



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของตัวกลางจากวัสดุเหลือใช้

The Study of Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Media from Waste Materials

นามผู้วิจัย นายณัฐ ภูเกิดสิน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของตัวกลางจากวัสดุเหลือใช้

The Study of Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Media from Waste Materials

โดย

นายณัฐ ภูเกตุสิน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐ ภูเก็ดสิน 2556: การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของ
ตัวกลางจากวัสดุเหลือใช้ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, Ph.D. 83 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางจากวัสดุในประเทศไทยให้เป็นชิ้นงานที่มีรูพรุน
โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับฟอสฟอรัส และเป็นแหล่งยึดเกาะของจุลินทรีย์
กลุ่มไนตริฟายอิง เพื่อการกำจัดไนโตรเจน ตัวกลางถูกสังเคราะห์ขึ้นจากเปลือกหอยแครงและดิน
ตะกอนประปาให้มีรูปร่างเป็น เม็ดยา ทรงกระบอก และทรงกลม จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพ
ในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยใช้ไอโซโทมการดูดซับ ซึ่งสมการของแลงเมียร์ถูกนำมาใช้อธิบาย
ลักษณะของการดูดซับนี้ ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม มีความสามารถในการดูดซับ
ฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับ 4.85 7.63 และ 4.95 มก. P/ก. จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด
ไนโตรเจนโดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มม. สูง 150 มม. ภายในบรรจุตัวกลาง
แต่ละรูปร่าง และป้อนน้ำเข้าที่มีค่าอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 0.22-0.24 กก.
N/m²-วัน หลังเดินระบบ 47 วัน ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลมมีร้อยละประสิทธิภาพ
การกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 48.4, 53.1 และ 53.1

ตัวกลางทรงกระบอกถูกเลือกไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไปที่เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ
การกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กัน ด้วยเหตุผลที่ว่าตัวกลางทุกรูปร่างมี
ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่ไม่ต่างกัน แต่ตัวกลางทรงกระบอกมีความสามารถในการดูด
ซับฟอสฟอรัสดีที่สุดใน การทดลองใช้ถึงปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลางขนาด 10 ซม. ที่มีการออกแบบเป็นชั้นเดียว และเป็นแบบสามชั้น ป้อนน้ำเข้าที่มีค่าอัตรา
ภาระบรรทุกแอมโมเนียและฟอสฟอรัสต่อพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 0.14-0.15 กก. N/ตร.ม.-วัน และ
0.018-0.021 กก. P/ตร.ม.-วัน ตามลำดับ หลังเดินระบบ 25 วัน ถึงปฏิกรณ์สามชั้นมีร้อยละ
ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่ดีกว่าถึงปฏิกรณ์ชั้นเดียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 85.4
และ 30.8 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการออกแบบถึงปฏิกรณ์ให้มีระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียและ
ตัวกลางที่ต่ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำลงเช่นกัน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nut Pookerdsin 2013: The Study of Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Media from Waste Materials. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Pongsak Noophan, Ph.D. 83 pages.

This research is to synthesize the porous media from materials available in local area of Thailand. This porous media was applied to wastewater for removing phosphorus and fixing of nitrifying bacteria. The synthetic media consists of blood cockle shells and alum residuals from water supply plant. The shape of media were formed as tablet, cylinder and sphere. The phosphorus removal efficiency of the synthetic media was determined by using adsorption isotherm. Langmuir equation was used to describe the adsorption characteristics of this media. The result showed P sorption capacity was 4.85 mg P/g for tablet, 7.63 mg P/g for cylinder and 4.95 mg P/g for sphere. Furthermore, the nitrogen removal was investigated by packing media in column with size of 24 mm diameter and 150 mm height. The 0.22-0.24 kg N/m²-d of synthetic wastewater was dropped to the layers of media that pack in column. After 47 day, the ammonia removal efficiency was 48.3% for tablets, 53.1% for cylinder and 53.1% for sphere.

Cylinder shape media was selected for study the removal of nitrogen and phosphorus simultaneously because of the highest ability of phosphorus sorption. Eventhough, changing the shape of the media was not demonstrate a difference in nitrification efficiency. The 10 cm diameter of column reactor was used in this experiment with designed of one-tier and three-tier. Next, the 0.14-0.15 kg N/m²-d and 0.018-0.021 kg P/m²-d of synthetic wastewater was dropped to the layers of packing media. After 25 day, The efficiency of nitrogen and phosphorus removal in the three-tier reactor was better than one-tier reactor. The 85.4% of nitrogen and 30.8% of phosphorus removal efficiency was observed in three-tier reactor. This low efficiency of phosphorus removal is due to the poor of contact time between the synthetic wastewater and media in reactor.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร. ศิริพร ลาภเกียรติถาวรอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาช่วยเหลือในเรื่องการวางแผนทางในการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สัตยญา สิริวิทยาปกรณ์ ประธานกรรมการสอบรองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช วันทวิน ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ที่ได้เข้าร่วมรับในการสอบเสนอแนวคิด และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้การอนุเคราะห์ในเรื่องทุนการวิจัย และอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือวิจัย ตลอดจนให้สถานที่ในการเตรียมตัวกลาง

ขอบคุณ น.ส. มรุรส วัจนะชัย ผู้ร่วมวิจัย ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในหลายๆ ด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนทุนในการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบผลสำเร็จ

ณัฐ ภู่เกิดสิน
กุมภาพันธ์ 2556

สารบัญ

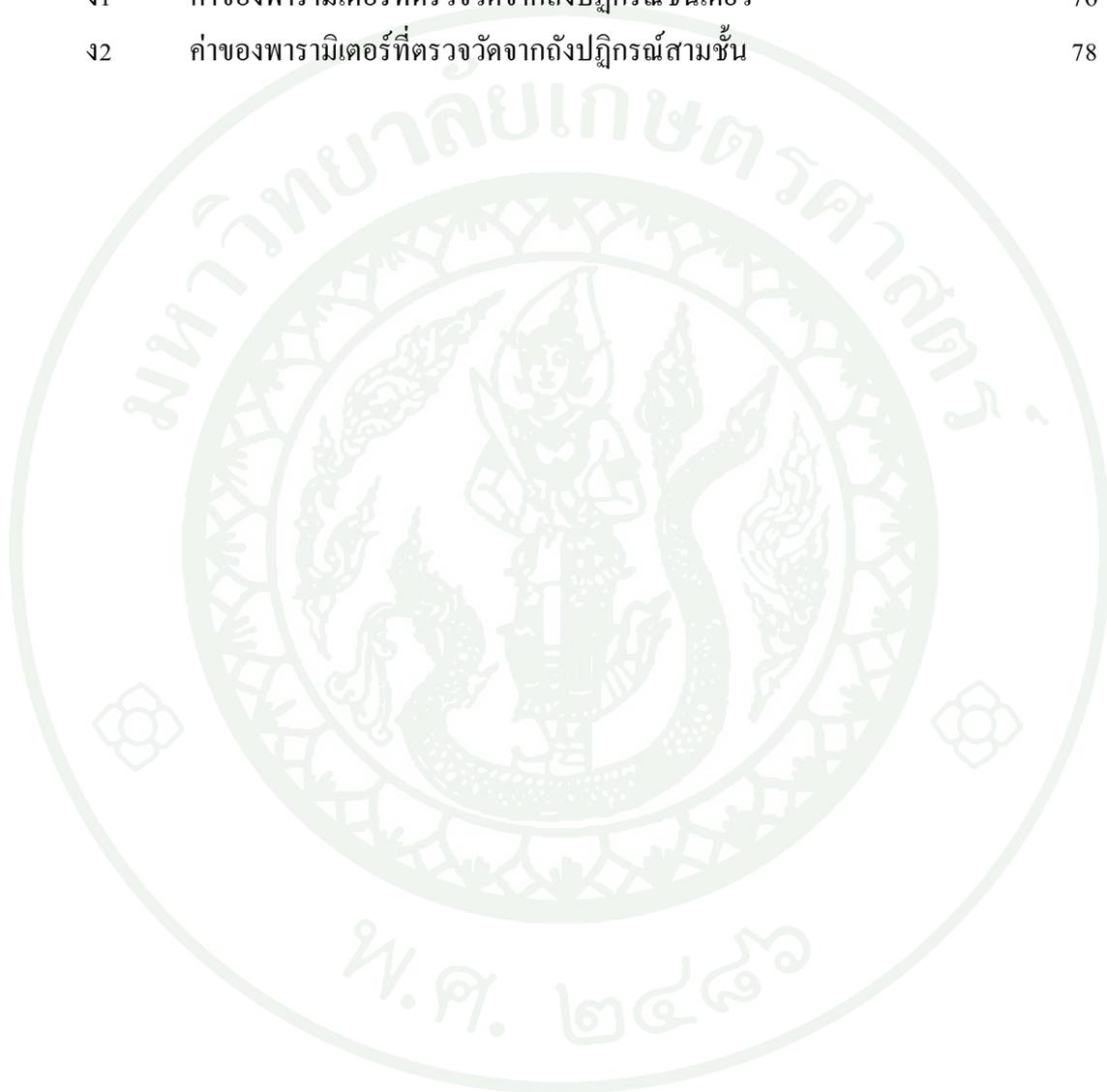
	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	48
สรุป	48
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	50
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดลองการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง	57
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการทดลองความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง	63
ภาคผนวก ค ข้อมูลจากการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง	68
ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการทดลองการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กันในถังปฏิกรณ์เดียว	75
ภาคผนวก จ กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์	80
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การประมาณค่าฟอสฟอรัสจากแหล่งกำเนิดต่างๆ	5
2	การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางประเภทที่สังเคราะห์ขึ้น	13
3	งานวิจัยที่ศึกษากำจัดไนโตรเจนโดยใช้ตัวกลาง	21
4	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง	26
5	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ในการศึกษาประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว	30
6	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง	32
7	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ของน้ำเสียตัวอย่าง	32
8	ชื่อและรุ่นของเครื่องมือวิเคราะห์	33
9	ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง	34
10	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่ของตัวกลางได้จากไอโซเทอม	36
ตารางผนวกที่		
ก1	แสดงการคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางรูปร่างต่างๆ	58
ข1	ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางเม็ดยา	64
ข2	ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกระบอก	65
ข3	ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกลม	66
ข4	ค่าที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของตัวกลางรูปร่างต่างๆ	66
ค1	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางเม็ดยา	69
ค2	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางทรงกระบอก	71
ค3	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางทรงกลม	73
ง1	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ขึ้นเดียว	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง1	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ชั้นเดียว	76
ง2	ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์สามชั้น	78



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ	8
2	กลไกการดูดซับ	10
3	วัฏจักรไนโตรเจน	14
4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปของแอมโมเนียกับค่าพีเอช	16
5	กลไกการกำจัดไนโตรเจน	20
6	ตัวกลางรูปเม็ดยา (ก); ตัวกลางรูปทรงกระบอก (ข); ตัวกลางรูปทรงกลม (ค)	25
7	เชื้อกลุ่มไนตริฟายที่ใช้ในการทดลอง	27
8	แผนภาพถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง	28
9	ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง	29
10	แผนภาพถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถึงปฏิกรณ์เดียว แบบคอลัมน์ขึ้นเดียว (ก); ถึงปฏิกรณ์สามชั้น (ข)	31
11	ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถึงปฏิกรณ์เดียว แบบคอลัมน์ขึ้นเดียว (ก); ถึงปฏิกรณ์สามชั้น (ข)	31
12	กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง	36
13	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (ก); ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ข); ความเข้มข้นของไนเตรต (ค) เทียบกับเวลา ของตัวกลางรูปร่างต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถึงปฏิกรณ์	39
14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางเม็ดยาที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ก); หลังเลี้ยงเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ค); หลังเลี้ยงเชื้อ (ง)	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางทรงกระบอกที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ก); หลังเลี้ยงเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ค); หลังเลี้ยงเชื้อ (ง)	41
16	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางทรงกลมที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ก); หลังเลี้ยงเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ค); หลังเลี้ยงเชื้อ (ง)	42
17	กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอช (ก); สภาพต่าง (ข) ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กัน ภายในถังปฏิกรณ์เดียว	44
18	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียและประสิทธิภาพในการกำจัด แอมโมเนีย ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการ กำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว	45
19	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงไนเตรต ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กัน ภายในถังปฏิกรณ์เดียว	46
20	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสและประสิทธิภาพการกำจัด ฟอสฟอรัส ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการ กำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว	47
ภาพผนวกที่		
ก1	ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางเม็ดยาโดยใช้เครื่อง BET	60
ก2	ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางทรงกระบอกโดยใช้เครื่อง BET	61
ก3	ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางทรงกลมโดยใช้เครื่อง BET	62
ข1	กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางเม็ดยา	67
ข2	กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกระบอก	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข3	กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกลม	67
จ1	กราฟมาตรฐานฟอสฟอรัสที่ใช้ในการวิเคราะห์	81
จ2	กราฟมาตรฐานไนเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์	81
จ3	กราฟมาตรฐานไนเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานไอออนโครมาโท- กราฟที่ใช้ในการทดลอง	82
จ4	กราฟมาตรฐานไนเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟไอออนโครมาโทกราฟของน้ำ เสียตัวอย่างวันที่ 25 ที่ผ่านถึงปฏิกรณ์แบบ สามชั้นของการทดลองการกำจัด ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดควบคู่กันในถังปฏิกรณ์เดียว	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ก.	=	กรัม
ก./ล.	=	กรัมต่อลิตร
กก. N./ตร.ม.-วัน	=	กิโลกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน
กก. P./ตร.ม.-วัน	=	กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อตารางเมตรต่อวัน
ชม.	=	ชั่วโมง
ชม.	=	เซนติเมตร
ตร.ม./ก.	=	ตารางเมตรต่อกรัม
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก. N/ล.	=	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
มก. P./ก.	=	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม
มก. P/ล	=	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
มม.	=	มิลลิเมตร

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของตัวกลางจากวัสดุเหลือใช้

The Study of Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Media from Waste Materials

คำนำ

เมื่อปี ค.ศ. 1970 วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสียได้เริ่มมีการสนใจในการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ แต่การที่มีสารอาหารเหล่านั้นสะสมในธรรมชาติมากเกินไปเป็นการรบกวนสมดุลของระบบนิเวศวิทยาในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Schindler, 1971)

ความต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนีย มีค่ามากกว่าความต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอนทางชีวภาพ ถึง 4.57 เท่า (ธงชัย, 2544) ดังนั้นถ้ามีไนโตรเจนปนเปื้อนอยู่และถูกระบายทิ้งลงแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดการลดลงของออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ในเตรตที่อยู่ในแหล่งน้ำสามารถแทรกตัวเข้าสู่บ่อบาดาลบริเวณใกล้เคียงได้ ถ้ามีการนำน้ำบาดาลจากแหล่งนั้นมาให้เด็กอ่อนบริโภคจะก่อให้เกิดโรคเด็กตัวเขียว (Methemoglobinemia) (U.S. EPA, 2007) น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของแอมโมเนียและมีค่าพีเอชสูงจนทำให้แอมโมเนียอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระจะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต แอมโมเนียอิสระเพียง 0.2 มก./ล. ก่อให้เกิดพิษรุนแรงต่อปลาหลายชนิด (U.S. EPA, 1999)

การกำจัดฟอสฟอรัส วิธีทางชีวภาพเป็นวิธีที่ใช้งานได้ยากสำหรับน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย เพราะระบบการรวบรวมน้ำเสียเป็นแบบที่มีการรับน้ำฝนมารวมด้วย น้ำเสียถูกเจือจางทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ข้อเสียของการตกตะกอนคือต้องเติมสารเคมีและมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก (ธงชัย, 2539) ดังนั้นการกำจัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการดูดซับจึงมีความน่าสนใจมากกว่าในแง่ที่ว่า เมื่อมีการใช้ตัวกลางจนเสื่อมสภาพแล้ว สามารถนำตัวกลางเหล่านั้นไปใช้งานในด้านอื่นหรือนำไปฟื้นฟูสภาพตัวกลางเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ตัวกลางที่มีความสามารถในการดูดซับที่ดีต้องมี แคลเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม เป็นองค์ประกอบ (Vohla et al., 2011)

การกำจัดไนโตรเจน โดยทั่วไปใช้กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายและดีไนตริฟาย เนื่องจากจุลินทรีย์มีอัตราการเติบโตช้าและมีปริมาณของเซลล์ต่ำ (Wijffels and Tramper, 1995) ทำให้ในระบบกำจัดไนโตรเจนต้องใช้ตัวกลางเพื่อเป็นแหล่งให้เชื้อจุลินทรีย์ยึดเกาะ ลดการสูญเสียเชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ ตัวกลางดังกล่าวจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวมาก และตัวกลางที่มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่ทำจากพลาสติก แต่ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่ศึกษาการใช้ตัวกลางที่แตกต่างออกไป เช่นตัวกลางที่ทำจาก ซีโอไลต์ เซรามิก และ คาร์บอนเนต (Qiu et al., 2010)

งานวิจัยได้ทำการสร้างตัวกลางที่ใช้เป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัสและในขณะเดียวกันสามารถใช้เป็นแหล่งยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้เกิดการกำจัดไนโตรเจนควบคู่กันไปกับการดูดซับฟอสฟอรัส ตัวกลางดังกล่าวจึงจำเป็นต้องเป็นตัวกลางที่มีรูพรุน และทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ของเสียบเป็นวัสดุส่วนผสมในการสังเคราะห์ตัวกลางเพื่อให้เป็นไปตามแนวคิดของการใช้ประโยชน์จากของเสียบ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของตัวกลางรูปร่างต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากเปลือกหอยแครงและดินตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา

ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำสูตรส่วนผสมตัวกลางที่มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย มาสังเคราะห์เป็นรูปเม็ดยา ทรงกระบอกและทรงกลม
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุนปรากฏ การดูดซับน้ำ และพื้นที่ผิวจำเพาะ
3. ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางรูปร่างต่างๆ โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์
4. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน โดยศึกษาการเปลี่ยนแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเป็นไนเตรต-ไนโตรเจน ของตัวกลางแต่ละรูปร่าง โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่เป็นท่ออะคริลิกที่ภายในบรรจุด้วยตัวกลาง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเข้าระบบ และใช้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายในการทดลอง
5. ศึกษาการเกาะของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายภายในตัวกลางแต่ละรูปร่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)
6. นำตัวกลางรูปร่างที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุด ทำการศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากอะคริลิก 2 รูป ได้แก่ถังปฏิกรณ์ขึ้นเดียว และถังปฏิกรณ์สามชั้น ภายในบรรจุด้วยตัวกลาง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายในการทดลอง

การตรวจเอกสาร

1. ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารที่พบในสิ่งมีชีวิต แหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป มักอยู่ในรูปของฟอสเฟต หรือสารประกอบฟอสเฟต ฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำจำแนกออกเป็น 3 ประเภทตามหลักเคมี วิชาคือ ออร์โธฟอสเฟต คอนเดนซ์ฟอสเฟต และสารอินทรีย์ฟอสเฟต ออร์โธฟอสเฟตและคอนเดนซ์ฟอสเฟตพบอยู่ในรูปของสารละลาย สารอินทรีย์ฟอสเฟตพบอยู่ในรูปสารละลายเชิงซ้อน หรือสารแขวนลอย (มันซิน และมันรัทซ์, 2545) ฟอสฟอรัสที่พบมีแหล่งกำเนิดมาจาก 2 แหล่ง ใหญ่ๆ (อุบลวรรณ, 2536) ดังนี้

1.1 จากธรรมชาติ ได้แก่ การละลายของหินฟอสเฟต การพัดพาฟอสฟอรัสจากในอากาศ และจากผิวดินลงสู่แหล่งน้ำ ซากพืชซากสัตว์ และอื่นๆ ที่เกิดขึ้นตามวัฏจักรฟอสฟอรัส

