984	174.989	172.166	2.822
8	5040	36.400	36.400	1.000	183.456	183.456	0.000
9	5040	33.040	35.280	0.937	177.811	166.522	11.290
10	5040	35.280	35.840	0.984	180.634	177.811	2.822
11	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
12	5040	35.280	35.280	1.000	177.811	177.811	0.000
13	5040	37.520	37.520	1.000	189.101	189.101	0.000
14	5040	38.080	38.640	0.986	194.746	191.923	2.822
15	5040	39.760	39.760	1.000	200.390	200.390	0.000
					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)		214.502
					ปริมาณหินดินดาน E (g)		1000.000
					ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)		0.215

ตารางที่ ง-44 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN II

Time (day)	ปริมาณน้ำ(ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	11520	19.600	32.480	0.603	374.170	225.792	148.378
2	11520	28.560	31.920	0.895	367.718	329.011	38.707
3	11520	30.240	33.600	0.900	387.072	348.365	38.707
4	11520	32.480	34.720	0.935	399.974	374.170	25.805
5	11520	34.720	35.840	0.969	412.877	399.974	12.902
6	11520	33.040	37.520	0.881	432.230	380.621	51.610
7	11520	33.600	38.640	0.870	445.133	387.072	58.061
8	11520	35.840	38.640	0.928	445.133	412.877	32.256
9	11520	38.080	38.640	0.986	445.133	438.682	6.451
10	11520	34.160	34.720	0.984	399.974	393.523	6.451
11	11520	36.960	38.080	0.971	438.682	425.779	12.902
12	11520	34.160	35.280	0.968	406.426	393.523	12.902
13	11520	36.400	38.640	0.942	445.133	419.328	25.805
14	11520	30.240	30.800	0.982	354.816	348.365	6.451
15	11520	30.240	31.360	0.964	361.267	348.365	12.902
16	11520	30.800	31.920	0.965	367.718	354.816	12.902
17	11520	24.640	30.800	0.800	354.816	283.853	70.963
18	11520	30.240	33.600	0.900	387.072	348.365	38.707
19	11520	31.360	31.360	1.000	361.267	361.267	0.000
20	11520	30.240	30.240	1.000	348.365	348.365	0.000
21	11520	35.840	35.840	1.000	412.877	412.877	0.000
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							612.864
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							0.613

ตารางที่ ง-45 ผลการคำนวณปริมาณแอมโมเนียเข้า-ออก ของชุดจำลองคอลัมน์บรรจุตัวกลางหินดินดาน E RUN III

Time (day)	ปริมาณน้ำ (ml)	Ce	Co	Ce/Co	ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่ออกจากระบบ (mg)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)
1	23040	19.6	29.120	0.673	670.925	451.584	219.341
2	23040	29.68	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
3	23040	28	29.680	0.943	683.827	645.120	38.707
4	23040	28	29.120	0.962	670.925	645.120	25.805
5	23040	29.68	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
6	23040	28.56	29.680	0.962	683.827	658.022	25.805
7	23040	29.68	30.240	0.981	696.730	683.827	12.902
8	23040	28.56	29.120	0.981	670.925	658.022	12.902
9	23040	22.4	29.680	0.755	683.827	516.096	167.731
10	23040	22.96	30.240	0.759	696.730	528.998	167.731
ปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในระบบรวม (mg)							696.730
ปริมาณหินดินดาน E (g)							1000.000
ปริมาณแอมโมเนีย/ปริมาณหินดินดาน E (mg/g)							0.697

ตารางที่ จ-1 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนีย RUN I ที่ HLR = 2.632 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	25.402	64.915	79.027	121.363	141.120	25.402	64.915	79.027	121.363	141.120	0.025	0.065	0.079	0.121	0.141
2	2.822	2.822	5.645	28.224	36.691	28.224	67.738	84.672	149.587	177.811	0.028	0.068	0.085	0.150	0.178
3	2.822	2.822	2.822	5.645	8.467	31.046	70.560	87.494	155.232	186.278	0.031	0.071	0.087	0.155	0.186
4	2.822	2.822	2.822	2.822	2.822	33.869	73.382	90.317	158.054	189.101	0.034	0.073	0.090	0.158	0.189
5	0.000	2.822	2.822	2.822	2.822	33.869	76.205	93.139	160.877	191.923	0.034	0.076	0.093	0.161	0.192
6	0.000	0.000	2.822	2.822	2.822	33.869	76.205	95.962	163.699	194.746	0.034	0.076	0.096	0.164	0.195
7	0.000	0.000	0.000	2.822	2.822	33.869	76.205	95.962	166.522	197.568	0.034	0.076	0.096	0.167	0.198
8	0.000	2.822	2.822	0.000	0.000	33.869	79.027	98.784	166.522	197.568	0.034	0.079	0.099	0.167	0.198
9	0.000	0.000	0.000	2.822	11.290	33.869	79.027	98.784	169.344	208.858	0.034	0.079	0.099	0.169	0.209
10	0.000	0.000	2.822	0.000	2.822	33.869	79.027	101.606	169.344	211.680	0.034	0.079	0.102	0.169	0.212
11	0.000	2.822	0.000	0.000	0.000	33.869	81.850	101.606	169.344	211.680	0.034	0.082	0.102	0.169	0.212
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	33.869	81.850	101.606	169.344	211.680	0.034	0.082	0.102	0.169	0.212
13	0.000	0.000	2.822	0.000	0.000	33.869	81.850	104.429	169.344	211.680	0.034	0.082	0.104	0.169	0.212
14	0.000	0.000	2.822	2.822	2.822	33.869	81.850	107.251	172.166	214.502	0.034	0.082	0.107	0.172	0.215
15	2.822	0.000	0.000	2.822	0.000	36.691	81.850	107.251	174.989	214.502	0.037	0.082	0.107	0.175	0.215