1.2. จากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้ผงซักฟอกจากกิจกรรมในครัวเรือน น้ำทิ้งจาก เกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต การปศุสัตว์ และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารซักล้าง ฟอสฟอรัสที่มาจากแหล่งกำเนิดนี้จะมีปริมาณที่มากกว่าแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และค่าการประมาณปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียประเทศไทยไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประมาณค่าฟอสฟอรัสจากแหล่งกำเนิดต่างๆ

	แหล่งกำเนิด	ปริมาณฟอสฟอรัส (ตัน/ปี)	รวม
จากชุมชน ¹	การขับถ่าย	7,900.5	
	การซักรีด	7,696.8	31,266.8
	การอาบน้ำและการทำครัว	15,629.5	
จากการปศุสัตว์ ²	มูลวัว	5,924.1	
	มูลกระบือ	17,124.8	
	มูลสุกร	6,840.0	33,116.5
	มูลเป็ด	1,147.3	
	มูลไก่	2,080.3	
จากอุตสาหกรรม ³	ผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก และน้ำยาซักผ้า	6,582 – 7,342	
	อาหาร และเครื่องดื่ม	1,573 – 1,835	
	หม้อไอน้ำ (boiler)	293 – 439	
	สารกันบูดและอาหารทะเล	1,495 – 1,704	
	การบำบัดเหล็ก	1,066 – 1,141	
	กระเบื้องเซรามิก	1,101 -1,224	14,037 – 16,235
	สิ่งทอ	439 – 586	
	สีทา	146 – 324	
	สีซ่อม	239 – 351	
	สารปรับสเถียรภาพ	28 – 35	
	ยาสีฟัน	1,075 – 1,254	
	กลีกรรรม ⁴	ปริมาณการนำเข้าปุ๋ยฟอสฟอรัส	138,966

หมายเหตุ ¹ คำนวณจากจำนวนประชากรและสมมูลประชากรฟอสฟอรัส

² ทำการสำรวจในปี พ.ศ. 2531 คำนวณจากจำนวนประชากรสัตว์และและสมมูลการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

³ ค่าจากปริมาณการจำหน่ายฟอสฟอรัสที่ใช้ในอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2535

⁴ ค่าจากปริมาณการนำเข้าปุ๋ยของไทย ปี พ.ศ. 2533 ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกปี

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชีระวิทย์ (2547)

2. ยูโทรฟิเคชัน

ยูโทรฟิเคชันคือปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำได้รับปริมาณธาตุอาหารของพืชมากเกินไป เป็นสาเหตุให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืช สาหร่าย และพืชชั้นสูง จนรบกวนสมดุลของระบบนิเวศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของแหล่งน้ำ อัตราการรับสารอาหารและความสามารถในการปรับตัวเข้าสู่สมดุลของแหล่งน้ำ

Huang *et al.* (2003) ได้จำแนกการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำเป็นสองประเภท คือ การเกิดยูโทรฟิเคชันที่ปราศจากการปนเปื้อนของมลพิษ ซึ่งจะเป็นการเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติอย่างช้าๆ และสามารถปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เอง กับอีกประเภทหนึ่งคือ การเกิดยูโทรฟิเคชันจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การปล่อยน้ำทิ้งจากชุมชน อุตสาหกรรม การเกษตรกรรม และการเดินทางทางทะเล ผลกระทบของยูโทรฟิเคชันต่อแหล่งน้ำในทางตรงคือการทำให้สภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป เช่น ทำให้น้ำขุ่น มีสี มีกลิ่นที่ต่างจากปกติ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในด้านการดำรงชีวิตและห่วงโซ่อาหาร (Smith *et al.*, 1999)

3. ปัจจัยที่ทำให้เกิดยูโทรฟิเคชัน

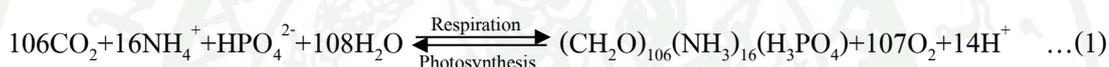
3.1 ธาตุอาหารจำกัด

จากที่ทราบกันว่า ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจัดเป็นธาตุอาหารจำกัดในการเกิดยูโทรฟิเคชัน คำว่า "ธาตุอาหารจำกัด" ในที่นี้หมายความว่า เมื่อมีธาตุอาหารในรูปที่ผู้ผลิตสามารถนำไปใช้งานได้น้อยเกินไป ผู้ผลิตจะไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ ในทางตรงข้ามถ้ามีธาตุอาหารจำกัดมากขึ้นและมีปัจจัยที่เหมาะสม เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น ผู้ผลิตจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นจนเกิดเป็นสภาวะยูโทรฟิเคชัน (นิคม, 2547) อย่างไรก็ตามการควบคุมธาตุอาหารจำกัดการบริเวณแหล่งน้ำจืดปิด เช่น ทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำมักจะควบคุมที่ฟอสฟอรัส เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศได้ ดังนั้นหากน้ำเสียมียังมีเพียงฟอสฟอรัสปนเปื้อนเพียงอย่างเดียว อาจเกิดการยูโทรฟิเคชันของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ แต่ในบริเวณที่เป็นปากแม่น้ำไนโตรเจนถูกใช้ป็นธาตุอาหารจำกัดที่เป็นตัวควบคุมแทน เนื่องจากน้ำทะเลมีฟอสฟอรัสอยู่แล้วและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินไม่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีความเค็ม (ชงชัย, 2544)

3.2 แสงและอุณหภูมิ

พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อการเพิ่มจำนวนของสิ่งมีชีวิตพวกออโตโทรฟ (Autotroph) ที่มีสารคลอโรฟิลล์ เช่น พวกแพลงก์ตอนพืชและสาหร่าย จากสมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย เช่น ธาตุอาหาร แสง และอุณหภูมิ เป็นต้น แต่ในประเทศไทยแสงและอุณหภูมิไม่ใช่ปัจจัยจำกัด (นิคม, 2547) เนื่องจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีได้หมุนวนกลับมาใช้ใหม่ ก็จำเป็นต้องระบายออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นแสงและอุณหภูมิจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ใช้ในการควบคุมการเกิดยูโทรฟิเคชัน

สมการการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตกลุ่มออโตโทรฟ (อัศดร, 2553)



3.3 ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ แหล่งน้ำที่มีระยะเวลาที่กักเก็บมากถ้ามีการรับธาตุอาหารเข้ามาอย่างต่อเนื่อง ธาตุอาหารเหล่านั้นยังคงสะสมอยู่ในแหล่งน้ำและไม่ถูกชะออกไป ทำให้มีโอกาสเกิดยูโทรฟิเคชันได้สูง ระยะเวลาที่กักเก็บของน้ำสามารถใช้เป็นตัวจำแนกลักษณะของแหล่งน้ำได้ แหล่งน้ำที่มีระยะเวลาที่กักเก็บของน้ำมากได้แก่ เขื่อน ทะเลสาบ อ่าว และลากูนประเภทต่างๆ เป็นต้น แหล่งน้ำเหล่านี้จะมีความสามารถในการรองรับธาตุอาหารที่ต่ำกว่าแหล่งน้ำที่มีการไหลเข้าออกอยู่ตลอดเวลา (ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำต่ำ)

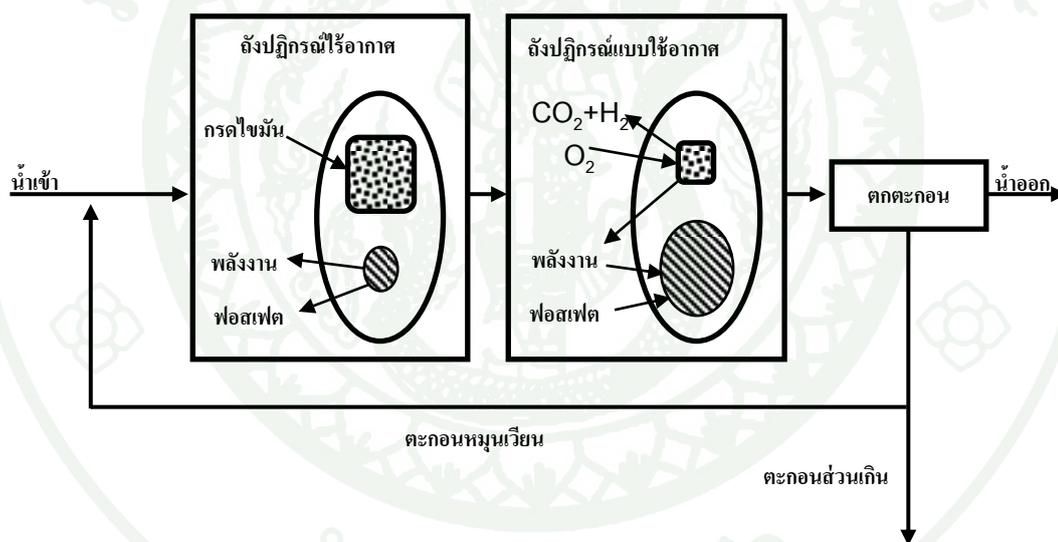
4. เทคโนโลยีการกำจัดฟอสฟอรัส

4.1 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ในการเติบโตของจุลินทรีย์ จำเป็นต้องมีธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารเสริม ธาตุอาหารหลักที่สำคัญคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียแบบเร่งตะกอน (Activated sludge) ต้องมีอัตราส่วนของ บีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

เท่ากับ 100:5:1 (Metcaft and Eddy, 2003) จุลินทรีย์ใช้ฟอสฟอรัสในรูปของออร์โทฟอสเฟตที่ละลายอยู่เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (Deoxyribonucleic acid, DNA) และกรดไรโบนิวคลีอิก (Ribonucleic acid, RNA) เพื่อสร้างหรือซ่อมแซมเซลล์ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บฟอสฟอรัสไว้เป็นพลังงานสะสมในรูปของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate, ATP)

การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีหลักการคือ ในสภาวะไร้อากาศที่มีค่าของกรดสูง จุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่สะสมไว้และจะปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาจากเซลล์ และใช้กรดไขมันเป็นแหล่งคาร์บอน แต่เมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะเป็นแบบมีอากาศ จุลินทรีย์จะพยายามสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ในปริมาณที่มากกว่าปกติ (Luxury uptake) ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงถูกกำจัดออกจากน้ำในรูปของตะกอนจุลินทรีย์ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชีรวิทย์ (2547)

4.2 การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนมลสารที่อยู่ในรูปสารละลาย ให้อยู่ในรูปของตะกอน การตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายของสาร โดยกระบวนการเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกันดังนี้ (อุบลวรรณ, 2536)

4.2.1 เติมสารที่ช่วยในการตกตะกอน สารทำปฏิกิริยาโดยตรงกับมลสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อย

4.2.2 เติมสารที่ช่วยในการตกตะกอน สารทำการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุลของการละลายน้ำ (solubility equilibrium) ให้มาถึงจุดที่มลสารไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป และเกิดการรวมตัวเป็นตะกอน

4.2.3 เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิมตัว ไปในทิศทางที่ทำให้ค่าการละลายเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง

4.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือ กระบวนการที่เคลื่อนย้ายโมเลกุลหรือคอลลอยด์ของมลสารที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวกลาง กระบวนการดังกล่าวคล้ายกับการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass transfer) โดย โมเลกุลของสารที่ถูกเคลื่อนย้ายมาเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” และตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นที่ให้มลสารที่ต้องการกำจัดยึดเกาะเรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbent)” การดูดซับสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ เช่น สี กลิ่น สารอินทรีย์ ยาฆ่าแมลง โลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี ทำให้ควบคุมและใช้งานได้ง่ายกว่าระบบชีวภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นอกจากนี้ยังไม่ส่งกลิ่นรบกวนต่อพื้นที่ใกล้เคียง (Metcalf and Eddy, 2003)

4.3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน (Faust and Aly, 1987) ดังนี้

ก. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับถูกห่อหุ้มด้วยชั้นที่เรียกว่า “ชั้นรอยต่อ (Boundary layer)” การที่ตัวดูดซับจะเข้าถึงตัวดูดซับได้จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่ ภายในสารละลายก่อน เรียกว่า “การขนส่งอนุภาค (Bulk transport)” จากนั้นจึงเคลื่อนที่ผ่านชั้นรอยต่อ โดยการแพร่ตัวหรือเรียกว่า “การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport)” ดังภาพที่ 2

ข. การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวดูดซับแพร่ตัวเข้าสู่ช่องว่างในตัวดูดซับ เป็นการขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เกิดขึ้นโดยการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนภายในตัวดูดซับเรียกว่า “การแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion)”

ค. การทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวตัวดูดซับ (Surface reaction) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวดูดซับถูกดูดติดบนผิวของตัวดูดซับ กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้เร็วกว่ากระบวนการแพร่มาก



ภาพที่ 2 กลไกการดูดซับ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Eckenfelder (1981)

4.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

ก. ขนาดและพื้นที่ผิว

ขนาดของตัวกลางแปรผกผันกับพื้นที่ผิว ตัวกลางที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งพื้นที่ผิวจะเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งส่งผลโดยตรงกับการดูดซับ ซึ่งความสามารถในการดูดซับแปรผันตามพื้นที่ผิว แต่ในกรณีที่มีการดูดซับมีการทำปฏิกิริยาทางเคมี ชาติและสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบในตัวกลางเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน

ข. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

ลักษณะสำคัญของตัวดูดซับที่ส่งผลต่อการดูดซับคือขนาดของอนุภาค อนุภาคของตัวถูกดูดซับควรมีขนาดที่เล็กกว่า ขนาดของโพรงรูพรุนของตัวดูดซับ เพื่อให้ตัวถูกดูดซับไปเกาะที่พื้นผิวโพรงของตัวดูดซับได้ นอกจากนี้ความสามารถในการละลายเป็นอีกลักษณะหนึ่งส่งผลต่อการดูดซับ อัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับเพราะ ในการดูดซับตัวถูกดูดซับต้องแยกออกจากตัวทำละลายและเคลื่อนย้ายไปเกาะตัวดูดซับ

ค. ความปั่นป่วน

ความปั่นป่วนมิได้มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แต่ส่งผลถึงอัตราเร็วในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวถูกดูดซับเพื่อไปเกาะติดภายในพื้นที่ผิวหรือโพรงของตัวดูดซับ แต่ในการเคลื่อนที่นั้นอนุภาคจำเป็นต้องแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ความปั่นป่วนสามารถทำลายชั้นฟิล์มของน้ำไม่ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นชั้นฟิล์มหนาทำให้เหลือเพียงการแพร่ผ่านโพรง จึงเป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการดูดซับ

ง. เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับ ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับตัวถูกดูดซับต่างกัน ตัวกลางมีจะประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารที่ดีได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม เวลาสัมผัสจึงเป็นปัจจัยที่ต้องทำการศึกษาทุกครั้งก่อนนำตัวกลางไปใช้

จ. พีเอช

ค่าพีเอชเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ เนื่องจากแรงดูดซับระหว่างผิวสัมผัสกับไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าสูง ทำให้ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและสารละลายต่างๆ จึงส่งผลต่อกระบวนการดูดซับของสารละลาย

ฉ. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับและอัตราเร็วของการดูดซับ กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับลดลงด้วย ในทางตรงข้ามความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

4.3.3 ตัวกลางในการดูดซับฟอสฟอรัส

ในกระบวนการดูดซับสิ่งที่สำคัญคือตัวกลาง ซึ่งตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสต้องมีองค์ประกอบเป็น แคลเซียม เหล็ก และ อะลูมิเนียม หลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสในตัวกลางต่างๆ และมีการจำแนกประเภทของตัวกลางดังนี้คือ ตัวกลางที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ (Natural products) ตัวกลางที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม (By-products) และตัวกลางที่สังเคราะห์ขึ้น (Man-made products) (Vohla et al., 2011) ตัวกลางสำหรับงานวิจัยนี้จัดเป็นตัวกลางที่สังเคราะห์ขึ้น ตัวกลางที่สังเคราะห์ขึ้นและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการกำจัดฟอสฟอรัสได้แก่

ก. Lightweight aggregated, LWA (Zhu et al., 2003) เป็นวัสดุเนื้อหยาบที่มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านและดูดซับฟอสฟอรัสได้ดี ผลิตโดยการนำดินเหนียวไป

เผาโดยเตาเผาแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของดินเหนียวที่นำมาใช้

ข. Light-expanded clay aggregate, LECA (Hill *et al.*, 2000; Vohla *et al.*, 2005) เป็นวัสดุประเภทดินเหนียวเผาที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ภายในอนุภาคมีลักษณะป่องบวม วัสดุประเภทนี้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยเตาเผาแบบหมุน ตัวกลางประเภทนี้เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนต่ำ

ค. Filtralite P™ (Ádám *et al.*, 2007; Heistad *et al.*, 2006) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัสดุเนื้อน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate, LWA) ชนิดใหม่จากนอร์เวย์ ที่พัฒนามาเพื่อดูดซับฟอสฟอรัส ทำจากแร่ดินเหนียวธรรมชาติซิลิกาธรรมชาติ (Illite clay mineral) ผสมกับสารเติมแต่งธรรมชาติ และเผาโดยเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นวัสดุที่มีเคลือบผิวแมกนีเซียม และฟิออสสูง (ประมาณ 10) เมื่อเสื่อมสภาพแล้วสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้

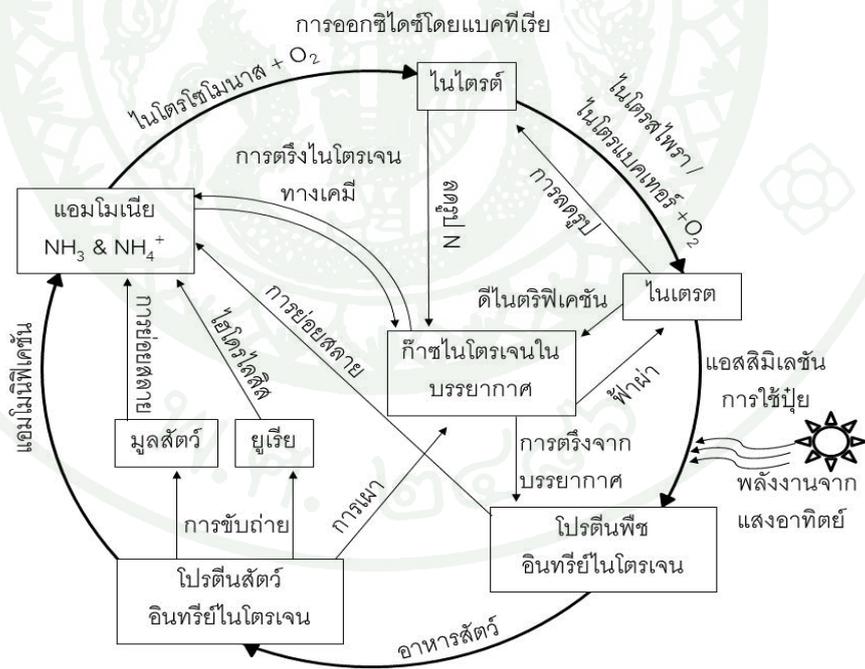
ตัวกลางดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดอนุภาค องค์ประกอบของตัวกลาง อุณหภูมิ และรูปแบบของระบบที่ใช้ศึกษา ตารางที่ 2 ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางประเภทที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเลือกเฉพาะรูปแบบการทดลองที่เป็นแบบแบตช์ ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตารางนี้ได้จากการคำนวณ ทำให้ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการการดูดซับ (Vohla *et al.*, 2011)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางประเภทที่สังเคราะห์ขึ้น

ตัวกลาง	ความสามารถในการดูดซับ (มก. P/ก.)	แหล่งอ้างอิง
LWA	3.47	Zhu <i>et al.</i> (1997)
LECA	7.98	Vohla <i>et al.</i> (2005)
Filtralite P™	2.5	Ádám <i>et al.</i> (2007)

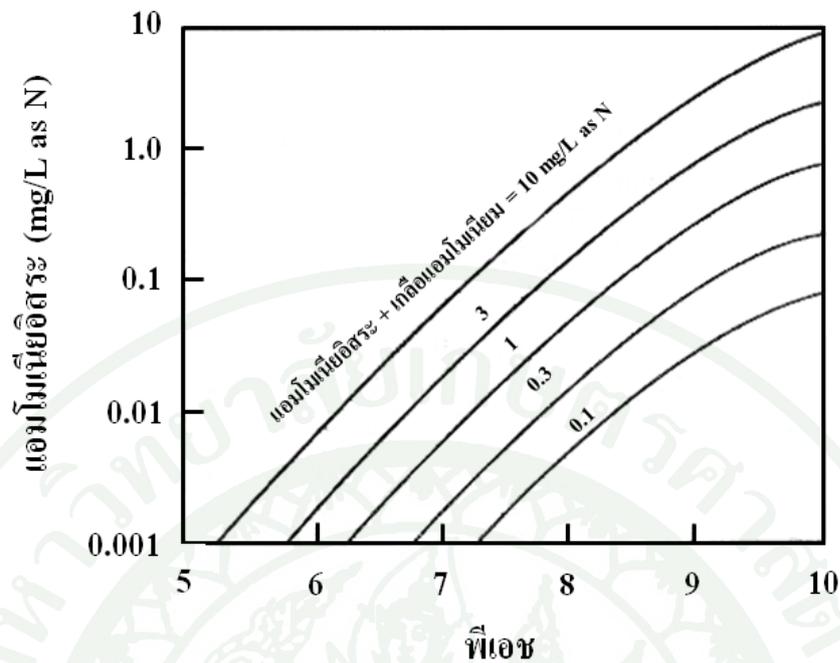
5. ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สามารถพบได้ในดิน น้ำ และบรรยากาศ ซึ่งไนโตรเจนที่มีอยู่ในธรรมชาติถูกใช้ไปในการสังเคราะห์โปรตีนในสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเมื่อสิ่งมีชีวิตตายไนโตรเจนจึงกลับคืนสู่ธรรมชาติ นอกจากนี้ภายในสิ่งขับถ่ายต่างๆ ที่มาจากสิ่งมีชีวิตเป็นอีกเส้นทางที่ทำให้ไนโตรเจนคืนกลับสู่ธรรมชาติ ไนโตรเจนที่มาจากซากพืชซากสัตว์อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจน และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันกลายเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะถูกออกซิไดส์โดยจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายอิงโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันในสภาวะที่มีอากาศเกิดเป็นไนไตรต์และไนเตรตตามลำดับ จากนั้นไนเตรตถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนและกลับคืนสู่บรรยากาศโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟายอิงภายใต้กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้ผลิตจะตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศเข้าสู่ภายในเซลล์หมุนวนเป็นวัฏจักรต่อไป ที่กล่าวมาเป็นเส้นทางหลักที่ทำให้เกิดเป็นวัฏจักรของไนโตรเจนแต่ยังมีเส้นทางอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรนี้อีกมากมายดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วัฏจักรไนโตรเจน

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชงชัย (2544)



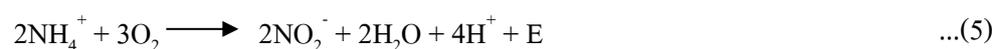
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปของแอมโมเนียกับค่าพีเอช

ที่มา: คัดแปลงจาก Sawyer et al. (2003)

7. กระบวนการไนตริฟิเคชัน

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรต โดยกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้ 2 เส้นทางคือ การหายใจและการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ (ธงชัย, 2554) โดยแต่ละเส้นทางจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยที่เรียกว่า ไนไตรเตชัน (Nitritation) และ ไนเตรเตชัน (Nitrataion) ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันของการหายใจจะเกิดขึ้นดังสมการที่ 5, 6 และ 7

การหายใจในขั้นตอนไนไตรเตชัน



การหายใจในขั้นตอนไนเตรเตชัน



สมการรวมการหายใจในกระบวนการไนตริฟิเคชัน



จุลินทรีย์กลุ่มออกโตโทรฟจะใช้สารอนินทรีย์ในการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายอิงจัดอยู่ในกลุ่มออกโตโทรฟที่ใช้แอมโมเนียเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน การสังเคราะห์เซลล์จะเป็นไปดังสมการที่ 8 และ 9 โดยกำหนดให้เซลล์จุลินทรีย์มีสูตรโครงสร้างเฉลี่ยเป็น $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$

การสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนเตรเตชัน

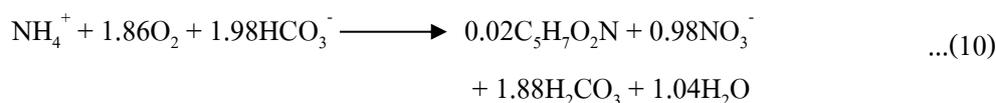


การสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนเตรเตชัน



จากนั้นทำการรวมสมการที่ 6, 7 และ 8 เข้าด้วยกันจะได้สมการที่เกิดขึ้นในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (สมการที่ 10)

กระบวนการไนตริฟิเคชัน



จากสมการที่ 6 เชื้อจุลินทรีย์ได้รับพลังงานจากการหายใจซึ่งพลังงานนี้จะถูกนำไปใช้ในการดึงคาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนต หรือ คาร์บอเนต มาสังเคราะห์เซลล์ ภายในสมการมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ดึงเอาไบคาร์บอเนตไปใช้และมีการปลดปล่อย ไฮโดรเจนไอออน จะทำให้ค่าพีเอชลดลงเนื่องจากมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ ทำให้เห็นว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันจำเป็นต้องมีสภาพค่าพีเอชที่เพียงพอเพราะกระบวนการดังกล่าวอาจทำให้ค่าพีเอชลดลงจนสถานะไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายอิง

7.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน

ก. อุณหภูมิ

อุณหภูมิระหว่าง 28-30 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียส อัตราการไนตริฟิเคชันจะลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ และจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายหยุดการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส (อัจฉรา, 2538)

ข. ออกซิเจน

ไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟาย ค่าออกซิเจนละลาย 1.0 มก./ล. หรือมากกว่าไม่ส่งผลด้านลบต่อกระบวนการ และระบบที่มีอายุสัปดาห์สูงค่าออกซิเจนละลายไม่ควรต่ำกว่า 0.5 มก./ล. (Stenstrom, 1980)

ค. พีเอช

เมื่อกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น ค่าพีเอชของระบบจะลดลงเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ใช้ความเป็นต่างในการเจริญเติบโต ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมจึงควรมีค่าเป็นด่างเล็กน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้ค่าพีเอชลดลงจนส่งผลต่อกระบวนการ Henze et al. (1997) รายงานช่วงของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายว่าควรมีค่า 7.5 - 9.0 และค่าพีเอชที่ทำให้เกิดอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงที่สุดคือ 8.4 (Wild et al., 1971)

8. ดีไนตริฟิเคชัน

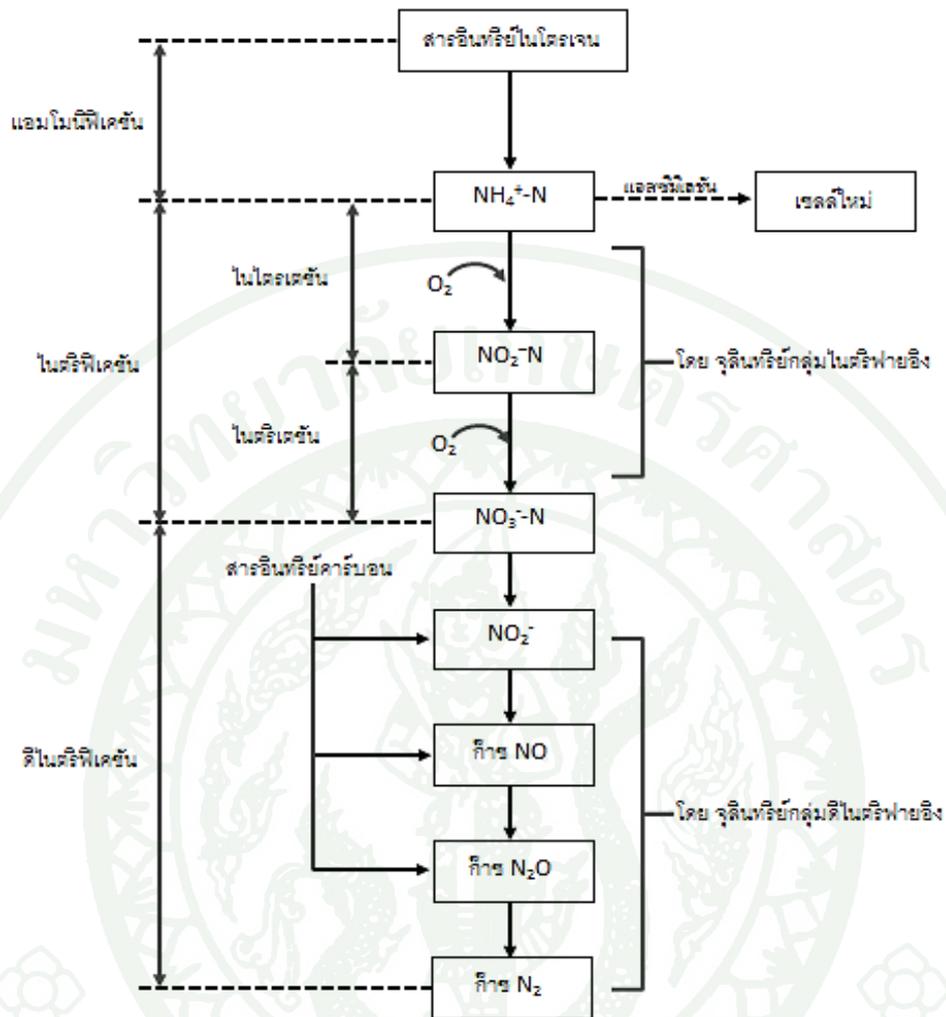
เป็นกระบวนการที่เมื่อไนโตรเจนอยู่ในรูปไนเตรต จะถูกลดหรือกำจัดออกจากระบบ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 2 เส้นทาง (Tiedje, 1988) ดังนี้

8.1 ดีไนตริฟิเคชันแบบแอสซิมิเลชัน (Assimilatory denitrification)

ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียเหมาะสมต่อการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์มากที่สุด และในขั้นตอนดีไนตริฟิเคชันที่แอมโมเนียถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรตเกือบทั้งหมด จะมีจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถลดรูปไนเตรตมาเป็นแอมโมเนียเพื่อใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนได้ (Gayle et al., 1989) ซึ่งไนเตรตจะถูกลดรูปเป็นแอมโมเนียได้โดยเอนไซม์ไนเตรรีดักเทสหลายชนิดก่อนที่จุลินทรีย์จะสามารถนำไปใช้สร้างเซลล์ใหม่ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชันได้

8.2 ดีไนตริฟิเคชันแบบดิสซิมิเลชัน (Dissimilatory denitrification)

ดีไนตริฟิเคชันแบบดิสซิมิเลชันจะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ (Anoxic) จุลินทรีย์ที่มีบทบาทจะเป็นทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟ แต่กลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะมีบทบาทมากกว่า และใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นในขั้นตอนดีไนตริฟิเคชันของระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนไปแล้วจึงต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนลงในระบบ ไนเตรตจะถูกลดรูปเป็นไนไตรต์ ก๊าซไนตริกออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ และ ก๊าซไนโตรเจนตามลำดับ (ภาพที่ 5) ก๊าซไนโตรเจนจะสามารถถูกขับออกจากร่างกายได้ง่าย (U.S. EPA, 1975)



ภาพที่ 5 กลไกการกำจัดไนโตรเจน

ที่มา : ธงชัย (2554)

9. การใช้ตัวกลางในการกำจัดไนโตรเจน

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่องมักประสบปัญหาในด้านการกำจัดไนโตรเจน เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้กำจัดไนโตรเจนเป็นกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ การใช้ตัวกลางเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้เกาะจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อรักษาเชื้อกลุ่มนี้ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานเมื่อน้ำเสียเข้ามา (Wijffels and Tramper, 1995) ตารางที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนโดยใช้ตัวกลาง

ตารางที่ 3 งานวิจัยที่ศึกษากำจัดไนโตรเจนโดยใช้ตัวกลาง

ผู้ทำการศึกษา	รูปแบบระบบ	ตัวกลาง	ประสิทธิภาพ
กลอยกาญจน์ (2544)	ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน	- ดินปนทราย	มีอัตราการกำจัดไนโตรเจนร้อยละ 94.6
จินตนา (2549)	ฟิล์มตรึงซีเควนซ์แบคทีเรีย (Sequencing batch biofilm reactor, SBBR)	- เส้นใยในลอน	มีอัตราการกำจัดไนโตรเจนมากกว่า ร้อยละ 80
Lekang and Kleppe (1999)	ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ศึกษาโดยใช้คอลัมน์สูง 1.5 ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.	- LECA - วงแหวนพลาสติกแคลดเนส (Kaldnes rings) - วงแหวนพลาสติกนอร์ตัน (Norton rings) - แผ่นหญ้าเทียมฟินทิวฟ (Finturf artificial grass)	มีอัตราการไนตริฟิเคชัน ร้อยละ 100 ร้อยละ 80 ร้อยละ 60 ร้อยละ 40
Kim et al. (2000)	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแบทช์ (Batch bioreactor)	- เม็ดแบเรียม อัจจินต (Ba-alginate beads) - เม็ดแคลเซียม อัจจินต (Ca-alginate beads)	มีอัตราการไนตริฟิเคชัน ร้อยละ 94 ร้อยละ 87

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lekang and Kleppe (1999) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวกลางหลายชนิดที่ใช้ในระบบ Trickling Filter ซึ่งตัวกลางที่ศึกษาประกอบด้วย ดินเหนียวสังเคราะห์ (Light Expanded Clay Aggregate, LECA) ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม 3 ขนาดประกอบด้วยขนาด 2-7 4-8 และ 2-4 มม. โดยขนาด 2-7 มม. จะแตกต่างกับอีก 2 ขนาด เนื่องจากมีการเคลือบผิวด้วยโดโลไมท์ (Dolomite) และพลาสติกสังเคราะห์ที่มีรูปร่างเป็น วงแหวนแคลดเนส (Kaldnes rings) วงแหวนนอร์ตัน (Norton rings) และแผ่นหญ้าเทียมฟินทิวฟ (Finturf artificial grass) ศึกษาโดยใช้คอลัมน์สูง 1.5 ม. เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 11 ซม. ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ ฟอสเฟต เท่ากับ 1.5 และ 1 มก./ล. ตามลำดับ เติมเข้าคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของตัวกลางที่เป็น LECA ทุกขนาด และ แผ่นม้วนพินทริฟ เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 7-8 สัปดาห์ แต่ในตัวกลางสองชนิดที่เหลือ ภายใต้ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 140 วัน ไม่พบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไนตริฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.2 มิลลิกรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ต่อตารางเมตรต่อวัน และร้อยละประสิทธิภาพการไนตริฟิเคชันของตัวกลาง LECA ทุกขนาด, วงแหวนแคลคเนส แหวนนอร์ตัน และแผ่นม้วนพินทริฟ มีค่าเท่ากับ 100 80 60 และ 40 ตามลำดับ

ขนาดของรูพรุนมีผลต่อประสิทธิภาพของในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

Matsumara et al. (1997) ได้ทำการศึกษา โดยใช้วัสดุตัวกลางในการตรึงเซลล์ Macro-porous cellulose (AQUACEL) วัสดุและขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมจะช่วยให้การซึมผ่านของน้ำเสียและอากาศเข้าสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่ตรึงกับตัวกลางได้ง่าย

Yamaguchi et al. (1996) ทำการศึกษากำจัดไนโตรเจน โดยใช้ตัวกลางที่มีรูพรุนในสภาวะที่มีความสอดคล้องกับการใช้งานจริงของระบบบำบัดน้ำเสียแบบซึมผ่านชั้นดินแบบรวดเร็ว (Rapid Infiltration, RI) โดยใช้คอลัมน์สูง 50 ซม. จำนวน 6 คอลัมน์ ภายในบรรจุด้วยตัวกลางรูพรุนที่มีอัตราส่วนของ หินแกรนิตหรือทราย:ดิน เท่ากับ 98:2 ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30 และ 10 องศาเซลเซียส ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียระหว่าง 20-60 มก./ล. พบการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์หลังการเดินระบบ 3-5 วัน สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ ประมาณ 50 วัน สำหรับอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีค่าระหว่าง 6-9 ชม.⁻¹ และ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสมีค่าระหว่าง 0.4-1 ชม.⁻¹

กลอยกาญจน์ (2544) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์โดยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน ตัวกลางที่เป็นดินปนทรายสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ โดยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากที่ช่องว่างในการถ่ายเทอากาศและให้จุลินทรีย์ที่เกาะตัวกลาง สัมผัสอาหาร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 94.60

Bavor et al. (1995) รายงานว่าการใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปสามารถกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ร้อยละ 79 เมื่อน้ำเสียมีอัตราการระบรทุกไนโตรเจนต่ำกว่า 1,600 กรัม

ไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อปี ซึ่งกลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจนคือกลไกทางชีวภาพ โดยน้ำเสียดึงมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าว เช่น อุณหภูมิ พีเอช และ ค่าความเป็นด่าง เป็นต้น

Vohla et al. (2007) ทำการศึกษาพลวัตของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และคาร์บอน ที่สะสมภายในตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวราบ (Horizontal subsurface flow constructed wetland, HSSF CW) มีการสะสมฟอสฟอรัสในตัวกลาง (ตัวกลางทรายหยาบ) และมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากระบบเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการอึดตัวด้วยฟอสฟอรัสของตัวกลางภายหลังการใช้งาน 8 ปี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางประเภทซีเล้าจากการเผาหินน้ำมัน (Oil shale) พบว่าการทดลองแบบเบดซ์ที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสดีกว่าการทดลองแบบไหลต่อเนื่องในระบบจริง ในการใช้งานระบบจริงภายหลังการเดินระบบเป็นเวลา 4 เดือน มีร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 71 ต่อมาร้อยละประสิทธิภาพลดลงจนเหลือประมาณ 10-20 เนื่องจากการอึดตัวของตัวกลางและการอุดตันที่เกิดจากชั้นฟิล์มชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวกลาง

ส่วนผสมของตัวกลางที่ใช้ในการทดลองนี้ นำมาจาก สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย มีองค์ประกอบคือ เปลือกหอยแครง ดินตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา และสารยึดประสาน โดยมีอัตราส่วน 5:4:1 นำมาสังเคราะห์เป็นรูปร่างต่างๆ ได้แก่ เม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม

1.1 เม็ดยา

ตัวกลางรูปร่างนี้ถูกเตรียมขึ้น โดยการใช้เครื่องอัดไฮโดรลิกเป็นตัวขึ้นรูป ใช้แรงอัด 0.5 ตัน อัดเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำตัวกลางไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 1 ชม. หลังเผาตัวกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 12 และ 2 มม. ตามลำดับ มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 ก. และมีรูปร่างดังภาพที่ 6ก

1.2 ทรงกระบอก

ตัวกลางรูปร่างนี้ถูกบดผสมแบบแห้ง เมื่อขึ้นรูปเสร็จตัวกลางจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 1 ชม. หลังเผาตัวกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวประมาณ 4-5 และ 7-10 มม. มีน้ำหนักประมาณ 0.28-0.34 ก. และมีรูปร่างดังภาพที่ 6ข

1.3 ทรงกลม

ตัวกลางรูปร่างนี้ถูกบดผสมแบบแห้ง เมื่อขึ้นรูปเสร็จตัวกลางจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 1 ชม. หลังเผาตัวกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-8 มม. มีน้ำหนักประมาณ 0.3-0.4 ก. และมีรูปร่างดังภาพที่ 6ค

จากนั้นนำตัวกลางทุกรูปข้างไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุนปรากฏ และการดูดซับน้ำ และพื้นที่ผิวจำเพาะ



ภาพที่ 6 ตัวกลางรูปเม็ดยา (ก); ตัวกลางรูปทรงกระบอก (ข); ตัวกลางรูปทรงกลม (ค)

วิธีการ

1. ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง

ทำการศึกษาโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับ โดยนำตัวกลางแต่ละรูปร่างปริมาณ 2.5-2.8 ก. ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 50-110 มก. P/ล. ปริมาตร 200 มล. (เตรียมจาก KH_2PO_4) ใส่เครื่องเขย่า (New Brunswick model 663) ที่ตั้งความเร็วรอบไว้ 175 รอบ/นาที เขย่าเป็นเวลา 36 ชม. เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าออร์โธฟอสเฟต ค่าที่ได้ถูกนำไปพล็อตในกราฟของแลงเมียร์ (สมการที่ 11 และ 12) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละรูปร่าง

สมการแลงเมียร์ (Ho, 2006)

$$q_e = \frac{q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e} \quad \dots(11)$$

โดยที่ q_e = ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับบนหนึ่งหน่วยของตัวกลาง (มก./ก.)

q_m = ความสามารถในการดูดซับมลสารสูงสุด (มก./ก.)