ตารางที่ จ-2 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนีย RUN II ที่ HLR = 6.316 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	64.512	148.378	141.926	199.987	148.378	64.512	148.378	141.926	199.987	148.378	0.065	0.148	0.142	0.200	0.148
2	25.805	58.061	70.963	77.414	38.707	90.317	206.438	212.890	277.402	187.085	0.090	0.206	0.213	0.277	0.187
3	25.805	25.805	51.610	45.158	38.707	116.122	232.243	264.499	322.560	225.792	0.116	0.232	0.264	0.323	0.226
4	0.000	0.000	38.707	25.805	25.805	116.122	232.243	303.206	348.365	251.597	0.116	0.232	0.303	0.348	0.252
5	0.000	0.000	38.707	25.805	12.902	116.122	232.243	341.914	374.170	264.499	0.116	0.232	0.342	0.374	0.264
6	19.354	6.451	12.902	12.902	51.610	135.475	238.694	354.816	387.072	316.109	0.135	0.239	0.355	0.387	0.316
7	45.158	32.256	38.707	58.061	58.061	180.634	270.950	393.523	445.133	374.170	0.181	0.271	0.394	0.445	0.374
8	19.354	6.451	12.902	32.256	32.256	199.987	277.402	406.426	477.389	406.426	0.200	0.277	0.406	0.477	0.406
9	0.000	0.000	12.902	0.000	6.451	199.987	277.402	419.328	477.389	412.877	0.200	0.277	0.419	0.477	0.413
10	25.805	38.707	19.354	19.354	6.451	225.792	316.109	438.682	496.742	419.328	0.226	0.316	0.439	0.497	0.419
11	0.000	6.451	12.902	12.902	12.902	225.792	322.560	451.584	509.645	432.230	0.226	0.323	0.452	0.510	0.432
12	6.451	6.451	0.000	0.000	12.902	232.243	329.011	451.584	509.645	445.133	0.232	0.329	0.452	0.510	0.445
13	32.256	0.000	0.000	12.902	25.805	264.499	329.011	451.584	522.547	470.938	0.264	0.329	0.452	0.523	0.471
14	19.354	32.256	6.451	6.451	6.451	283.853	361.267	458.035	528.998	477.389	0.284	0.361	0.458	0.529	0.477
15	12.902	32.256	6.451	6.451	12.902	296.755	393.523	464.486	535.450	490.291	0.297	0.394	0.464	0.535	0.490
16	6.451	38.707	6.451	6.451	12.902	303.206	432.230	470.938	541.901	503.194	0.303	0.432	0.471	0.542	0.503
17	6.451	19.354	0.000	6.451	70.963	309.658	451.584	470.938	548.352	574.157	0.310	0.452	0.471	0.548	0.574
18	64.512	167.731	0.000	51.610	38.707	374.170	619.315	470.938	599.962	612.864	0.374	0.619	0.471	0.600	0.613
19	12.902	141.926	0.000	0.000	0.000	387.072	761.242	470.938	599.962	612.864	0.387	0.761	0.471	0.600	0.613
20	0.000		0.000	0.000	0.000	387.072	761.242	470.938	599.962	612.864	0.387	0.761	0.471	0.600	0.613
21	0.000		6.451	19.354	0.000	387.072	761.242	477.389	619.315	612.864	0.387	0.761	0.477	0.619	0.613

Time (day)	ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณแอมโมเนียที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	77.414	335.462	219.341	193.536	219.341	77.414	335.462	219.341	193.536	219.341	0.077	0.335	0.219	0.194	0.219
2	38.707	0.000	25.805	0.000	12.902	116.122	335.462	245.146	193.536	232.243	0.116	0.335	0.245	0.194	0.232
3	12.902	245.146	25.805	12.902	38.707	129.024	580.608	270.950	206.438	270.950	0.129	0.581	0.271	0.206	0.271
4	12.902	116.122	0.000	0.000	25.805	141.926	696.730	270.950	206.438	296.755	0.142	0.697	0.271	0.206	0.297
5	25.805	219.341	25.805	12.902	12.902	167.731	916.070	296.755	219.341	309.658	0.168	0.916	0.297	0.219	0.310
6	12.902	0.000	0.000	38.707	25.805	180.634	916.070	296.755	258.048	335.462	0.181	0.916	0.297	0.258	0.335
7	12.902	245.146	0.000	12.902	12.902	193.536	1161.216	296.755	270.950	348.365	0.194	1.161	0.297	0.271	0.348
8	12.902	219.341	12.902	0.000	12.902	206.438	1380.557	309.658	270.950	361.267	0.206	1.381	0.310	0.271	0.361
9	12.902	206.438	25.805	51.610	167.731	219.341	1586.995	335.462	322.560	528.998	0.219	1.587	0.335	0.323	0.529
10	77.414		51.610	25.805	167.731	296.755	1586.995	387.072	348.365	696.730	0.297	1.587	0.387	0.348	0.697
11	12.902		12.902	116.122		309.658	1586.995	399.974	464.486	696.730	0.310	1.587	0.400	0.464	0.697
12	0.000		0.000	193.536		309.658	1586.995	399.974	658.022	696.730	0.310	1.587	0.400	0.658	0.697
13	0.000		12.902			309.658	1586.995	412.877	658.022	696.730	0.310	1.587	0.413	0.658	0.697
14	0.000		0.000			309.658	1586.995	412.877	658.022	696.730	0.310	1.587	0.413	0.658	0.697
15	0.000		0.000			309.658	1586.995	412.877	658.022	696.730	0.310	1.587	0.413	0.658	0.697

ตารางที่ จ-4 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต RUN I ที่ HLR = 2.613 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	64.683	141.120	112.563	228.902	271.742	64.683	141.120	112.563	228.902	271.742	0.065	0.141	0.113	0.229	0.272
2	78.120	22.680	65.520	96.178	100.800	142.803	163.800	178.083	325.080	372.542	0.143	0.164	0.178	0.325	0.373
3	149.940	231.840	200.340	208.742	272.160	292.743	395.640	378.423	533.822	644.702	0.293	0.396	0.378	0.534	0.645
4	101.642	19.742	94.082	92.822	140.702	394.385	415.382	472.505	626.643	785.403	0.394	0.415	0.473	0.627	0.785
5	1.643	21.410	25.114	88.114	86.880	396.028	436.792	497.619	714.758	872.283	0.396	0.437	0.498	0.715	0.872
6	0.413	39.942	27.589	55.178	89.354	396.441	476.734	525.208	769.936	961.637	0.396	0.477	0.525	0.770	0.962
7	0.413	2.883	0.413	37.472	70.822	396.855	479.616	525.622	807.408	1032.459	0.397	0.480	0.526	0.807	1.032
8	23.471	4.531	37.059	31.293	76.175	420.326	484.147	562.681	838.701	1108.634	0.420	0.484	0.563	0.839	1.109
9	20.588	2.883	15.236	45.294	75.353	440.914	487.030	577.917	883.996	1183.987	0.441	0.487	0.578	0.884	1.184
10	11.526	12.353	11.118	17.706	41.998	452.441	499.383	589.035	901.701	1225.985	0.452	0.499	0.589	0.902	1.226
11	4.526	5.352	7.822	11.526	29.645	456.967	504.736	596.857	913.228	1255.630	0.457	0.505	0.597	0.913	1.256
12	0.827	0.827	8.649	11.532	24.298	457.793	505.562	605.506	924.759	1279.928	0.458	0.506	0.606	0.925	1.280
13	0.413	0.413	4.939	7.822	19.762	458.207	505.976	610.445	932.581	1299.690	0.458	0.506	0.610	0.933	1.300
14	4.531	6.587	5.352	9.470	20.175	462.738	512.563	615.797	942.052	1319.865	0.463	0.513	0.616	0.942	1.320
15	0.413	0.413	2.470	8.649	15.236	463.151	512.976	618.267	950.700	1335.101	0.463	0.513	0.618	0.951	1.335

ตารางที่ จ-5 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต RUN II ที่ HLR = 6.316 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	74.143	117.861	135.003	252.829	256.631	74.143	117.861	135.003	252.829	256.631	0.074	0.118	0.135	0.253	0.257
2	32.314	50.377	94.994	211.012	148.274	106.456	168.238	229.997	463.841	404.905	0.106	0.168	0.230	0.464	0.405
3	22.810	39.928	51.333	95.052	94.107	129.266	208.166	281.330	558.893	499.012	0.129	0.208	0.281	0.559	0.499
4	15.206	61.782	22.821	74.143	64.639	144.472	269.948	304.151	633.036	563.651	0.144	0.270	0.304	0.633	0.564
5	31.369	78.889	11.393	122.619	74.143	175.841	348.837	315.544	755.654	637.793	0.176	0.349	0.316	0.756	0.638
6	8.548	33.258	16.151	112.159	71.286	184.389	382.095	331.695	867.813	709.079	0.184	0.382	0.332	0.868	0.709
7	2.845	14.250	48.476	80.790	57.980	187.235	396.346	380.172	948.603	767.059	0.187	0.396	0.380	0.949	0.767
8	2.845	14.250	37.048	75.087	66.528	190.080	410.596	417.220	1023.690	833.587	0.190	0.411	0.417	1.024	0.834
9	17.107	19.008	25.620	39.917	58.936	207.187	429.604	442.840	1063.607	892.524	0.207	0.430	0.443	1.064	0.893
10	11.416	13.317	22.775	31.369	44.675	218.604	442.921	465.615	1094.976	937.198	0.219	0.443	0.466	1.095	0.937
11	8.548	18.052	22.798	72.230	49.421	227.151	460.973	488.413	1167.206	986.619	0.227	0.461	0.488	1.167	0.987
12	12.349	13.306	28.558	36.115	52.278	239.501	474.278	516.972	1203.322	1038.897	0.240	0.474	0.517	1.203	1.039
13	9.516	15.218	25.632	50.377	51.333	249.016	489.496	542.604	1253.699	1090.230	0.249	0.489	0.543	1.254	1.090
14	7.603	3.802	22.775	56.079	69.385	256.620	493.298	565.379	1309.778	1159.615	0.257	0.493	0.565	1.310	1.160
15	11.405	8.559	17.107	43.730	71.286	268.024	501.857	582.486	1353.508	1230.900	0.268	0.502	0.582	1.354	1.231
16	7.603	39.917	5.668	0.945	78.889	275.628	541.774	588.154	1354.452	1309.789	0.276	0.542	0.588	1.354	1.310
17	17.107	65.583	14.285	12.361	73.187	292.735	607.357	602.438	1366.813	1382.976	0.293	0.607	0.602	1.367	1.383
18	11.405	11.405	5.691	27.567	9.504	304.140	618.762	608.129	1394.381	1392.480	0.304	0.619	0.608	1.394	1.392
19	7.603	104.556	4.769	27.567	21.865	311.743	723.318	612.899	1421.948	1414.345	0.312	0.723	0.613	1.422	1.414
20	9.504		11.439	6.659	36.127	321.247	723.318	624.338	1428.607	1450.472	0.321	0.723	0.624	1.429	1.450
21	11.405		11.382	7.603	36.115	332.652	723.318	635.720	1436.210	1486.587	0.333	0.723	0.636	1.436	1.487