K_a = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง (ล./มก.)

C_e = ความเข้มข้นมลสารในสารละลายที่เหลือจากการดูดซับ (มก./ล.)

สมการแลงเมียร์ในรูปแบบเชิงเส้น

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_a q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (12)$$

นำผลการทดลองไปพล็อตค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_e}$ และ $\frac{1}{C_e}$ เพื่อคำนวณหาค่า q_m และ K_a

2. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง

2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

ใช้น้ำเสียที่เตรียมตามสูตรดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง

สารอาหารหลัก	ความเข้มข้น (ก./ล.)	สารอาหารเสริม	ความเข้มข้น (ก./ล.)
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.3-2.1	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
NaHCO_3	0.35-2.90	KI	0.03
K_2HPO_4	0.01	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.6	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.07	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
EDTA	0.01	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.00625	H_2BO_3	0.15

ที่มา : Kuba et al. (1993)

2.2 เชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นเชื้อกลุ่มไนโตรฟายที่นำมาจากตะกอนหมุนเวียน (Return sludge) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งที่สามารถกำจัดธาตุอาหารได้ จากแผนกบำบัดน้ำทิ้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดิน เชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวจะถูกนำมาเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ที่เป็นแบบซีควนซ์ แบตช์ (Sequencing batch reactor, SBR) ดังภาพที่ 7 ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

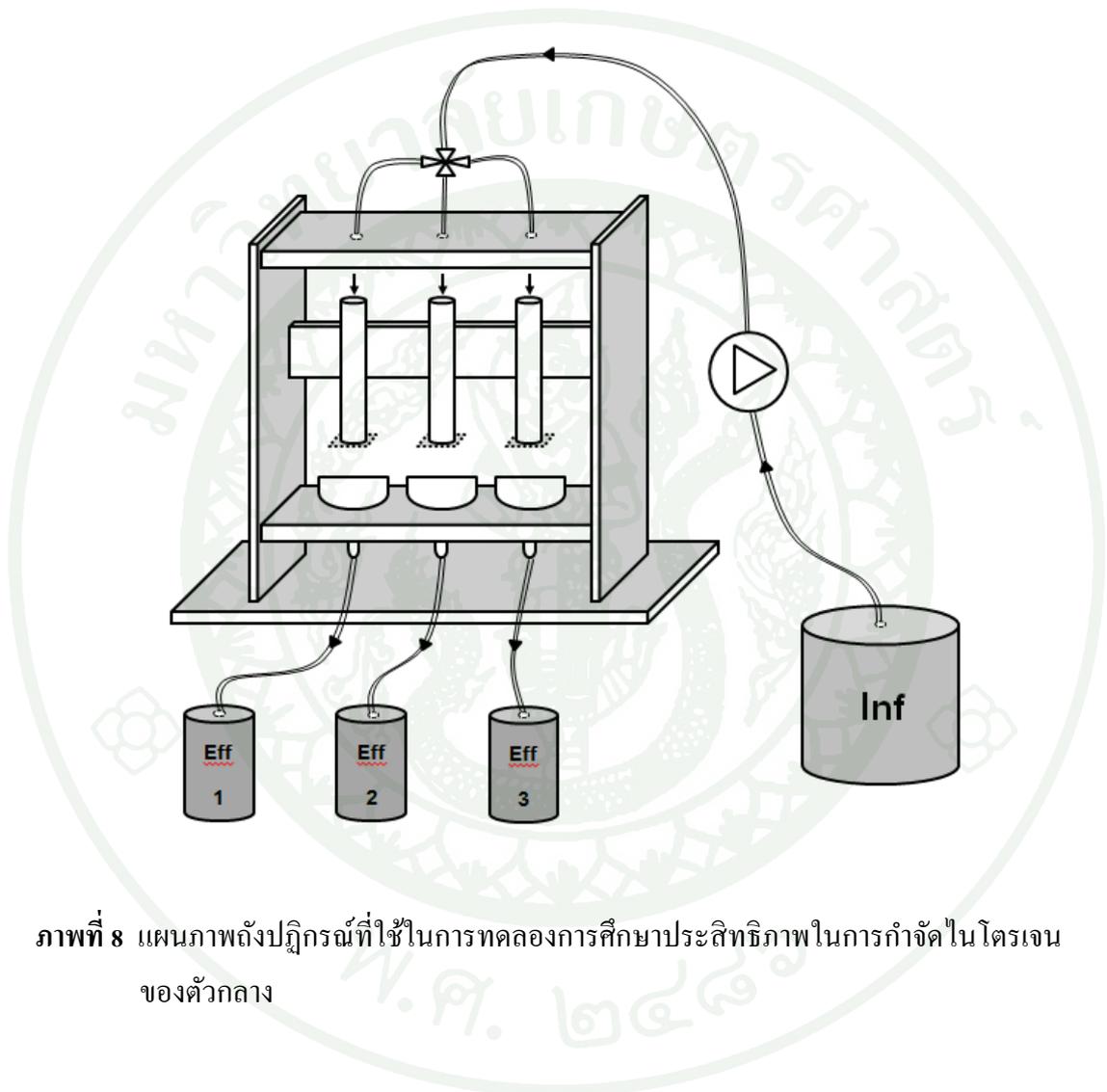


ภาพที่ 7 เชื้อกลุ่มไนโตรฟายที่ใช้ในการทดลอง

2.3 ถังปฏิกรณ์

ใช้ท่ออะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 24 และ 150 มม. ตามลำดับ ซึ่งใช้ท่ออะคริลิกทั้งหมด 3 เส้น ภายในท่อแต่ละท่อใส่ตัวกลางแต่ละรูปร่างให้และปลายท่อถูกปิดด้วยมุ้งลวด ท่ออะคริลิกจะถูกยึดติดกับแท่นวางดังภาพที่ 8 และ 9 ด้านบนของถังปฏิกรณ์ ประกอบด้วยสายยางที่ถูกแบ่งเป็น 3 ทาง เพื่อให้ น้ำเสียหยดลงสู่ตัวกลาง และด้านล่างของ ถังปฏิกรณ์ประกอบด้วยกรวยรับน้ำเสียที่หยดออกจากท่ออะคริลิก 3 กรวย ที่ปลายของกรวยจะถูกติดด้วยสายยางเพื่อใช้ในการรวบรวมน้ำเสียที่ออกจากระบบ นำตัวกลางแต่ละชนิดปริมาณ 45 ก. บรรจุลงในท่ออะคริลิกแต่ละท่อเมื่อบรรจุแล้วชั้นตัวกลางจะมีความสูงประมาณ 10 ซม. และนำไป

ยึดติดกับแท่นวาง ก่อนเดินระบบเติมเชื้อจุลินทรีย์โดยการ หยดเชื้อลงตัวกลางที่บรรจุลงในคอถัมน์ แล้วเป็นเวลา 10 ชม. จากนั้นเริ่มเดินระบบโดยปั๊มน้ำเสียที่มีอัตราการบรรทุกไนโตรเจน 0.22-0.24 กก. N/ตร.ม.-วัน โดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารเคมี (LongerPump™ model BT00-600M) เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ทุกๆ 24 ชม. วิเคราะห์ค่าพีเอช แอมโมเนีย และวิเคราะห์ไนเตรต



ภาพที่ 8 แผนภาพถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง



ภาพที่ 9 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

3.1 ตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นตัวกลางที่คัดเลือกจากการทดลองก่อนหน้า ซึ่งเป็นรูปร่างที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนดีที่สุด

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์

ใช้น้ำเสียที่เตรียมตามสูตรดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบของน้ำเลี้ยงสังเคราะห์ในการศึกษาประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

สารอาหารหลัก	ความเข้มข้น (ก./ล.)	สารอาหารเสริม	ความเข้มข้น (ก./ล.)
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.3-2.1	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
NaHCO_3	0.35-2.90	KI	0.03
K_2HPO_4	0.01	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
KH_2PO_4	0.044	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.6	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.07	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
EDTA	0.01	H_2BO_3	0.15
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.00625		

ที่มา : คัดแปลงจาก Kuba et al. (1993)

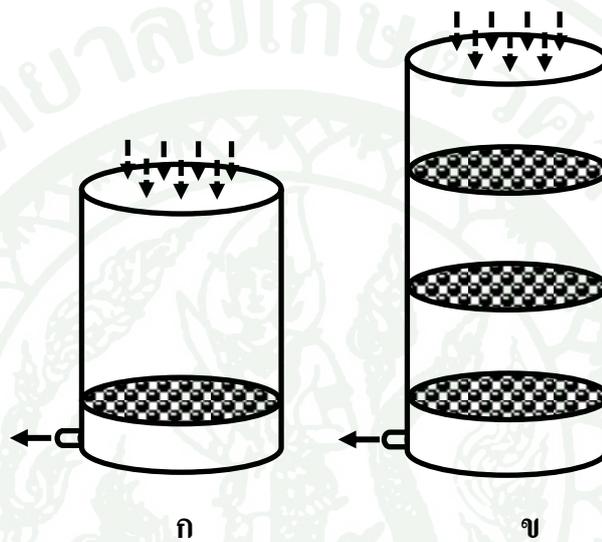
3.3 เชื้อจุลินทรีย์

ใช้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายที่นำมาจากแหล่งเดียวการทดลองที่ 3

3.4 ถังปฏิกรณ์

ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 2 รูปแบบ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 12 ซม. ภายในบรรจุตัวกลาง 510 ก. เมื่อบรรจุแล้วชั้นตัวกลางมีความสูง 10.5 ซม. (ภาพที่ 10ก และ 11ก) และ คอลัมน์ที่มีลักษณะเป็นชั้นประกอบกัน สามชั้น แต่ละชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 8 ซม. ภายในบรรจุตัวกลาง 170 ก. เมื่อบรรจุแล้วชั้นตัวกลางมีความสูง 3.5 ซม. ด้านปลายของทุกชั้นถูกเจาะให้เป็นรูคล้ายตะแกรงเพื่อให้น้ำเลี้ยงหยดผ่านลงสู่ชั้นล่างได้ (ภาพที่ 10ข และ 11ข)

ก่อนเดินระบบเติมเชื้อจุลินทรีย์โดยการหยดเชื้อลงตัวกลางที่บรรจุลงในคอลัมน์แล้วเป็นเวลา 10 ชม. จากนั้นเริ่มเดินระบบหยดน้ำเสียที่มีอัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.14-0.15 กก. N/ตร.ม.-วัน และ 0.018-0.021 กก. P/ตร.ม.-วัน ให้ซึมผ่านชั้นตัวกลาง น้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางถูกรวบรวมและเก็บไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย ไนเตรต และสภาพต่าง



ภาพที่ 10 แผนภาพถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดี่ยว แบบคอลัมน์ชั้นเดียว (ก); ถังปฏิกรณ์สามชั้น (ข)



ภาพที่ 11 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายใน ถังปฏิกรณ์เดี่ยว แบบคอลัมน์ชั้นเดียว (ก); ถังปฏิกรณ์สามชั้น (ข)

4. การวิเคราะห์การเกาะตัวของเชื้อกลุ่มในτριฟาย

ศึกษาโดยการส่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) โดยใช้ตัวกลางที่ผ่านการทดลองแล้วพบว่าสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ ทำการอบแห้งที่เตาอบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชม. ก่อนนำตัวอย่างส่งวิเคราะห์

5. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวกลางและคุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลาง โดยมีพารามิเตอร์ วิเคราะห์ และเครื่องมือการตรวจวิเคราะห์ ดังตารางที่ 6, 7 และ 8

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความหนาแน่นรวม	ชุดทดสอบความหนาแน่น
ความหนาแน่นปรากฏ	ชุดทดสอบความหนาแน่น
ความพรุนปรากฏ	ชุดทดสอบความหนาแน่น
ความสามารถในการดูดซับน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ	ชุดทดสอบความหนาแน่น เครื่อง BET

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ของน้ำเสียด้อย่าง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
พีเอช	- เครื่องวัดพีเอช
แอมโมเนีย	- 4500-NH ₃ C Titrimetric Method (APHA, AWWA, and WEF., 2005)
ไนเตรต	- Colorimetric analysis, Hydrazine Method (APHA, AWWA, and WEF., 2005) - เครื่องไอออนโคม่าโทกราฟี

ออร์โทฟอสเฟต	- 4500-P E Ascorbic Acid Method (APHA, AWWA, and WEF., 2005)
สภาพด่าง	- วิธีมาตรฐาน 2320 B. Titration Method (APHA, AWWA, and WEF., 2005)

ตารางที่ 8 ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือวิเคราะห์

เครื่องมือวิเคราะห์	ยี่ห้อ/รุ่น
สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	HACH (DR/4000U)
ชุดทดสอบความหนาแน่น	Mettler Toledo (MS204S/01)
เครื่องวัดพีเอช	Hanna (H23222-01)
เครื่องไอออนโคมาโทกราฟี	Metrohm (882 Compact IC plus)
เครื่อง BET	Quantachrome (Autosorb-1)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	Philips (XL30 & EDAX)

ผลและวิจารณ์

1. คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

หลังจากทำการสังเคราะห์ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม ตัวกลางดังกล่าวถูกนำไปตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ผลการตรวจวัดเป็นไปดังตารางที่ 9 พบว่าตัวกลางเม็ดยา มีความหนาแน่นรวมที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับตรงกลางทรงกระบอกและทรงกลม เพราะในขั้นตอนของการเตรียมตัวกลาง ตัวกลางเม็ดยามีการใช้เครื่องอัดเพื่อให้เกิดเป็นรูปทรงของเม็ดยา ส่งผลให้มีความรื้อยละความพรุนและค่ารื้อยละการดูดซับน้ำน้อยที่สุด พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม มีค่าเท่ากับ 7.276 12.750 และ 7.282 ตามลำดับ เรียงลำดับจากพื้นที่ผิวจำเพาะจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ทรงกระบอก>ทรงกลม>เม็ดยา ตัวกลางทรงกระบอกมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Qiu *et al.* (2010) ได้ศึกษาตัวกลางที่ใช้เส้นใยเชื้อจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพ (Bio filter) ตัวกลางที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ซีโอไลต์ คาร์บอนแอคทีฟ และ เซรามิก ขนาด 3-5 มม. มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 6.58 3.56 และ 4.16 ตร.ม./ก. ตามลำดับ ซึ่งตัวกลางทุกรูปร่างในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

ตารางที่ 9 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

ตัวกลาง	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่นปรากฏ	รื้อยละความพรุน	รื้อยละการดูดซับน้ำ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)
เม็ดยา	1.63	2.62	37.96	23.34	7.276
ทรงกระบอก	1.36	2.66	48.76	35.97	12.750
ทรงกลม	1.35	2.78	52.13	39.25	7.282

2. ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง

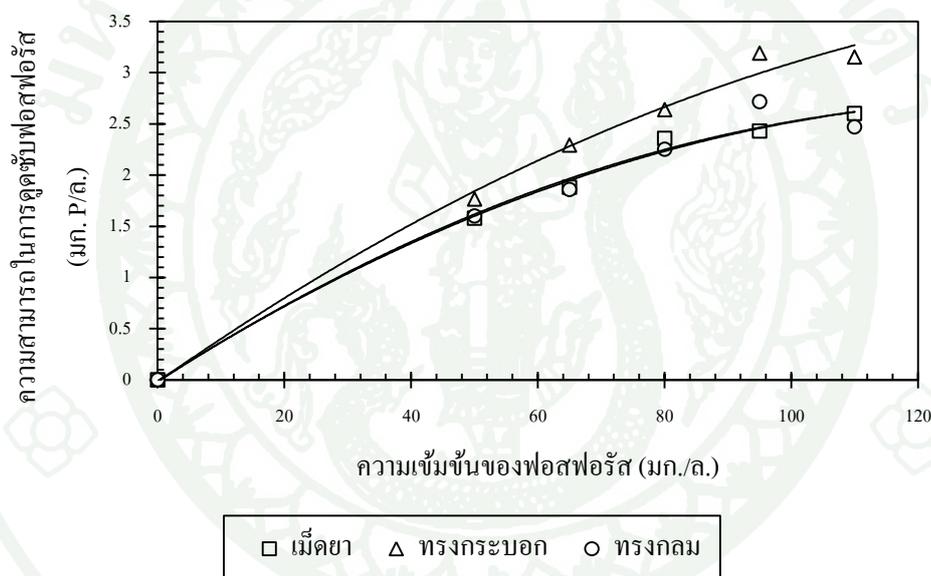
การดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางในการทดลองนี้ ได้ใช้สมการแลงเมียร์ในการอธิบายการดูดซับ เนื่องจากในงานวิจัยก่อนหน้านี้ทำการเตรียมส่วนผสมของตัวกลางได้ทำการศึกษาแล้วว่าตัวกลางชนิดนี้มีการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ เพื่อให้ค่าความสามารถในการดูดซับสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้จึงต้องใช้สมการแลงเมียร์เพื่ออธิบายการดูดซับของงานวิจัยนี้เช่นกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม มีค่าเท่ากับ 0.931 0.868 และ 0.826 ตามลำดับ (ตารางที่ 9) ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือ

จากตารางที่ 10 และ ภาพที่ 12 พบว่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และทรงกลม มีค่าเท่ากับ 4.85 7.63 และ 4.95 มก. P/ก. ตามลำดับ และเรียงลำดับความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ทรงกระบอก>ทรงกลม>เม็ดยา ซึ่งการเรียงลำดับดังกล่าวสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ตัวกลางทุกชนิดมีส่วนผสมที่เหมือนกันและทำการทดลองในทุกสภาวะที่เหมือนกัน ทำให้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคือรูปร่างและพื้นที่ผิวจำเพาะ การที่ตัวกลางมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสมากขึ้นเช่นกัน (Brooks et al., 2000; Xu et al., 2006)

ค่า K_d ในสมการแลงเมียร์คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่ได้จากการทดลอง จากตารางที่ 10 ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และทรงกลม มีค่า K_d คือ 0.016 0.010 และ 0.018 ล./มก. P ตามลำดับ ซึ่งค่า K_d มีค่าน้อยกว่า 1 ในตัวกลางทุกรูปร่าง ซึ่งนิพนธ์และคณิตา (2550) ให้เหตุผลว่า เมื่อค่า K_d ในการทดลองมีค่าน้อยกว่า 1 จะเกิดการดูดซับที่พื้นผิวน้อย ในการทดลองไอโซเทอมการดูดซับเมื่อทำการเขย่าตัวกลางกับน้ำสังเคราะห์ที่มีฟอสฟอรัส เมื่อถึงเวลาสมดุลของการทำปฏิกิริยาที่ 36 ชม. พบว่ามีตะกอนสีขาวขุ่นเกิดขึ้นรอบตัวกลาง ตะกอนดังกล่าวคือตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ (Hap, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) เป็นไปตามทฤษฎีของการตกตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสที่ Vohla et al. (2011) ในงานวิจัยของ Zhu et al. (2003) ได้กล่าวว่าแคลเซียมทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตเกิดการตกตะกอนทางเคมีในสภาวะที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 9 สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่แคลเซียมในเปลือกหอยทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ที่พีเอชอยู่ในช่วง 10-11 สรุปได้ว่า การดูดซับฟอสฟอรัสเกิดขึ้นในพื้นที่ผิวน้อย ส่วนใหญ่จะเกิดเป็นกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมากกว่า ทำให้ค่า K_d มีค่าน้อยกว่า 1