ตารางที่ จ-6 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต RUN III ที่ HLR = 12.105 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	246.989	418.176	364.954	401.126	781.286	246.989	418.176	364.954	401.126	781.286	0.247	0.418	0.365	0.401	0.781
2	235.699	414.490	460.109	313.805	617.933	482.688	832.666	825.062	714.931	1399.219	0.483	0.833	0.825	0.715	1.399
3	258.509	363.110	319.334	271.872	422.093	741.197	1195.776	1144.397	986.803	1821.312	0.741	1.196	1.144	0.987	1.821
4	1.843	182.477	13.363	114.048	372.557	743.040	1378.253	1157.760	1100.851	2193.869	0.743	1.378	1.158	1.101	2.194
5	11.520	391.680	7.603	26.726	285.235	754.560	1769.933	1165.363	1127.578	2479.104	0.755	1.770	1.165	1.128	2.479
6	3.686	0.000	146.304	169.114	600.653	758.246	1769.933	1311.667	1296.691	3079.757	0.758	1.770	1.312	1.297	3.080
7	11.520	1408.666	28.570	79.949	680.602	769.766	3178.598	1340.237	1376.640	3760.358	0.770	3.179	1.340	1.377	3.760
8	62.669	1153.843	211.046	250.906	1057.075	832.435	4332.442	1551.283	1627.546	4817.434	0.832	4.332	1.551	1.628	4.817
9	11.290	971.366	229.939	431.539	946.714	843.725	5303.808	1781.222	2059.085	5764.147	0.844	5.304	1.781	2.059	5.764
10	342.144		125.568	433.382	1058.918	1185.869	5303.808	1906.790	2492.467	6823.066	1.186	5.304	1.907	2.492	6.823
11	24.653		26.496	520.934		1210.522	5303.808	1933.286	3013.402	6823.066	1.211	5.304	1.933	3.013	6.823
12	24.653		17.050	608.256		1235.174	5303.808	1950.336	3621.658	6823.066	1.235	5.304	1.950	3.622	6.823
13	15.206		15.206			1250.381	5303.808	1965.542	3621.658	6823.066	1.250	5.304	1.966	3.622	6.823
14	7.603		26.496			1257.984	5303.808	1992.038	3621.658	6823.066	1.258	5.304	1.992	3.622	6.823
15	5.530		17.050			1263.514	5303.808	2009.088	3621.658	6823.066	1.264	5.304	2.009	3.622	6.823

ตารางที่ จ-7 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับซีโอติ RUN I ที่ HLR = 2.613 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณซีโอติที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณซีโอติที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	240.307	321.754	412.070	519.322	548.352	240.307	321.754	412.070	519.322	548.352	0.240	0.322	0.412	0.519	0.548
2	484.546	564.530	562.615	676.922	407.383	724.853	886.284	974.686	1196.244	955.735	0.725	0.886	0.975	1.196	0.956
3	95.306	205.128	410.206	461.009	412.121	820.159	1091.412	1384.891	1657.253	1367.856	0.820	1.091	1.385	1.657	1.368
4	366.962	446.897	378.252	448.812	451.634	1187.122	1538.309	1763.143	2106.065	1819.490	1.187	1.538	1.763	2.106	1.819
5	503.093	591.394	343.526	527.335	549.461	1690.214	2129.702	2106.670	2633.400	2368.951	1.690	2.130	2.107	2.633	2.369
6	542.909	675.965	542.909	742.493	875.599	2233.123	2805.667	2649.578	3375.893	3244.550	2.233	2.806	2.650	3.376	3.245
7	236.527	344.030	129.024	236.527	397.807	2469.650	3149.698	2778.602	3612.420	3642.358	2.470	3.150	2.779	3.612	3.642
8	102.110	451.584	263.390	344.030	532.224	2571.761	3601.282	3041.993	3956.450	4174.582	2.572	3.601	3.042	3.956	4.175
9	397.807	639.727	344.081	532.224	693.504	2969.568	4241.009	3386.074	4488.674	4868.086	2.970	4.241	3.386	4.489	4.868
10	813.053	1212.221	879.581	1145.693	746.525	3782.621	5453.230	4265.654	5634.367	5614.610	3.783	5.453	4.266	5.634	5.615
11	133.056	532.274	133.056	266.112	399.168	3915.677	5985.504	4398.710	5900.479	6013.778	3.916	5.986	4.399	5.900	6.014
12	66.578	465.746	66.578	332.690	399.218	3982.255	6451.250	4465.289	6233.170	6412.997	3.982	6.451	4.465	6.233	6.413
13	295.646	645.120	349.423	376.286	510.703	4277.902	7096.370	4814.712	6609.456	6923.700	4.278	7.096	4.815	6.609	6.924
14	188.194	672.034	268.834	295.697	322.560	4466.095	7768.404	5083.546	6905.153	7246.260	4.466	7.768	5.084	6.905	7.246
15	53.777	671.983	134.417	241.920	430.063	4519.872	8440.387	5217.962	7147.073	7676.323	4.520	8.440	5.218	7.147	7.676

ตารางที่ จ-8 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับซีโอดี RUN II ที่ HLR = 6.316 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	1024.013	1433.664	1945.613	2150.438	2560.090	1024.013	1433.664	1945.613	2150.438	2560.090	1.024	1.434	1.946	2.150	2.560
2	2150.438	2252.851	2355.264	2764.800	1638.490	3174.451	3686.515	4300.877	4915.238	4198.579	3.174	3.687	4.301	4.915	4.199
3	307.123	614.362	1331.136	1433.549	1228.723	3481.574	4300.877	5632.013	6348.787	5427.302	3.482	4.301	5.632	6.349	5.427
4	1280.102	1564.531	1280.102	1422.259	1564.531	4761.677	5865.408	6912.115	7771.046	6991.834	4.762	5.865	6.912	7.771	6.992
5	1564.646	1422.374	995.674	1564.646	1422.374	6326.323	7287.782	7907.789	9335.693	8414.208	6.326	7.288	7.908	9.336	8.414
6	1422.374	2133.504	1422.374	1564.646	1991.347	7748.698	9421.286	9330.163	10900.339	10405.555	7.749	9.421	9.330	10.900	10.406
7	853.402	1251.648	512.064	910.310	967.219	8602.099	10672.934	9842.227	11810.650	11372.774	8.602	10.673	9.842	11.811	11.373
8	1194.739	1820.621	910.310	1194.739	1365.466	9796.838	12493.555	10752.538	13005.389	12738.240	9.797	12.494	10.753	13.005	12.738
9	967.219	1365.466	796.493	967.219	853.402	10764.058	13859.021	11549.030	13972.608	13591.642	10.764	13.859	11.549	13.973	13.592
10	398.246	1422.374	512.064	853.402	625.882	11162.304	15281.395	12061.094	14826.010	14217.523	11.162	15.281	12.061	14.826	14.218
11	1007.539	1600.128	711.245	711.245	711.245	12169.843	16881.523	12772.339	15537.254	14928.768	12.170	16.882	12.772	15.537	14.929
12	829.786	1659.456	1422.374	829.786	414.950	12999.629	18540.979	14194.714	16367.040	15343.718	13.000	18.541	14.195	16.367	15.344
13	2192.832	2489.126	1955.750	1955.750	2015.078	15192.461	21030.106	16150.464	18322.790	17358.797	15.192	21.030	16.150	18.323	17.359
14	237.082	1600.128	592.704	414.835	1185.293	15429.542	22630.234	16743.168	18737.626	18544.090	15.430	22.630	16.743	18.738	18.544
15	1363.162	2489.126	1126.080	1422.374	1896.538	16792.704	25119.360	17869.248	20160.000	20440.627	16.793	25.119	17.869	20.160	20.441
16	59.213	2548.339	59.213	59.213	651.917	16851.917	27667.699	17928.461	20219.213	21092.544	16.852	27.668	17.928	20.219	21.093
17	829.670	2074.291	355.622	296.294	1837.210	17681.587	29741.990	18284.083	20515.507	22929.754	17.682	29.742	18.284	20.516	22.930
18	1481.702	2548.454	474.163	1066.867	1185.408	19163.290	32290.445	18758.246	21582.374	24115.162	19.163	32.290	18.758	21.582	24.115
19	533.376	2370.586	355.507	592.589	651.917	19696.666	34661.030	19113.754	22174.963	24767.078	19.697	34.661	19.114	22.175	24.767
20	118.541		829.670	1185.293	1481.587	19815.206	34661.030	19943.424	23360.256	26248.666	19.815	34.661	19.943	23.360	26.249
21	59.213		592.589	829.670	1244.506	19874.419	34661.030	20536.013	24189.926	27493.171	19.874	34.661	20.536	24.190	27.493

ตารางที่ จ-9 ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับซีโอดี RUNIII ที่ HLR = 12.105 m³/m².d