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่ของตัวกลางได้จากไอโซเทอม

ตัวกลาง	q_m (มก. P/ก.)	K_a (ล./มก. P)	R^2
เม็ดยา	4.85	0.016	0.931
ทรงกระบอก	7.63	0.010	0.868
ทรงกลม	4.95	0.018	0.826



ภาพที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของตัวกลาง

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง

การทดลองในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ และหยคน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียผ่านชั้นตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์ เมื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางไปวิเคราะห์พบว่าค่าพีเอชมีการลดลงอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 13ก ในทางทฤษฎีปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน และนอกจากนี้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายจะดึงไบคาร์บอเนตในน้ำเสียไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งไบคาร์บอเนตเป็นสารบัฟเฟอร์ชนิด

หนึ่ง เมื่อบำบัดเพอร์ถูกใช้ไปและปฏิกิริยามีการปล่อยไฮโดรเจนไอออน จึงทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่ามีกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นในระบบ (ธงชัย, 2544)

เมื่อป้อนน้ำเข้าระบบที่มีอัตราภาระไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิว 0.22-0.24 กก. N/ตร.ม.-วัน เมื่อน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางพบว่าการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียเป็นไปดังภาพที่ 13 การกำจัดแอมโมเนียเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 12 วัน และที่เวลา 47 วัน ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และทรงกลมมีร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 48.4 53.1 และ 53.1 ตัวกลางทุกรูปร่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Lekang and Kleppe (1999) ที่ศึกษาการไนตริฟิเคชันโดยใช้ตัวกลาง LECA ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาโดยใช้ LECA ที่เป็นเม็ดกลมและมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-10 มม. ระบบในการทดลองเป็นระบบโปรยกรอง ใช้คอลัมน์ทำจากท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มม. ยาว 150 ซม. เป็นที่บรรจุตัวกลาง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนีย 0.106 กก. N/ตร.ม.-วัน พบว่ามีค่าร้อยละการกำจัดแอมโมเนียสูงถึง 100 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบถังปฏิกรณ์และการเดินระบบกับงานวิจัยนี้พบว่าส่วนที่แตกต่างกันคือ อัตราภาระไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวของน้ำเข้า และ ขนาดของคอลัมน์

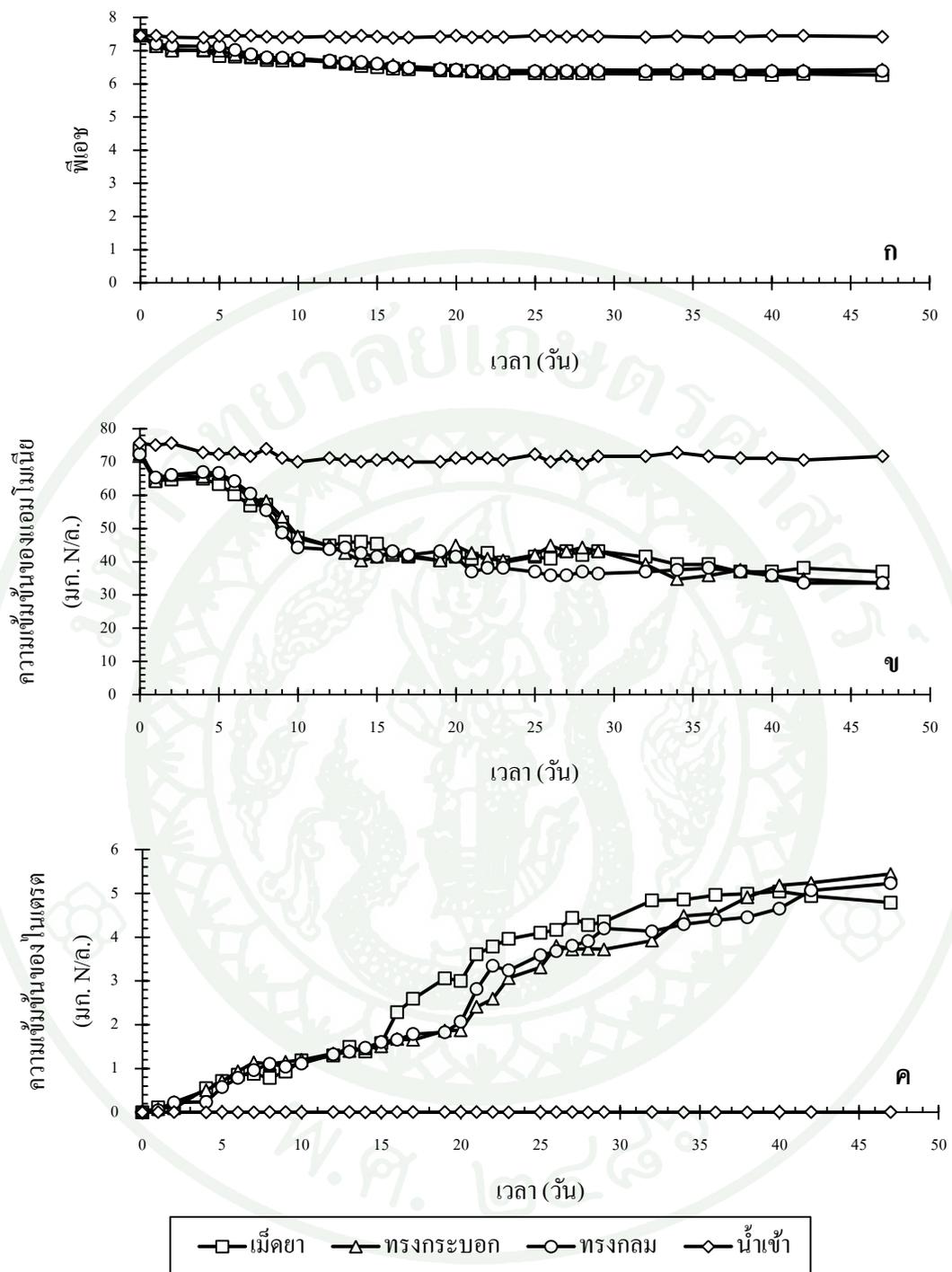
อัตราภาระไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวของน้ำเข้าของงานวิจัยในส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 0.22-0.24 กก. N/ตร.ม.-วัน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Lekang and Kleppe (1999) ที่มีค่าอัตราภาระไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.106 กก. N/ตร.ม.-วัน พบว่ามีค่าต่างกันถึง 2 เท่า แสดงให้เห็นว่าการที่ระบบมีอัตราภาระไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวน้อยระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียที่ดีกว่า ซึ่งเป็นไปตามการทดลองของ Hwang et al. (2009) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระไนโตรเจนต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกลางที่เป็นเส้นใยกลวงที่ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟิล์มตรึงชีวภาพ (Biofilm reactor) พบว่าเมื่อตั้งระบบให้มีสภาวะทุกสภาวะเหมือนกันและทำการแปรผันอัตราภาระไนโตรเจนของน้ำเข้า อัตราการไนตริฟิเคชันจะลดลงเมื่ออัตราภาระไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

ขนาดของคอลัมน์ส่งผลถึงระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ (Hydraulic retention time, HRT) หากอัตราการไหลลงที่ความยาวของคอลัมน์จะเป็นตัวที่ช่วยเพิ่มระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ชั้นตัวกลางที่ถูกบรรจุในคอลัมน์มีความสูงเพียง 10 ซม. ทำให้ระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์นี้มีค่าน้อย จากงานวิจัยของ Dong et al. (2011) ได้ศึกษาผลของการแปรผันค่าระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ ในการไนตริฟิเคชันของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายที่ตรึงบนตัวกลางที่ทำจากโพลียูรีเทนแบบน้ำ (Waterborne polyurethane) การศึกษาทำในถัง

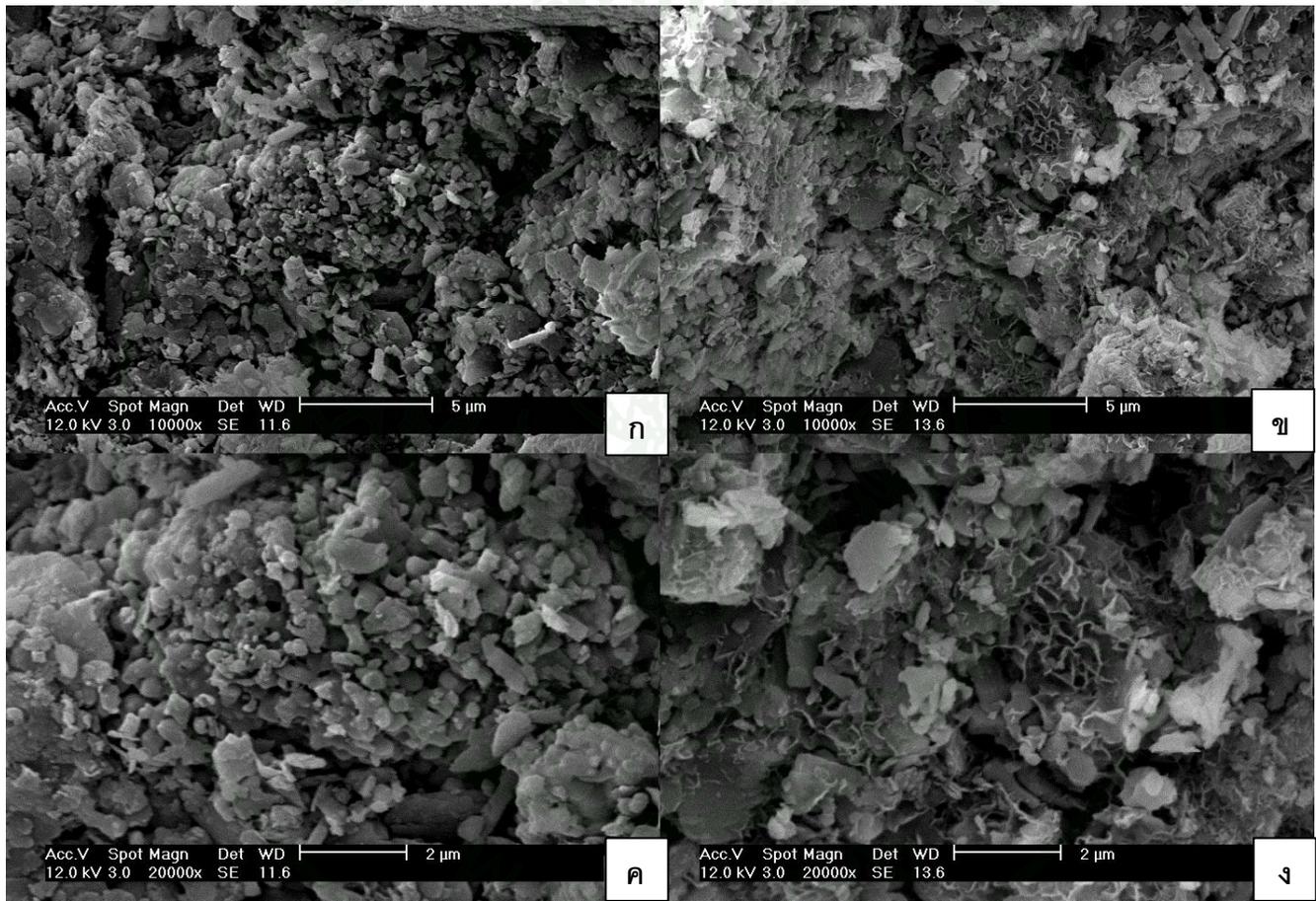
ปฏิกรณ์ที่เป็นหลอดทรงกลม (Inner circulation tube) และแปรผันระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ โดยปรับอัตราการไหลของน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียลดลงเมื่อระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ลดลง ดังนั้นระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์จึงอาจเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียของการทดลองในส่วนนี้มีค่าน้อย

จากภาพที่ 13c ในเตรตที่เกิดขึ้นเกิดจากกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟาย เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตในสภาวะที่มีอากาศ หลังจากเดินระบบเป็นเวลา 47 วัน น้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม มีความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 4.79 5.44 และ 5.23 มก. N/ล. ตามลำดับ เมื่อคำนวณสมมูลไนโตรเจนพบว่าแอมโมเนีย 1 โมลเปลี่ยนเป็นไนเตรต 0.52 0.56 และ 0.54 โมล ตามลำดับ ในทางทฤษฎีการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันจากสมการที่ 10 แอมโมเนียม 1 โมลเปลี่ยนเป็นไนเตรต 0.98 โมล (ธงชัย, 2544) ในสภาวะที่กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การที่ค่าสมมูลไนโตรเจนของงานวิจัยในส่วนนี้มีค่าน้อยกว่าในทางทฤษฎีคาดว่าเกิดขึ้นจากอากาศผ่านเข้าไปไม่ถึงตัวกลางที่บรรจุในส่วนล่างของคอลัมน์ และคอลัมน์มีขนาดสั้นทำให้มีระยะเวลาที่เก็บทางชลศาสตร์ที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของศุทธวดี (2554) ที่ในการทดลองเบื้องต้นได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรต ของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดงที่นำมาเลี้ยงในระบบซีควนซ์ซึ่งแบบซ์ (เชื้อจากแหล่งเดียวกับงานวิจัยนี้) พบว่าสมมูลไนโตรเจนของกระบวนการไนตริฟิเคชัน 1 โมลของแอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนเตรต 0.79 โมล มีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากกว่า

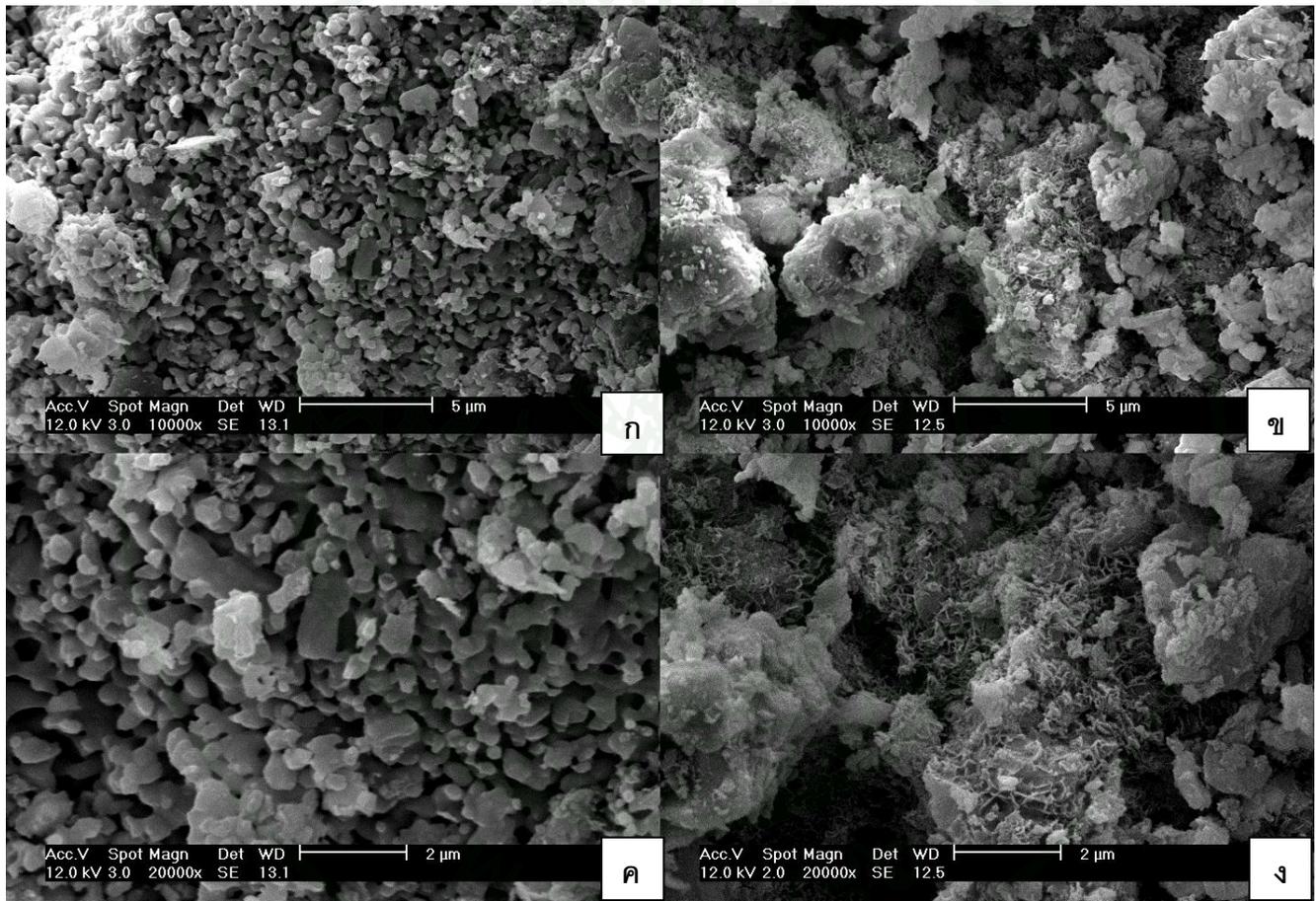
หลังเดินระบบเป็นเวลา 47 วัน ได้นำตัวกลางจากถังปฏิกรณ์ไปศึกษาการเกาะของเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่ามีสิ่งที่ลักษณะคล้ายเส้นใยเกาะตามพื้นผิวของตัวกลาง ซึ่งภาพที่ 14 15 และ 16 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงภายในตัวกลางที่เกิดขึ้น เส้นใยที่เกิดขึ้นคาดว่าเป็นเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟาย จากงานวิจัยของ Delatolla et al. (2009) ที่ศึกษาลักษณะของเชื้อกลุ่มไนตริฟายในชั้นฟิล์มชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าเชื้อไนตริฟายในชั้นฟิล์มชีวภาพมีลักษณะที่เป็นก้อนปุย ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้เชื้อที่นำไปถ่ายภาพเป็นเชื้อที่ผ่านการอบแห้งแล้วไม่ได้เตรียมตัวอย่างทางเคมีก่อนนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทำให้เชื้อมีลักษณะที่แห้งทำให้เชื้อตกลงจนมีลักษณะคล้ายเส้นใย