Time (day)	ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบ (mg)					ปริมาณซีโอดีที่เหลือในระบบสะสมในระบบ (mg)					x/m (mg/g)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	1038.182	5814.605	3530.189	3945.600	2907.187	1038.182	5814.605	3530.189	3945.600	2907.187	1.038	5.815	3.530	3.946	2.907
2	207.590	207.590	1038.182	207.590	1038.182	1245.773	6022.195	4568.371	4153.190	3945.370	1.246	6.022	4.568	4.153	3.945
3	1453.594	2907.187	415.181	1038.182	1661.184	2699.366	8929.382	4983.552	5191.373	5606.554	2.699	8.929	4.984	5.191	5.607
4	623.002	3530.419	2284.416	1661.414	2907.418	3322.368	12459.802	7267.968	6852.787	8513.971	3.322	12.460	7.268	6.853	8.514
5	1869.005	6230.016	2492.006	2907.418	4153.421	5191.373	18689.818	9759.974	9760.205	12667.392	5.191	18.690	9.760	9.760	12.667
6	3738.010	0.000	4776.422	3115.008	6645.427	8929.382	18689.818	14536.397	12875.213	19312.819	8.929	18.690	14.536	12.875	19.313
7	207.821	415.411	415.411	22.810	1038.413	9137.203	19105.229	14951.808	12898.022	20351.232	9.137	19.105	14.952	12.898	20.351
8	2492.006	6022.426	2284.416	2284.416	4153.421	11629.210	25127.654	17236.224	15182.438	24504.653	11.629	25.128	17.236	15.182	24.505
9	2284.416	2492.006	1869.005	1038.413	2284.416	13913.626	27619.661	19105.229	16220.851	26789.069	13.914	27.620	19.105	16.221	26.789
10	3738.010		2284.416	1038.413	1661.414	17651.635	27619.661	21389.645	17259.264	28450.483	17.652	27.620	21.390	17.259	28.450
11	809.856		2907.418	3322.598		18461.491	27619.661	24297.062	20581.862	28450.483	18.461	27.620	24.297	20.582	28.450
12	1246.003		1661.414	1869.005		19707.494	27619.661	25958.477	22450.867	28450.483	19.707	27.620	25.958	22.451	28.450
13	1246.003		1453.594			20953.498	27619.661	27412.070	22450.867	28450.483	20.953	27.620	27.412	22.451	28.450
14	830.592		1246.003			21784.090	27619.661	28658.074	22450.867	28450.483	21.784	27.620	28.658	22.451	28.450
15	1246.003		1246.003			23030.093	27619.661	29904.077	22450.867	28450.483	23.030	27.620	29.904	22.451	28.450

ตาราง ฉ-1 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (day)	Removal Efficiency (%)				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	29.8	39.9	51.1	64.4	68.0
2	51.5	60.0	59.8	72.0	43.3
3	10.1	21.8	43.6	49.0	43.8
4	39.0	47.5	40.2	47.7	48.0
5	46.8	55.0	32.0	49.0	51.1
6	50.5	62.9	50.5	69.1	81.4
7	22.0	32.0	12.0	22.0	37.0
8	9.5	42.0	24.5	32.0	49.5
9	32.9	52.9	28.4	44.0	57.3
10	55.0	82.0	59.5	77.5	50.5
11	18.2	72.7	18.2	36.4	54.5
12	8.3	58.3	8.3	41.7	50.0
13	24.6	53.6	29.0	31.2	42.4
14	16.4	58.4	23.4	25.7	28.0
15	4.9	61.3	12.3	22.1	39.2
Max	55.0	82.0	59.8	77.5	81.4
Min	4.9	21.8	8.3	22.0	28.0
Mean	28.0	53.4	32.9	45.6	49.6

ตาราง ฉ-2 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (day)	Removal Efficiency (%)				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	14.16	30.88	24.63	50.09	59.47
2	16.49	4.79	13.83	20.30	21.28
3	22.04	34.07	29.44	30.68	40.00
4	17.90	3.48	16.57	16.35	24.78
5	0.32	4.23	4.96	17.40	17.15
6	0.07	7.23	5.00	9.99	16.18
7	0.08	0.56	0.08	7.31	13.81
8	4.28	0.83	6.76	5.71	13.90
9	3.13	0.44	2.32	6.89	11.46
10	2.13	2.28	2.05	3.26	7.74
11	0.89	1.06	1.54	2.28	5.85
12	0.16	0.16	1.69	2.25	4.75
13	0.08	0.08	0.97	1.54	3.89
14	0.88	1.28	1.04	1.85	3.94
15	0.08	0.08	0.48	1.68	2.96
Max	22.04	34.07	29.44	50.09	59.47
Min	0.07	0.08	0.08	1.54	2.96
Mean	5.51	6.10	7.42	11.84	16.48

ตาราง ฉ-3 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่อัตราการรับน้ำเท่ากับ $2.632 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (day)	Removal Efficiency (%)				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
1	14.75	37.70	45.90	70.49	81.97
2	1.47	1.47	2.94	14.71	19.12
3	1.64	1.64	1.64	3.28	4.92
4	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
5	0.00	1.67	1.67	1.67	1.67
6	0.00	0.00	1.72	1.72	1.72
7	0.00	0.00	0.00	1.61	1.61
8	0.00	1.54	1.54	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	1.59	6.35
10	0.00	0.00	1.56	0.00	1.56
11	0.00	1.49	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	1.49	0.00	0.00
14	0.00	0.00	1.45	1.45	1.45
15	1.41	0.00	0.00	1.41	0.00
Max	14.75	37.70	45.90	70.49	81.97
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mean	1.39	3.14	4.10	6.63	8.13

ตาราง ฉ-4 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ 6.316 เมตรต่อวัน

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	23.9	33.5	45.5	50.2	59.8
2	50.2	52.6	55.0	64.6	38.3
3	8.6	17.2	37.4	40.2	34.5
4	34.9	42.6	34.9	38.8	42.6
5	44.4	40.3	28.2	44.4	40.3
6	40.3	60.5	40.3	44.4	56.5
7	29.4	43.1	17.6	31.4	33.3
8	38.9	59.3	29.6	38.9	44.4
9	33.3	47.1	27.5	33.3	29.4
10	13.0	46.3	16.7	27.8	20.4
11	25.8	40.9	18.2	18.2	18.2
12	18.9	37.8	32.4	18.9	9.5
13	45.8	52.0	40.8	40.8	42.1
14	7.0	47.4	17.5	12.3	35.1
15	31.2	56.9	25.7	32.5	43.4
16	1.3	55.3	1.3	1.3	14.1
17	19.7	49.3	8.5	7.0	43.7
18	33.8	58.1	10.8	24.3	27.0
19	13.4	59.7	9.0	14.9	16.4
20	2.8		19.7	28.2	35.2
21	1.4		14.5	20.3	30.4
Max	50.2	60.5	55.0	64.6	59.8
Min	7.0	17.2	16.7	12.3	9.5
Mean	29.7	45.2	31.2	35.8	36.5