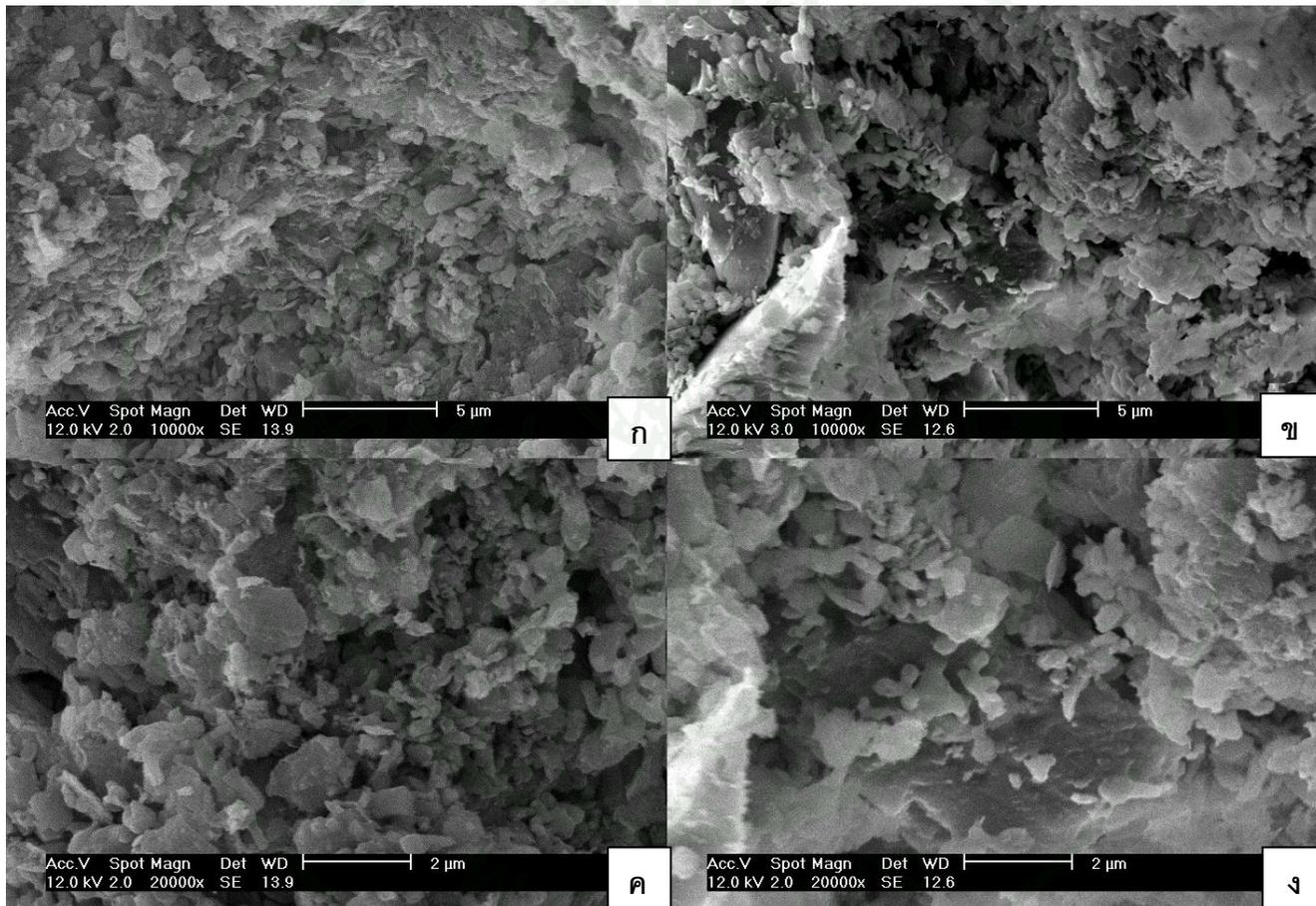
ภาพที่ 13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (ก); ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ข); ความเข้มข้นของไนเตรต (ค) เทียบกับเวลา ของตัวกลางรูปร่างต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์



ภาพที่ 14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางเม็ดยาที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ก); หลังเลี้ยงเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ค); หลังเลี้ยงเชื้อ (ง)



ภาพที่ 15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางทรงกระบอกที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ก); หลังเลี้ยงเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยงเชื้อ (ค); หลังเลี้ยงเชื้อ (ง)

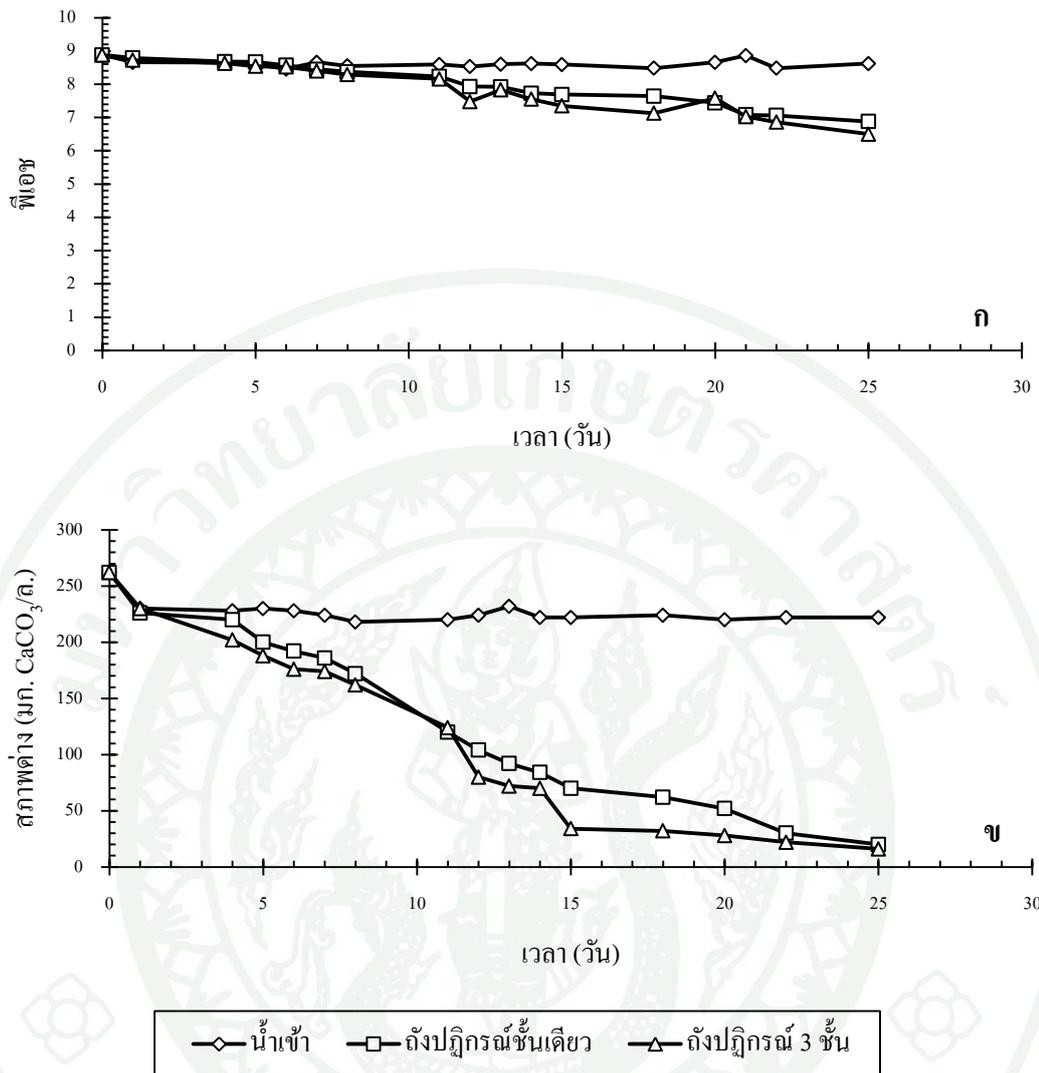


ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกลางทรงกลมที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก่อนเลี้ยวเชื้อ (ก); หลังเลี้ยวเชื้อ (ข) และ กำลังขยาย 20000 เท่า ก่อนเลี้ยวเชื้อ (ค); หลังเลี้ยวเชื้อ (ง)

4. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าตัวกลางทุกรูปร่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนไม่ต่างกันมากนัก แต่ในการทดลองการดูดซับฟอสฟอรัส ตัวกลางทรงกระบอกมีความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุด ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ตัวกลางทรงกระบอกเพียงรูปร่างเดียวเพื่อศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์เพื่อลดอัตราการระเหยไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวของน้ำเสียที่เข้าระบบ ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกรณ์สองรูปแบบ ได้ถังปฏิกรณ์ชั้นเดียว และ ถังปฏิกรณ์สามชั้น การที่ต้องออกแบบให้ถังปฏิกรณ์เป็นสามชั้น เพื่อไม่ให้ตัวกลางที่บรรจุเรียงเป็นชั้นที่มีความหนามากเกินไป ป้องกันไม่ให้เกิดสถานะที่ไม่มีอากาศในชั้นของตัวกลาง

จากภาพที่ 17ก และ ค่าพีเอชมีการลดลงอย่างช้าๆ และสอดคล้องกับการลดลงของสภาพค่า (ภาพที่ 17ข) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน การที่พีเอชลดลงเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนซึ่งทำให้สภาพค่าลดลง และสภาพค่ายังถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ จากส่วนหนึ่งในงานวิจัยของมลทิชา (2555) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายจากแหล่งที่มาเดียวกับงานวิจัยนี้ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบซีควนซ์เบดซ์ ค่าพีเอชและสภาพค่ามีการลดลงและมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยนี้

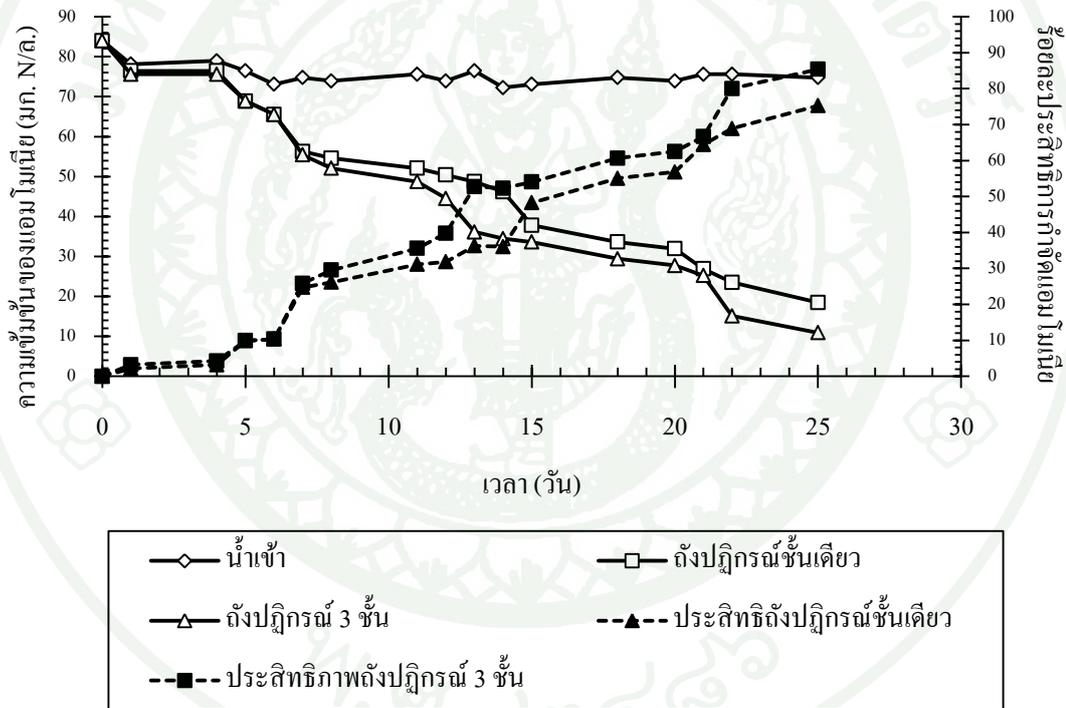


ภาพที่ 17 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอช (ก); สภาวะต่าง (จ) ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายใน ถังปฏิกรณ์เดียว

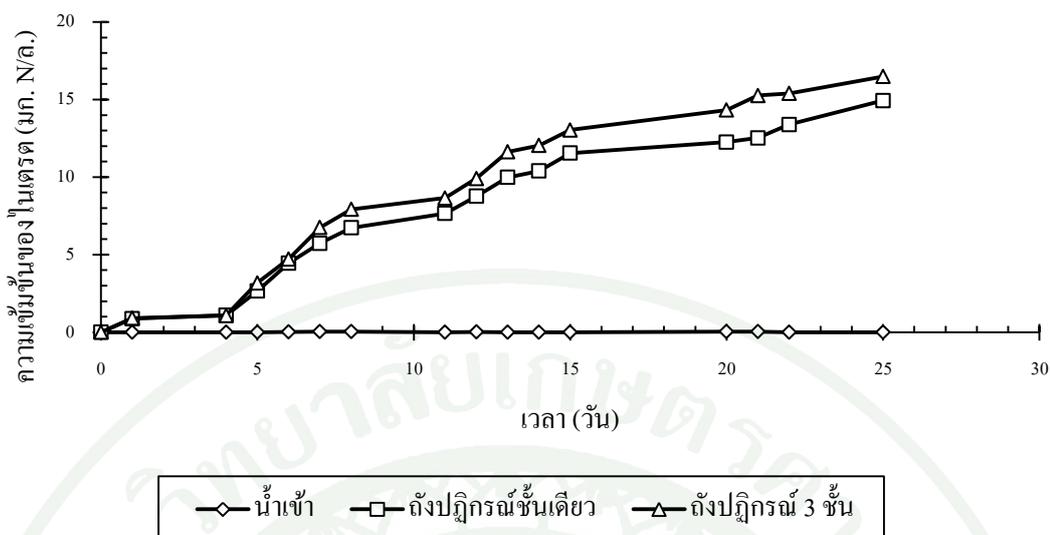
จากภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์แบบชั้นเดียวและถังปฏิกรณ์สามชั้น มีร้อยละ ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 75.3 และ 85.4 ตามลำดับ ถังปฏิกรณ์ใหม่ที่ใช้ในการ ทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนมากกว่าในการทดลองขั้นต้นถึงร้อยละ 20 เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าตัดของถังปฏิกรณ์เป็นการลดอัตราการระเหยไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวหน้า ตัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hwang *et al.* (2009) ที่ได้กล่าวไว้ในการทดลองเบื้องต้น แล้วว่าเมื่อลดการระเหยไนโตรเจนลงประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้น และถังปฏิกรณ์สามชั้น

มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียดีกว่าถังปฏิกรณ์ชั้นเดียวประมาณร้อยละ 10 อาจเป็นเพราะตัวกลางมีการสัมผัสอากาศที่ดีกว่า

จากกราฟที่ 19 แสดงการเพิ่มขึ้นของไนเตรต ที่เวลา 25 วัน พบว่าในถังปฏิกรณ์ชั้นเดียวและถังปฏิกรณ์สามชั้นมีความเข้มข้นไนเตรตเท่ากับ 14.93 และ 16.49 มก. N/ล. เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียและไนเตรตมาคำนวณสมดุลไนโตรเจนพบว่า 1 โมลของแอมโมเนียที่ถูกกำจัดเปลี่ยนเป็น 0.78 และ 0.77 โมลของไนเตรต ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของศุทธวดี (2544) ที่ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแหล่งเดียวกันกับงานวิจัยนี้ พบว่าสมดุลของการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียเป็นไนเตรตมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 18 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

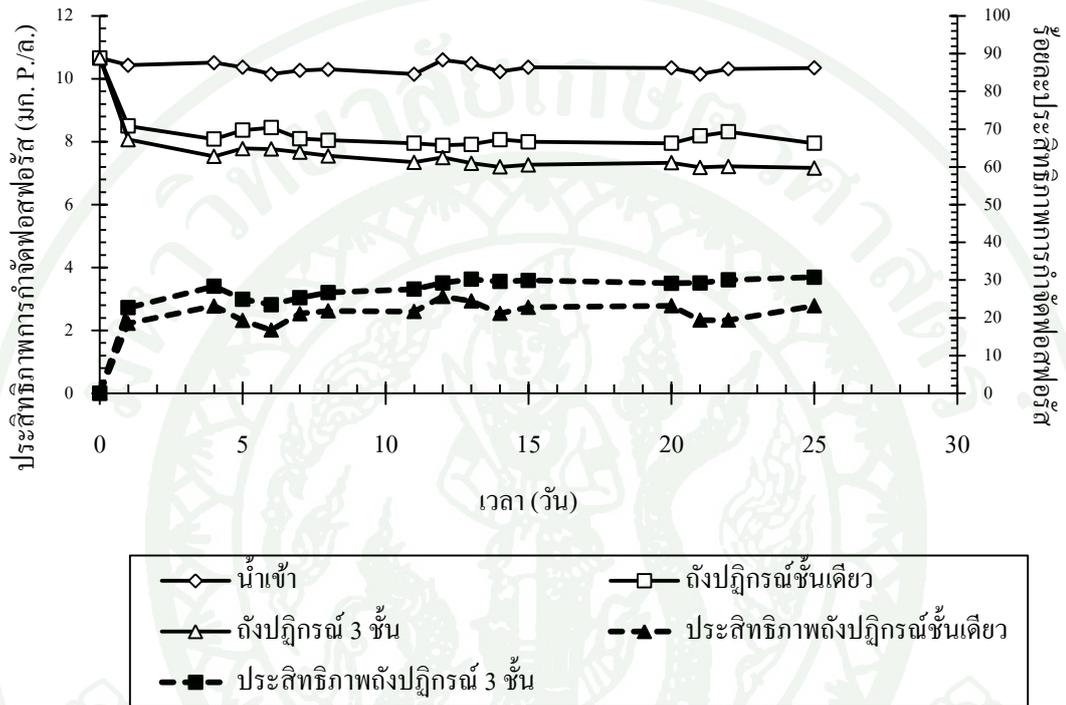


ภาพที่ 19 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงไนเตรต ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายใน ถังปฏิกรณ์เดี่ยว

จากภาพที่ 20 เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 25 วัน พบว่าถังปฏิกรณ์ชั้นเดียวและถังปฏิกรณ์สาม ชั้น มีร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 23.2 และ 30.8 ตามลำดับ จากงานวิจัย ของ Vohla et al. (2011) ที่ทำการรวบรวมและวิจารณ์ข้อมูลตัวกลางที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัสในระบบ บึงประดิษฐ์กล่าวว่า ตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าระยะเวลากักเก็บทางศาสตร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งใน งานวิจัยนี้พบว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับตัวกลางคือ 36 ชม. ซึ่งรูปแบบของระบบมี ลักษณะคล้ายระบบ ไพรยกรอง (Trickling filter) หากต้องการเพิ่มระยะกักเก็บทางศาสตร์ต้อง เพิ่มความยาวของคอลัมน์และลดพื้นที่ว่างของตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์ แต่การกระทำดังกล่าวจะ ไปส่งผลกระทบต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันในเรื่องของอากาศที่เข้าถึงเชื้อจุลินทรีย์แทน

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบระบบและการกักเก็บทางศาสตร์กับงานวิจัยอื่นที่เป็นการกำจัด ฟอสฟอรัสโดยใช้ตัวกลางในการดูดซับ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ทำการศึกษารูปแบบคอลัมน์ และตัวกลางถูกแช่อยู่ในน้ำเสีย เช่น งานวิจัยของ Adam et al. (2007) ที่ศึกษาการดูดซับ ฟอสฟอรัสของตัวกลาง Filtralite P™ ในระบบที่เป็นคอลัมน์แบบไหลขึ้นตามแนวดิ่งและมีค่าการ กักเก็บทางศาสตร์ 3.65 วัน ตัวกลางนี้มีค่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลในการดูดซับคือ 1 ชม. และมี ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 91 และงานวิจัยของ Vohla et al. (2005) ศึกษา

การกำจัดฟอสฟอรัสตัวกลาง LECA มีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 24 ชม. แสดงให้เห็นว่าตัวกลางที่สังเคราะห์ขึ้น (Man-made products) เพื่อใช้ในการดูดซับฟอสฟอรัสมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่นาน ดังนั้นระบบที่มีลักษณะเป็นแบบ โพรยกรองจึงไม่เหมาะในการนำไปใช้กับการใช้ตัวกลางของงานวิจัยนี้



ภาพที่ 20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสและประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของถึงปฏิกรณ์ต่างๆ ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและในโตรเจนที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถึงปฏิกรณ์เดียว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาไอโซโทมการดูดซับ ตัวกลางทรงกระบอกเป็นตัวกลางที่มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสที่มากที่สุด และมีค่าเท่ากับ 7.63 มก P./ก. และตัวกลางรูปร่างนี้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากที่สุดเช่นกัน คือ 12.75 ตร.ม./ก. ในการศึกษาการกำจัดไนโตรเจน รูปร่างของตัวกลางไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ตัวกลางเม็ดยา ทรงกระบอก และ ทรงกลม มีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 48.4 53.1 และ 53.1 ตามลำดับ ดังนั้นตัวกลางทรงกระบอกจึงเป็นรูปร่างที่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด

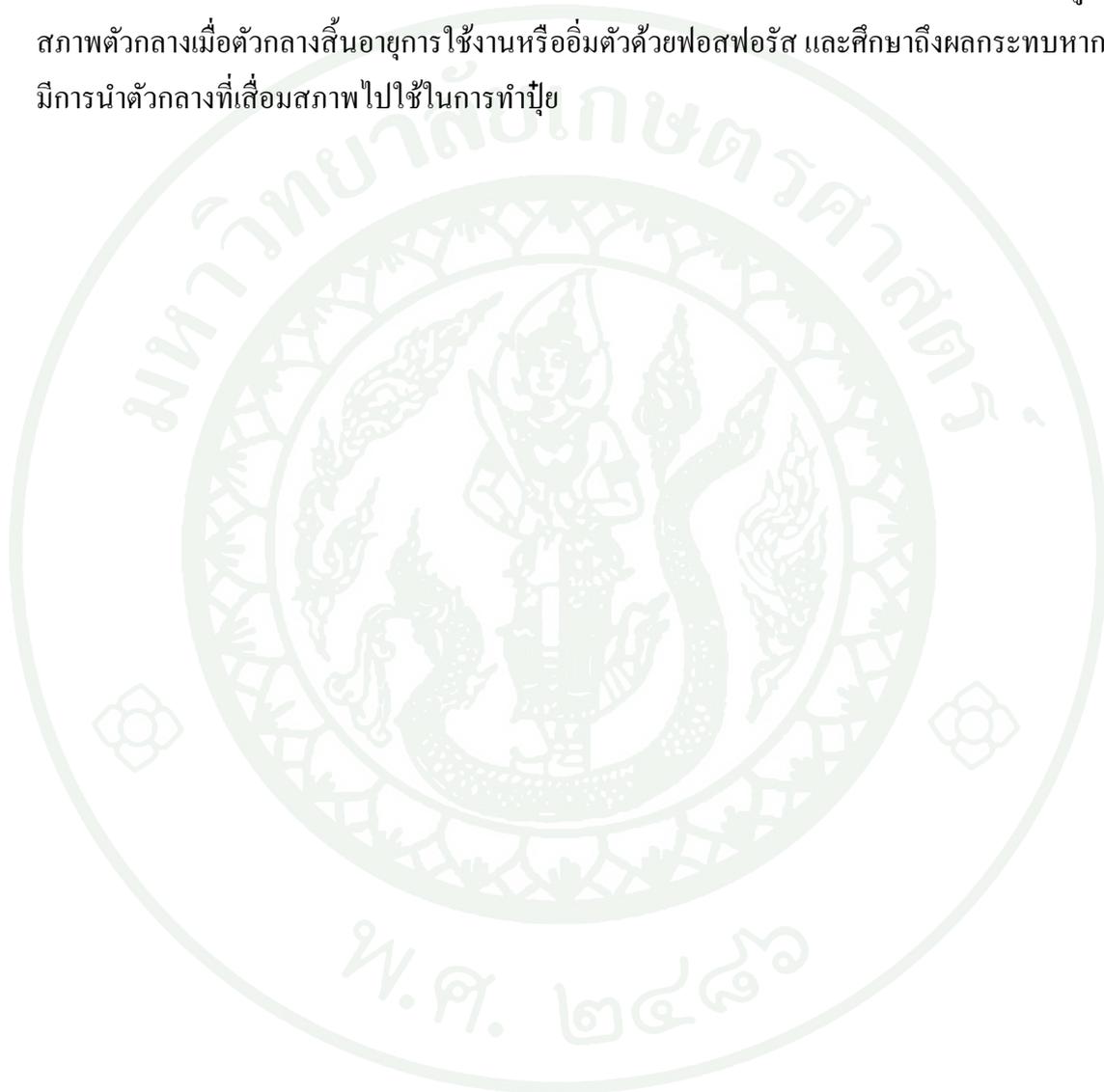
ตัวกลางทรงกระบอกถูกนำมาใช้ในการทดลองที่มีการศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กันภายในถังปฏิกรณ์เดียว และทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบเป็นคอลัมน์ชั้นเดียวและคอลัมน์แบบสามชั้น ถังปฏิกรณ์สามชั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีกว่าถังปฏิกรณ์ชั้นเดียว และมีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 85.4 และ 30.8 ตามลำดับ ซึ่งถังปฏิกรณ์ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่ดีกว่าการทดลองขึ้นต้นเนื่องจากถังปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวกว่า ทำให้อัตราการระเหยไนโตรเจนต่อพื้นที่ผิวของน้ำในระบบมีค่าลดลง และมีการผ่านเข้าถึงของอากาศที่ดีกว่า แต่ถังปฏิกรณ์ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำเพราะมีระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์น้อย สรุปได้ว่าตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับที่มีรูปแบบของถังปฏิกรณ์เป็นแบบโปรยกรอง

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ตัวกลางในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและตรงตามวัตถุประสงค์ รูปแบบของถังปฏิกรณ์จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการดูดซับจำเป็นต้องมีระยะเวลาสัมผัสที่มาก แต่เมื่อออกแบบระบบให้มีระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์สูง ต้องมีการเติมอากาศเข้าสู่ระบบเพื่อให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ ทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ ดังนั้นถ้าต้องการให้ตัวกลางนำไปใช้ได้ในระบบจริง

จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการออกแบบถึงปฏิกิริยาให้สอดคล้องกับกลไกการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของตัวกลางนี้

ในแง่ของการพัฒนาอย่างยั่งยืน ตัวกลางที่เสื่อมสภาพแล้วต้องสามารถนำฟื้นฟูสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่หรือสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงการฟื้นฟูสภาพตัวกลางเมื่อตัวกลางสิ้นอายุการใช้งานหรืออิ่มตัวด้วยฟอสฟอรัส และศึกษาถึงผลกระทบหากมีการนำตัวกลางที่เสื่อมสภาพไปใช้ในการทำปุ๋ย



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. 2544. การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ ผิวดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จินตนา เจือดี. 2549. ผลของออกซิเจนละลายน้ำต่อจุลินทรีย์ตรึงบนตัวกลางในปฏิกรณ์ฟิล์มตรึงชีวะเมมเบรนซึ่งแบคทีเรียเพื่อกำจัดแอมโมเนียและไนโตรเจนทั้งหมด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์, จารุรัตน์ วรรณสุราษฎร์, อุดร จารุรัตน์ และ เฉลิมราช วันทวิไล. 2539. แนวทางการลดปริมาณสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชนจากการใช้สารซักฟอก. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 10 (1): 39-22.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ชีระวิทย์ รัตนพันธ์. 2547. การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะ ภูเก็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นิคม ละอองศิริวงศ์. 2547. ธาตุอาหารที่เป็นปัจจัยจำกัดมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชในทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มันสิน ตันฑกุลเวศม์ และ มันรัชต์ ตันฑกุลเวศม์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มลทิชา กำเนิดทอง. 2555. อิทธิพลของภาระบรรทุกต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วน ในการเตรียมน้ำเสียจากโรงงานเส้นใยในการกำจัดไนโตรเจนโดยกระบวนการอนาโมกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งคณาวัชรีย์ และ คณิตา ตั้งคณาวัชรีย์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภชาติ ศิริยานนท์. 2554. การบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนของกระบวนการอนาโมกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัจฉรา จันทร์อารีย์. 2538. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยใช้สิ่งปลูกิรียาชนิดถังที่มีการเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ. 2536. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบแอร์เรเตทลาทูน โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัศดร คำเมือง. 2553. แนวทางพัฒนาชุดตรวจสอบยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำจืดอย่างง่าย : กรณีศึกษาจังหวัดปทุมธานีและจังหวัดนครนายก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

Àdàm, K., T. Krogstad, L. Vrale, A.K. Søvik and P.D. Jenssen. 2007. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P®—batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. **Ecological Engineering** 29, 200-208.

APHA, AWWA, and WEF. 2005. **Standard methods for the examination of the water and wastewater. 21 th ed.** American Public Health Association, Washington D.C.

Bavor, H.J., D.J. Roser and P.W. Adcock 1995. Challenges for the development of advanced constructed wetlands technology. **Water Science and Technology** 32: 13-20.

Bitton G. 1994. **Wastewater Microbiology.** Wiley-Liss, New York.

- Brooks, A.S., M.N. Rozenwald, L.D. Geohring, L.W. Lion and T.S. Steenhuis. 2000. Phosphorus removal by wollastonite: a constructed wetland substrate. **Ecological Engineering** 15: 121–132.
- Delatolla, R., N. Tufenkji, Y. Comeau, D. Lamarre, A. Gadbois and D. Berk. 2009. In situ characterization of nitrifying biofilm: Minimizing biomass loss and preserving perspective. **Water Research** 43: 1775-1787
- Eckenfelder, W.W.Jr. 1981. **Application of Adsorption to Wastewater Treatment**. Enviro Press, Nashville.
- Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987 **Adsorption Processes for Water Treatment**. ButterWorth Publisher, Boston.
- Gayle, B.P., G.D. Boardman, J.H. Sherrard and R.E. Benoit. 1989. Biological denitrification of water. **Journal of Environmental engineering** 115 (5): 930-943.
- Heistad, A., A.M. Paruch, L. Vrale, K. Adam and P.D. Jenssen. 2006. A high-performance compact filter system treating domestic wastewater. **Ecological Engineering** 28, 374–379.
- Henze, M., P. Harremocs, J. Jansen and E. Arvin. 1997. **Wastewater treatment biological and chemical processes**. 2 nd ed. Springer, Berlin.
- Hill, C.M., J. Duxbury, L. Geohring., and T. Peck. 2000. Designing constructed wetlands to remove phosphorus from barnyard runoff: a comparison of four alternative substrates **Journal of Environmental. Science and Health** A35, 1357–1375.
- Ho, Y.S., 2006. Isotherms for the sorption of lead onto peat: comparision of linear and non-linear methods. **Polish Journal of Environmental Studies** 15 (1): 81-86.

- Huang, X. P., L.M. Huang and W.Z. Yue. 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. **Marine Pollution Bulletin** 47: 30 - 36.
- Hwang, J.H., N. Cicek and J.Oleszkiewicz. 2009. Effect of loading rate and oxygen supply on nitrification in a non-porous membrane biofilm reactor. **Water Research** 43: 3301-3307.
- Kim, S.K., I. Kong, B.H. Lee, L. Kang, M.G. Lee and K.H. Suh. 2000. Removal of ammonium-N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifier. **Aquacultural Engineering** 21: 139-150.
- Kuba, T., G. Smolders, M.C.M. van Loosdrecht and J.J. Heijnen. 1993. Biological Phosphorus Removal from Wastewater by Anaerobic-Anoxic Sequencing Batch Reactor. **Water Science and Technology** 27 (5-6): 241-252.
- Lekang, O.I. and H. Kleppe. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. **Aquacultural Engineering** 21: 181-199.
- Matsumura, M., T. Yamamoto, P.C. Wang, K. Shinabe. and K. Yasuda. 1997. Rapid nitrification with immobilized cell using macro-porous cellulose carrier. **Water Research** 31 (5): 1027-1034.
- Metcalf & Eddy. 2003. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. 4 th ed. McGraw-Hill, New York.
- Qiu, L., S. Zhang, G. Wang and M. Du. 2010. Performance and nitrification properties of biological aerated filters with zeolite, ceramic particle and carbonate media. **Bioresour. Technol.** 101: 7245-7251.

Sawyer, C.N., P.L. McCarty and G.F. Parkin. 2003. **Chemistry for environmental engineering and science**. 5th ed. McGraw-Hill Companies, New York.

Schindler, D.W. 1971. Carbon, Nitrogen and Phosphorus the Eutrophication of Freshwater Lakes. **Journal of Phycology** 7 (4): 321-329.

Smith, V.H., G.D. Tilman and J.C. Nekola. 1999. Eutrophication : Impact of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. **Environmental Pollution** 100: 179 - 196.

Stenstrom, M.K. and R.A. Podusda. 1980. The effect of dissolved oxygen concentration on nitrification. **Water Research** 14: 643-649.

Tiedje, J.M. 1988. Ecology of Denitrification and Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonia. **Biology of Anaerobic Microorganisms** 717: 179-244.

U.S. Environmental Protection Agency. 1975. **Process design manual for nitrogen central**. Office of technology transfer. Washington, DC.

U.S. Environmental Protection Agency. 1999. **1999 Update of Ambient Water Quality Criteria for Ammonia**. EPA-822-R-99-014, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency. 2007. **Nitrates and Nitrites TEACH Chemical Summary**. U.S. EPA, Toxicity and Exposure Assessment for Children's Health. Available Source:http://www.epa.gov/teach/chem_summ/Nitrates_summary.pdf, June 12, 2012.

Vohla, C., E. Poldvere, A. Noorvee, V. Kuusemets, and Ü. Mander. 2005. Alternative filter media for phosphorus removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. **Journal of Environmental. Science and Health A40**, 1251–1264.

- Vohla, C., R. Alas, K. Nurk, S. Baatz and Ü. Mander. 2007. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. **Science of the Total Environment** 380: 66-74.
- Vohla, C., M. Kõiv, H.J. Bavor, F. Chazarenc and Ü. Mander. 2011. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands-A review. **Ecological Engineering** 37 (1): 70-89.
- Wijffels, R.H., and J. Tramper. 1995. Nitrification by immobilized cells. Enzyme and **Microbial Technology** 17: 482-492.
- Wild, H.E., C.N. Sawyer and T.C. McMahon. 1971, Action Affection Nitrification Kinetics. **Water Pollution Control Federal** 43: 1845-1859.
- Xu, D., J. Xu, J. Wu and A. Muhammad. 2006. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems. **Chemosphere** 63: 344-352.
- Yamaguchi, T., P. Moldrup, D.E. Rolston, S. Ito. and S. Teranishi. 1996. Nitrification in porous media during rapid, unsaturated water flow. **Water Research** 30 (3): 531-540.
- Zhu, T., T. Maehlum, P.D. Jenssen and T. Krogstad. 2003. Phosphorus sorption characteristics of light-weight aggregate. **Water Science and Technology** 48: 93-100



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากการทดลองการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงการคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางรูปร่างต่างๆ

ตัวกลาง	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (ก.)	น้ำหนักอิมตัว (ก.)	น้ำหนักจมน้ำ (ก.)	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่นปรากฏ	ร้อยละความพรุนปรากฏ	ร้อยละการดูดซับน้ำ
เม็ดยา	1	0.52	0.3247	0.6454	1.6215	2.6626	39.10	24.12
	2	0.53	0.3249	0.6496	1.6323	2.5841	36.83	22.57
	เฉลี่ย	0.53	0.3248	0.6475	1.6269	2.6234	37.97	23.34
ทรงกระบอก	1	0.28	0.3783	0.1707	1.3487	2.5618	47.35	35.11
	2	0.32	0.4265	0.1983	1.4023	2.6294	46.67	33.28
	3	0.30	0.4245	0.1973	1.3204	2.9211	54.80	41.50
	4	0.34	0.4685	0.2146	1.3391	2.7113	50.61	37.79
	5	0.31	0.4354	0.1995	1.3141	2.8054	53.16	40.45
	เฉลี่ย	0.31	0.4266	0.1961	1.3449	2.7258	50.52	37.63
ทรงกลม	1	0.42	0.5790	0.2665	1.3440	2.7362	50.88	37.86
	2	0.37	0.5133	0.2337	1.3233	2.7146	51.25	38.73
	3	0.38	0.5395	0.2494	1.3099	2.9096	54.98	41.97
	4	0.39	0.5399	0.2482	1.3370	2.7504	51.39	38.44
	เฉลี่ย	0.39	0.5429	0.2495	1.3286	2.7777	52.13	39.25

1. การคำนวณความหนาแน่นรวม (Bulk density)

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักอิมตัว} - \text{น้ำหนักจมน้ำ}}$$

2. การคำนวณความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density)

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ} = \frac{\text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง} - \text{น้ำหนักจมน้ำ}}$$

3. การคำนวณร้อยละความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

$$\text{ร้อยละความพรุนปรากฏ} = \frac{\text{น้ำหนักอิมตัว} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักอิมตัว} - \text{น้ำหนักจมน้ำ}} \times 100$$

4. การคำนวณร้อยละการดูดซับน้ำ (Water absorption)

$$\text{ร้อยละการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักอิมตัว} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

Date: 09/12/2012

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	M-5				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.5270 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	71.5 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	0	End of Run	06/25/2012 15:28
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS972645.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.40		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	7.276E+00	m ² /g
Single Point BET.....	7.261E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.103E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	4.374E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	2.902E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.021E+01	m ² /g

PORE VOLUME DATA

t-Method Micro Pore Volume.....	1.523E-03	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	3.629E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	3.321E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.361E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

DR Method Micro Pore Width	8.054E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.740E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.362E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.547E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 779.32 mm Hg
Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

ภาพผนวกที่ ก1 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางเม็ดคยาโดยใช้เครื่อง BET

Date: 05/30/2012

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	CMC1				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.3601 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	69.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	0	End of Run	05/30/2012 15:10
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS972622.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.40		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	1.275E+01	m ² /g
Single Point BET.....	1.274E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.947E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	8.602E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	4.147E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.708E+01	m ² /g

PORE VOLUME DATA

t-Method Micro Pore Volume.....	2.134E-03	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.071E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	5.590E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	5.662E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

DR Method Micro Pore Width	7.753E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.740E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.367E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.556E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 805.53 mm Hg
MaxiDose : ON
Initial Fill : OFF
DoseWizard : OFF

BJH/DH Moving Average Size : 1

Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

ภาพผนวกที่ ก2 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางทรงกระบอกโดยใช้เครื่อง BET

Date: 01/11/2013

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome-Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Gift Ball				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.3038 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	68.0 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	0	End of Run	01/11/2013 10:27
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS972735.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.40		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	7.282E+00	m ² /g
Single Point BET.....	7.247E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.111E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	4.753E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	2.529E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	9.714E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

t-Method Micro Pore Volume.....	1.298E-03	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	3.452E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	3.215E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.230E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

DR Method Micro Pore Width	7.424E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.740E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.427E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.676E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 788.36 mm Hg
MaxiDose : ON
Initial Fill : OFF
DoseWizard : OFF
BJH/DH Moving Average Size : 1
Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

ภาพผนวกที่ ก3 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางทรงกลมโดยใช้เครื่อง BET



ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลองความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลาง

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางเม็ดยา

ความเข้มข้นเริ่มต้น ของฟอสฟอรัส, C_0 (มก. P/ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ, M (ก.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ณ. จุดสมดุล, C_c (มก. P/ล.)			ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูด ซับ, X/M (มก. P/ก.)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
51.5	2.6975	2.6713	30.08	30.58	30.33	1.59	1.57	1.58
66.0	2.6962	2.6203	41.42	40.58	41.00	1.82	1.94	1.88
81.83	2.6899	2.6370	50.17	50.67	50.42	2.35	2.36	2.36
96.0	2.6754	2.6465	64.33	63.00	63.67	2.37	2.49	2.43
108.0	2.7047	2.6936	71.50	74.33	72.92	2.70	2.50	2.60

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกระบอก

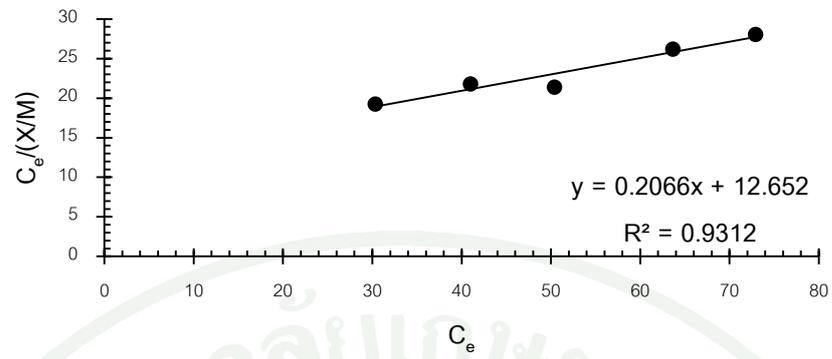
ความเข้มข้นเริ่มต้น ของฟอสฟอรัส, C_0 (มก. P/ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ, M (ก.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ณ. จุดสมดุล, C_e (มก. P/ล.)			ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูด ซับ, X/M (มก. P/ก.)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
51.33	2.5334	2.6283	28.33	28.83	28.58	1.82	1.71	1.76
68.17	2.5960	2.6265	36.58	36.58	38.25	2.18	2.41	2.29
83.00	2.6659	2.5808	48.83	48.83	48.42	2.63	2.65	2.64
100.3	2.6159	2.5863	58.83	58.83	58.83	3.17	3.21	3.19
109.3	2.5363	2.5360	69.17	69.50	69.33	3.14	3.17	3.15

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าที่ใช้ในการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกลม

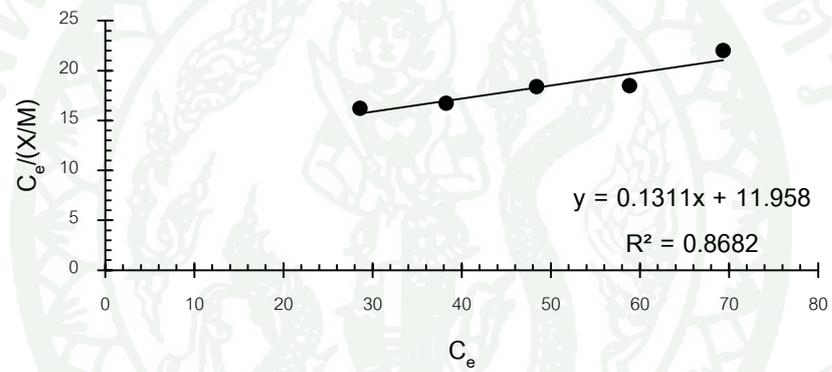
ความเข้มข้นเริ่มต้น ของฟอสฟอรัส, C_0 (มก. P/ล.)	ปริมาณตัวดูดซับ, M (ก.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ณ. จุดสมดุล, C_c (มก. P/ล.)			ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของตัวดูด ซับ, X/M (มก. P/ก.)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
51.33	2.6354	2.7036	23.58	21.67	22.63	2.21	2.29	2.25
68.17	2.6877	2.6430	32.92	35.58	34.25	2.62	2.47	2.54
83.00	2.5674	2.5987	44.50	42.33	43.42	2.99	3.12	3.05
100.3	2.5961	2.6584	53.00	52.33	52.67	3.33	3.30	3.31
109.3	2.7044	2.7324	61.83	64.33	63.08	3.46	3.25	3.35

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของตัวกลางรูปร่างต่างๆ

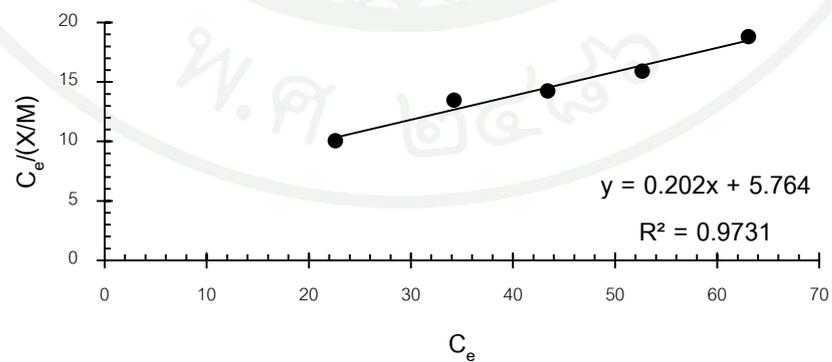
รูปร่างตัวกลาง	ความชันกราฟ	จุดตัดแกน y	ความสามารถในการดูด ซับสูงสุด, q_m (มก. P/ก.)	ค่าคงที่การทดลอง, K_a (ล./มก. P)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, R^2
เม็ดยา	0.206	12.65	4.85	0.016	0.931
ทรงกระบอก	0.131	11.95	7.63	0.010	0.868
ทรงกลม	0.202	5.76	4.95	0.035	0.973



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางเม็ดยา



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกระบอก



ภาพผนวกที่ ข3 กราฟไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางทรงกลม



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลาง

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางเม็ดยา

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	7.45	7.45	75.60	73.36	0.001	0.00
1	7.45	7.13	75.04	64.40	0.002	0.11
2	7.41	7.03	75.60	64.68	0.002	0.09
4	7.39	7	72.80	64.96	0.002	0.55
5	7.44	6.84	72.24	63.28	0.002	0.71
6	7.45	6.82	72.80	60.20	0.001	0.85
7	7.45	6.8	71.68	56.84	0.001	0.88
8	7.42	6.72	73.92	57.12	0.002	0.78
9	7.4	6.7	71.12	51.80	0.002	0.93
10	7.41	6.71	70.00	47.04	0.002	1.18
12	7.43	6.66	71.12	44.80	0.002	1.29
13	7.4	6.61	70.56	45.92	0.002	1.49
14	7.45	6.54	70.00	45.92	0.001	1.39
15	7.43	6.5	70.56	45.36	0.002	1.58
16	7.38	6.46	71.12	42.00	0.002	2.29
17	7.4	6.44	70.00	41.44	0.002	2.59
19	7.42	6.41	70.00	40.32	0.002	3.06
20	7.45	6.4	71.12	41.44	0.002	3.00
21	7.4	6.37	71.12	40.88	0.002	3.61
22	7.43	6.32	71.12	42.56	0.002	3.79
23	7.41	6.31	70.56	39.76	0.001	3.96
25	7.45	6.32	72.24	41.44	0.001	4.10
26	7.44	6.31	70.00	40.88	0.002	4.17
27	7.42	6.33	71.68	43.12	0.002	4.44
28	7.45	6.32	69.44	42.00	0.001	4.28
29	7.43	6.31	71.68	43.12	0.002	4.35
32	7.41	6.3	71.68	41.44	0.002	4.84

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
34	7.44	6.31	72.80	39.20	0.001	4.86
36	7.41	6.32	71.68	39.20	0.001	4.96
38	7.42	6.29	71.12	36.96	0.002	4.99
40	7.45	6.27	71.12	36.96	0.002	5.04
42	7.45	6.3	70.56	38.08	0.002	4.94
47	7.42	6.26	71.68	36.96	0.002	4.79

ตารางผนวกที่ ๑๒ ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางทรงกระบอก

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	7.45	7.45	75.60	72.24	0.001	0.00
1	7.45	7.14	75.04	64.12	0.002	0.07
2	7.41	7.00	75.60	66.08	0.002	0.23
4	7.39	7.02	72.80	65.52	0.002	0.50
5	7.44	7.00	72.24	66.36	0.002	0.71
6	7.45	6.88	72.80	63.28	0.001	0.93
7	7.45	6.82	71.68	58.80	0.001	1.14
8	7.42	6.79	73.92	58.24	0.002	1.10
9	7.4	6.78	71.12	53.48	0.002	1.15
10	7.41	6.74	70.00	47.60	0.002	1.20
12	7.43	6.69	71.12	44.80	0.002	1.34
13	7.4	6.65	70.56	42.56	0.002	1.40
14	7.45	6.63	70.00	40.32	0.001	1.46
15	7.43	6.62	70.56	41.44	0.002	1.50
16	7.38	6.57	71.12	42.56	0.002	1.67
17	7.4	6.52	70.00	42.00	0.002	1.66
19	7.42	6.47	70.00	40.32	0.002	1.87
20	7.45	6.44	71.12	44.80	0.002	1.87
21	7.4	6.39	71.12	42.56	0.002	2.41
22	7.43	6.39	71.12	40.88	0.002	2.59
23	7.41	6.4	70.56	40.32	0.001	3.07
25	7.45	6.4	72.24	42.00	0.001	3.31
26	7.44	6.41	70.00	44.80	0.002	3.80
27	7.42	6.4	71.68	43.12	0.002	3.72
28	7.45	6.42	69.44	44.24	0.001	3.73
29	7.43	6.42	71.68	43.12	0.002	3.72
32	7.41	6.41	71.68	39.20	0.002	3.92

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
34	7.44	6.42	72.80	34.72	0.001	4.48
36	7.41	6.4	71.68	35.84	0.001	4.54
38	7.42	6.4	71.12	37.52	0.002	4.91
40	7.45	6.41	71.12	35.84	0.002	5.18
42	7.45	6.41	70.56	34.72	0.002	5.24
47	7.42	6.43	71.68	33.60	0.002	5.44

ตารางผนวกที่ ๓ ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ของตัวกลางทรงกลม

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	7.45	7.45	75.60	72.24	0.001	0.00
1	7.45	7.2	75.04	65.24	0.002	0.05
2	7.41	7.15	75.60	66.08	0.002	0.22
4	7.39	7.13	72.80	66.92	0.002	0.23
5	7.44	7.13	72.24	66.64	0.002	0.57
6	7.45	7.02	72.80	64.12	0.001	0.78
7	7.45	6.89	71.68	60.48	0.001	0.96
8	7.42	6.8	73.92	55.44	0.002	1.10
9	7.4	6.79	71.12	48.72	0.002	1.04
10	7.41	6.77	70.00	44.24	0.002	1.11
12	7.43	6.7	71.12	43.68	0.002	1.32
13	7.4	6.65	70.56	44.24	0.002	1.38
14	7.45	6.66	70.00	42.56	0.001	1.47
15	7.43	6.61	70.56	41.44	0.002	1.60
16	7.38	6.51	71.12	43.12	0.002	1.66
17	7.4	6.48	70.00	42.00	0.002	1.79
19	7.42	6.44	70.00	43.12	0.002	1.83
20	7.45	6.42	71.12	41.44	0.002	2.07
21	7.4	6.4	71.12	36.96	0.002	2.81
22	7.43	6.38	71.12	38.08	0.002	3.34
23	7.41	6.37	70.56	38.08	0.001	3.24
25	7.45	6.38	72.24	36.96	0.001	3.59
26	7.44	6.37	70.00	35.84	0.002	3.68
27	7.42	6.38	71.68	35.84	0.002	3.80
28	7.45	6.38	69.44	36.96	0.001	3.91
29	7.43	6.38	71.68	36.40	0.002	4.20
32	7.41	6.37	71.68	36.96	0.002	4.13

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

เวลา (วัน)	พีเอช		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
34	7.44	6.38	72.80	37.52	0.001	4.29
36	7.41	6.37	71.68	38.08	0.001	4.39
38	7.42	6.38	71.12	36.96	0.002	4.46
40	7.45	6.38	71.12	35.84	0.002	4.65
42	7.45	6.37	70.56	33.60	0.002	5.07
47	7.42	6.39	71.68	33.60	0.002	5.23



ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากการทดลองการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นควบคู่กันในถังปฏิกรณ์เดียว

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์ชั้นเดียว

เวลา (วัน)	พีเอช		สภาพด่าง (มก. CaCO ₃ /ล.)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มก. P/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	8.88	8.88	262	262	84	84	0.00	0.00	10.67	10.67
1	8.66	8.79	230	226	78.12	76.44	0.00	0.87	10.43	8.50
4	8.65	8.68	228	220	78.96	76.44	0.00	1.09	10.52	8.08
5	8.59	8.67	230	200	76.44	68.88	0.00	2.66	10.37	8.37
6	8.46	8.57	228	192	73.08	65.52	0.02	4.46	10.15	8.45
7	8.66	8.45	224	186	74.76	56.28	0.05	5.73	10.27	8.10
8	8.55	8.37	218	172	73.92	54.6	0.05	6.74	10.30	8.05
11	8.59	8.23	220	120	75.6	52.08	0.00	7.66	10.15	7.95
12	8.53	7.93	224	104	73.92	50.4	0.02	8.77	10.60	7.88
13	8.6	7.92	232	92	76.44	48.72	0.00	9.98	10.48	7.92
14	8.62	7.73	222	84	72.24	46.2	0.00	10.40	10.23	8.07
15	8.59	7.69	222	70	73.08	37.8	0.00	11.55	10.37	8.00
18	8.48	7.64	-	-	74.76	33.6	-	-	-	-
20	8.66	7.44	220	62	73.92	31.92	0.05	12.26	10.35	7.95
21	8.86	7.08	222	52	75.6	26.88	0.05	12.52	10.15	8.18

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

เวลา (วัน)	พีเอช		สภาพด่าง (มก. CaCO ₃ /ล.)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มก. P/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22	8.48	7.06	222	30	75.6	23.52	0.00	13.38	10.32	8.32
25	8.62	6.88	222	20	74.76	18.48	0.00	14.93	10.35	7.95

ตารางผนวกที่ ๖๒ ค่าของพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากถังปฏิกรณ์สามชั้น

เวลา (วัน)	พีเอช		สภาพด่าง (มก. CaCO ₃ /ล.)		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของไนเตรท (มก. N/ล.)		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มก. P/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	8.88	8.88	262	262	84	56	0.00	0.00	10.67	10.67
1	8.66	8.72	230	230	78.12	50.4	0.00	0.90	10.43	8.07
4	8.65	8.63	228	202	78.96	50.4	0.00	1.08	10.52	7.53
5	8.59	8.54	230	188	76.44	45.92	0.00	3.18	10.37	7.78
6	8.46	8.52	228	176	73.08	43.68	0.02	4.72	10.15	7.77
7	8.66	8.4	224	174	74.76	36.96	0.05	6.76	10.27	7.67
8	8.55	8.29	218	162	73.92	34.72	0.05	7.93	10.30	7.55
11	8.59	8.16	220	124	75.6	32.48	0.00	8.66	10.15	7.35
12	8.53	7.48	224	80	73.92	29.68	0.02	9.91	10.60	7.50
13	8.6	7.83	232	72	76.44	24.08	0.00	11.63	10.48	7.32
14	8.62	7.55	222	70	72.24	22.96	0.00	12.04	10.23	7.20
15	8.59	7.35	222	34	73.08	22.4	0.00	13.04	10.37	7.27
18	8.48	7.13	-	-	74.76	19.6	-	-	-	-
20	8.66	7.58	220	32	73.92	18.48	0.00	14.32	10.35	7.33
21	8.86	7.03	222	28	75.6	16.8	0.00	15.26	10.15	7.18

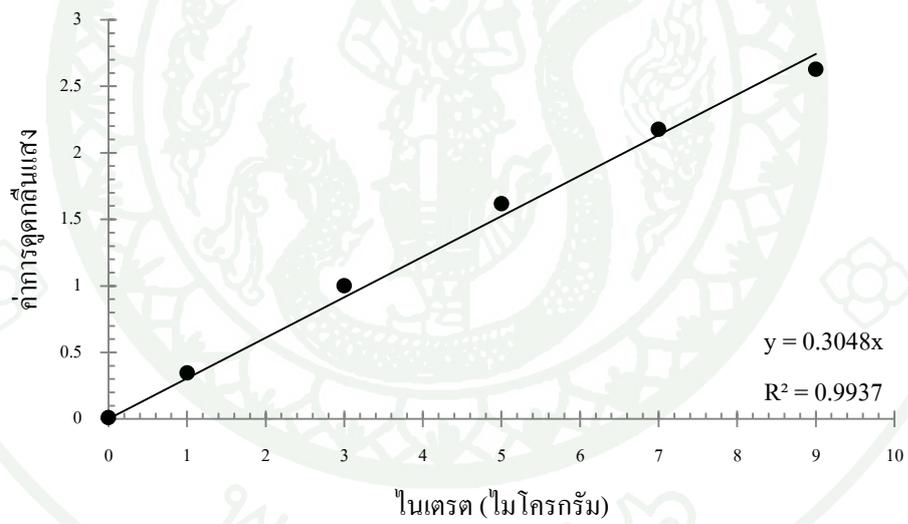
ตารางผนวกที่ ๖2 (ต่อ)

เวลา (วัน)	พีเอช		สภาพต่าง		ความเข้มข้นของแอมโมเนีย		ความเข้มข้นของไนเตรท		ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส	
			(มก. CaCO ₃ /ล.)		(มก. N/ล.)		(มก. N/ล.)		(มก. P/ล.)	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22	8.48	6.86	222	22	75.6	10.08	0.00	15.40	10.32	7.22
25	8.62	6.5	222	16	74.76	7.28	0.00	16.49	10.35	7.17

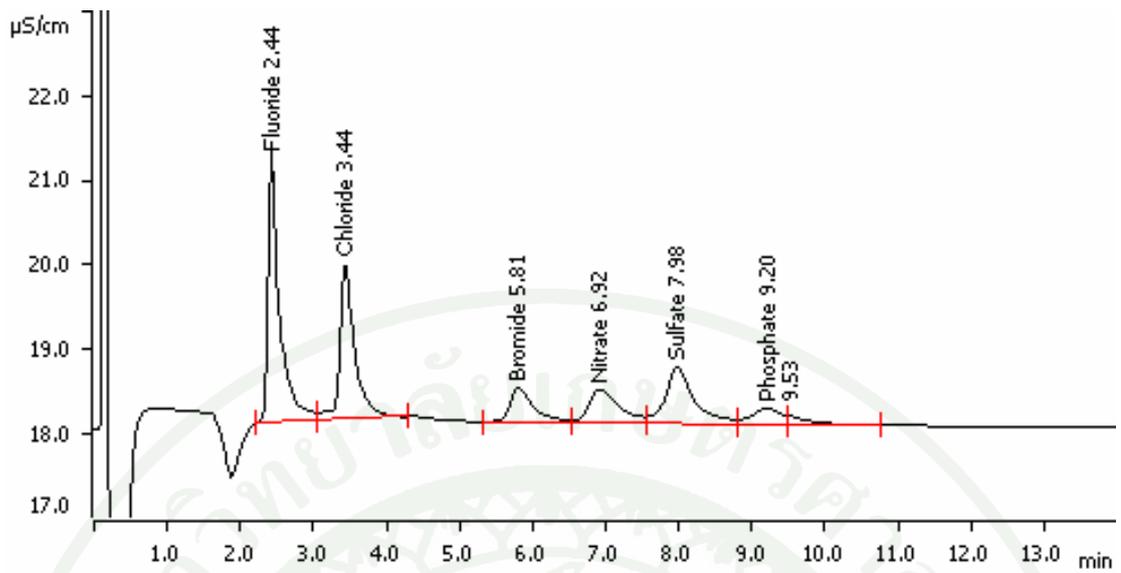




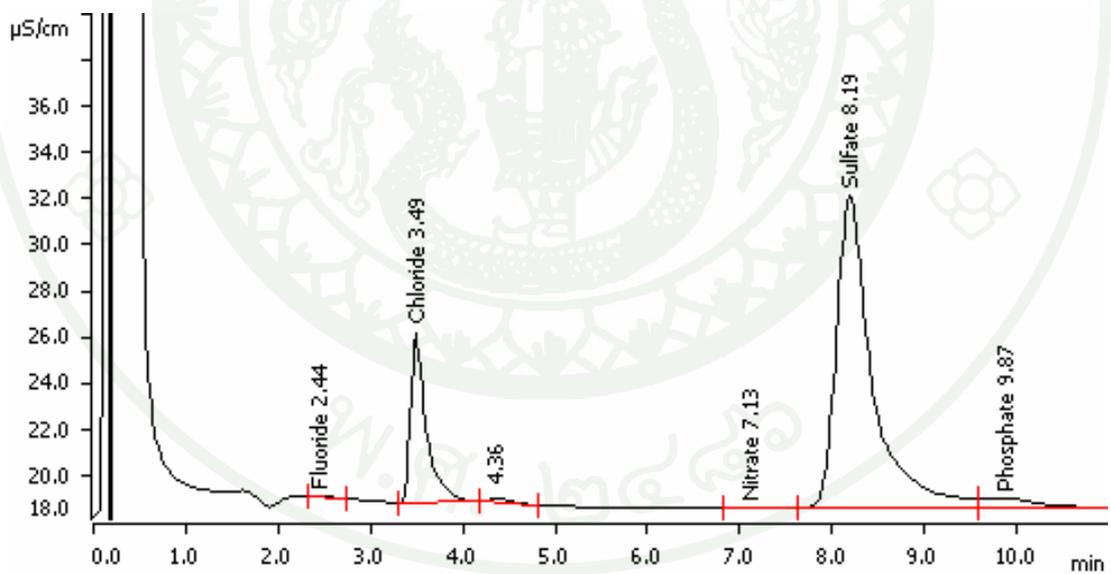
ภาพผนวกที่ จ1 กราฟมาตรฐานฟอสฟอรัสที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพผนวกที่ จ2 กราฟมาตรฐานไนเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพผนวกที่ ๓ กราฟมาตรฐานในเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานไอออนโครมาโทกราฟที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ ๔ กราฟมาตรฐานในเตรตที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟไอออนโครมาโทกราฟของน้ำเสียตัวอย่างวันที่ 25 ที่ผ่านถึงปฏิกรณ์แบบ สามชั้นของการทดลองการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เกิดควบคู่กันในถังปฏิกรณ์เดียว

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐ ภู่เกิดสิน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 จบการศึกษา วท.บ. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