ตาราง ฉ-5 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตที่อัตราการรับน้ำเท่ากับ 6.316 เมตรต่อวัน

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	10.65	16.93	19.39	36.32	36.86
2	4.86	7.58	14.29	31.74	22.30
3	3.78	6.61	8.50	15.74	15.58
4	2.40	9.77	3.61	11.72	10.22
5	4.61	11.59	1.67	18.01	10.89
6	1.07	4.16	2.02	14.02	8.91
7	0.46	2.28	7.77	12.95	9.29
8	0.44	2.19	5.70	11.56	10.24
9	2.53	2.82	3.79	5.91	8.73
10	1.64	1.92	3.28	4.51	6.43
11	1.20	2.52	3.19	10.10	6.91
12	1.67	1.80	3.87	4.89	7.08
13	1.26	2.02	3.39	6.67	6.80
14	0.98	0.49	2.94	7.24	8.95
15	1.47	1.10	2.20	5.62	9.16
16	0.96	5.04	0.72	0.12	9.96
17	2.12	8.13	1.77	1.53	9.08
18	1.72	1.72	0.86	4.15	1.43
19	1.13	15.57	0.71	4.11	3.26
20	1.15		1.38	0.81	4.37
21	1.30		1.30	0.87	4.11
Max	10.65	16.93	19.39	36.32	36.86
Min	0.44	0.49	1.67	4.51	6.43
Mean	2.60	4.92	5.71	13.13	11.89

ตาราง ฉ-6 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่อัตราการรับน้ำเท่ากับ 6.316 เมตรต่อวัน

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	17.24	39.66	37.93	53.45	39.66
2	7.02	15.79	19.30	21.05	10.53
3	6.67	6.67	13.33	11.67	10.00
4	0.00	0.00	9.68	6.45	6.45
5	0.00	0.00	9.38	6.25	3.13
6	4.48	1.49	2.99	2.99	11.94
7	10.14	7.25	8.70	13.04	13.04
8	4.35	1.45	2.90	7.25	7.25
9	0.00	0.00	2.90	0.00	1.45
10	6.45	9.68	4.84	4.84	1.61
11	0.00	1.47	2.94	2.94	2.94
12	1.59	1.59	0.00	0.00	3.17
13	7.25	0.00	0.00	2.90	5.80
14	5.45	9.09	1.82	1.82	1.82
15	3.57	8.93	1.79	1.79	3.57
16	1.75	10.53	1.75	1.75	3.51
17	1.82	5.45	0.00	1.82	20.00
18	16.67	43.33	0.00	13.33	10.00
19	3.57	39.29	0.00	0.00	0.00
20	0.00		0.00	0.00	0.00
21	0.00		1.56	4.69	0.00
Max	16.67	43.33	8.70	13.33	20.00
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mean	4.17	9.30	1.95	3.74	4.94

ตาราง ฉ-7 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ 12.105 m³/m².d

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	10.37	58.1	35.3	39.4	29.0
2	3.01	3.0	15.1	3.0	15.1
3	19.34	38.7	5.5	13.8	22.1
4	6.94	39.4	25.5	18.5	32.4
5	20.83	69.4	27.8	32.4	46.3
6	37.50	100.0	47.9	31.3	66.7
7	4.35	8.7	8.7	0.5	21.7
8	31.58	76.3	28.9	28.9	52.6
9	33.33	36.4	27.3	15.2	33.3
10	62.07		37.9	17.2	27.6
11	10.00		35.9	41.0	
12	15.38		20.5	23.1	
13	17.65		20.6		
14	12.12		18.2		
15	20.00		20.0		
Max	62.1	100.0	47.9	41.0	66.7
Min	3.0	3.0	5.5	0.5	15.1
Mean	20.3	47.8	25.0	22.0	34.7

ตาราง ฉ-8 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ 12.105 m³/m².d

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	19.46	32.95	28.76	31.61	61.56
2	15.24	26.80	29.75	20.29	39.95
3	16.39	23.02	20.25	17.24	26.76
4	0.12	11.92	0.87	7.45	24.33
5	0.95	32.26	0.63	2.20	23.50
6	0.25	100.00	9.87	11.41	40.53
7	0.77	93.84	1.90	5.33	45.34
8	4.24	78.05	14.28	16.97	71.51
9	0.80	68.44	16.20	30.41	66.70
10	27.49		10.09	34.83	85.10
11	1.63		1.75	34.49	
12	1.67		1.15	41.10	
13	1.06		1.06		
14	0.51		1.76		
15	0.37		1.14		
Max	27.49	100.00	29.75	41.10	85.10
Min	0.12	11.92	0.63	2.20	23.50
Mean	6.06	51.92	9.30	21.11	48.53

ตาราง ฉ -9 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่อัตราภาระรับน้ำเท่ากับ $12.105 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Time (day)	% Remove				
	กรวด	ทราย	C	D	E
1	11.54	50	32.69	28.85	32.69
2	5.56	0	3.70	0.00	1.85
3	1.89	35.85	3.77	1.89	5.66
4	1.92	17.31	0.00	0.00	3.85
5	3.70	31.48	3.70	1.85	1.85
6	1.89		0.00	5.66	3.77
7	1.85	35.19	0.00	1.85	1.85
8	1.92	32.69	1.92	0.00	1.92
9	1.89	30.19	3.77	7.55	24.53
10	11.11		7.41	3.70	24.07
11	1.89		1.89	16.98	
12	0.00		0.00	28.30	
13	0.00		1.85		
14	0.00		0.00		
15	0.00		0.00		
Max	11.54	50	32.69	28.85	32.69
Min	0.00	0	0.00	0.00	1.85
Mean	3.01	24.20	4.05	8.05	9.73

ภาคผนวก ฉ
การประเมินอายุการใช้งานของระบบ
จาก Breakthrough curve

ตารางที่ ฉ-1 ผลการศึกษา Breakthrough curve แอมโมเนีย ของชุดคอลัมน์ RUN I
ที่ HLR 2.632 m³/m².d

พารามิเตอร์	HLR 2.631 m ³ /m ² .d				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
	ปริมาณจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	8753.6842	9592.7072	9833.8605	14368.421
ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมด สภาพ (มิลลิกรัม)	27.481	67.464	84.396	154.390	186.227
ความสามารถในการดูดติดของแอมโมเนียเมื่อถึง จุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.0275	0.0675	0.0844	0.1544	0.1862
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที่)	2501.053	2740.773	2809.674	4105.263	4309.859
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
EBCT (นาที่)	1.96	0.0243	0.0261	0.0272	0.0274

ตารางที่ ๑-2 ผลการศึกษา Breakthrough curve แอมโมเนีย ของชุดคอลัมน์ RUN II
ที่ HLR 6.316 m³/m².d

พารามิเตอร์	HLR 6.316 m ³ /m ² .d				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
ปริมาตรจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	37482.985	37482.985	65520	61920	51162.353
ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	116.122	232.243	350.784	379.008	257.289
ความสามารถในการดูดติดของแอมโมเนียเมื่อถึง จุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.1161	0.2322	0.3508	0.3790	0.2573
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที่)	4685.373	4685.373	8190.000	7740.000	6395.294
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
EBCT (นาที่)	1.96	0.0243	0.0261	0.0272	0.0274

ตารางที่ ๓-3 ผลการศึกษา Breakthrough curve แอมโมเนียของชุดคอลัมน์ RUN III

ที่ HLR 12.105 m³/m².d

พารามิเตอร์	HLR 12.105 m ³ /m ² .d				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
ปริมาตรจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	49816.216		45047.172	42080.000	112881.04
ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	28.682		84.419	144.687	174.118
ความสามารถในการดูดติดของแอมโมเนียเมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.0287		0.0844	0.1447	0.1741
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาทีก)	3113.514		2815.448	2630.000	2735.065
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	16.00	16.00	16.00	16.000	16.00
EBCT (นาทีก)	1.96	0.0243	0.0261	0.0272	0.0274

ตารางที่ ๑-4 ผลการศึกษา Breakthrough curve ฟอสเฟต ของชุดคอลัมน์ RUN I

ที่ HLR 2.632 m³/m².d

พารามิเตอร์	3.5 ml/min				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
ปริมาตรจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	23860.3 98	19909.5 65	25182.6 36	47984.1 32	59334.5 45
ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	395.591	414.401	497.532	893.215	1274.40 6
ความสามารถในการดูดติดของฟอสเฟตเมื่อถึง จุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.396	0.414	0.498	0.893	1.274
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที่)	6817.25 7	5688.44 7	7195.03 9	13709.7 52	16952.7 27
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
EBCT (นาที่)	1.960	0.024	0.026	0.027	0.027

ตารางที่ ๕-5 ผลการศึกษา Breakthrough curve ฟอสเฟต ของชุดคอลัมน์ RUN II

ที่ HLR 6.316 m³/m².d

พารามิเตอร์	HLR 6.316 m ³ /m ² .d				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
ปริมาตรจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	22837.895	67874.595	42788.571	111085.714	201974.026
ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	105.890	378.500	297.631	1083.773	1388.037
ความสามารถในการดูดติดของฟอสเฟตเมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.106	0.378	0.298	1.084	1.388
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที่)	2854.737	8484.324	5348.571	13885.714	25246.753
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
EBCT (นาที่)	1.960	0.024	0.026	0.027	0.027

ตารางที่ ฉ-6 ผลการศึกษา Breakthrough curve ฟอสเฟต ของชุดคอลัมน์ RUN III

ที่ HLR 12.105 m³/m².d

พารามิเตอร์	HLR 12.105 m ³ /m ² .d				
	กรวด	ทราย	size C	size D	size E
ปริมาตรจากจุดเริ่มต้นถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	85233.865		87290.722	102793.846	
ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	742.486		1154.936	1113.186	
ความสามารถในการดูดติดของฟอสเฟตเมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.742		1.155	1.113	
อายุการใช้งานจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)	5327.117		5455.670	6424.615	
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
EBCT (นาที)	1.960	0.024	0.026	0.027	0.027

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวจรียา ยี่มรัตน์บวร

ที่อยู่ปัจจุบัน 79/2 ถนนนคร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044-224-457

ประวัติการศึกษา

- | | |
|------|---|
| 1990 | B.Sc. (Sanitary Science) Mahidol University, Bangkok, Thailand |
| 1994 | M.Sc. (Environmental Science) Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand |
| 2000 | M.Sc.(Environmental Chemistry) Kochi University, Japan |
| 2003 | Ph.D.(Environmental Technology) Ehime University, Japan |