

ผลของตัวกลางต่อการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจน
ในถังปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพเบดเคลื่อนที่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of Media on COD and Nitrogen Removal in
Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของตัวกลางต่อการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจน ในถัง ปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพเบดเคลื่อนที่
โดย	น.ส.เพ็ญพนิต โพธิ์สวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.จามร เขวงกิจฉนิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัย)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ดร.จามร เขวงกิจฉนิช)
.....	กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)
.....	กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (อาจารย์ ดร.พรินท์พิดา สนธิพันธ์)

เพ็ญพินิต โพธิ์สวัสดิ์ : ผลของตัวกลางต่อการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจน ในถังปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพแบบเคลื่อนที่. (Effect of Media on COD and Nitrogen Removal in Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.จามร เวงกิจวัฒน์

งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดตัวกลางและปริมาณการบรรจุที่เหมาะสมต่อการเกาะของจุลินทรีย์ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดชีวภาพชนิดเคลื่อนที่โดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิดคือตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกฟลูออไรด์ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการเติมอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อการสร้างไบโอฟิล์ม โดยทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากกลูโคสที่ความเข้มข้น 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร มีอัตราน้ำเสียเข้าระบบ 18 ลิตรต่อวัน ผลการทดลองพบว่าปริมาณการบรรจุร้อยละ 10 20 และ 30 ของตัวกลางพีวีเอเจล มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 86 - 89 โดยปริมาณบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลที่ร้อยละ 20 ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือร้อยละ 89.13 \pm 6.12 และมีอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเท่ากับ 425.86 ± 69.79 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดตัวกลางพลาสติกฟลูออไรด์กับตัวกลางพีวีเอเจล พบว่าการใส่ตัวกลางพลาสติกทั้งสองชนิดที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยไม่แตกต่างกันในช่วงร้อยละ 78.62 - 80.25 (ทดสอบทางสถิติด้วยเทคนิค t-test) กรณีที่ทดลองด้วยอนุภาคเหล็กนาโน พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ทดสอบด้วยเทคนิค t-test) ส่วนการบำบัดไนโตรเจนในระบบชีวภาพแบบเคลื่อนที่พบว่าทุกการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นอยู่ในช่วงร้อยละ 33.88 - 38.49 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ทดสอบทางสถิติด้วยเทคนิค t-test) สำหรับการวิเคราะห์การเกาะของจุลินทรีย์บนตัวกลางด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าจุลินทรีย์จะเกาะติดเฉพาะรอบนอกของตัวกลางพีวีเอเจล และเกาะอยู่ที่ช่องว่างภายในของตัวกลางพลาสติกฟลูออไรด์ และมีรูปร่างส่วนใหญ่ของจุลินทรีย์เป็นกลุ่มเส้นใย แต่เมื่อใช้อนุภาคเหล็กนาโนในการทดลองจะพบสัดส่วนของจุลินทรีย์รูปท่อนเพิ่มสูงขึ้น ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของสารไบโอฟิล์มพบว่ามีสัดส่วนโปรตีนสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตในทุกการทดลอง แต่ตัวกลางพีวีเอเจลมีความเข้มข้นของโปรตีนน้อยกว่าตัวกลางพลาสติกฟลูออไรด์ ดังนั้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิด รูปทรงของตัวกลาง และการเติมอนุภาคเหล็กนาโนส่งผลเพียงบางส่วนต่อแนวโน้มของการเกาะติดของจุลินทรีย์ แต่ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและไนโตรเจน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970274321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Biological Wastewater Treatment, Moving Bed Biofilm Reactor, Biofilm, Iron Nanoparticle

Penpanit Phosawat : Effect of Media on COD and Nitrogen Removal in Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Advisor: Assoc. Prof. DAO SUWANSANG JANJAROEN, Ph.D. Co-advisor: Dr. Chamorn Chawengkijwanich

This research studied the effect of media types and filling ratio on a moving bed biofilm reactor (MBBR) including COD and nitrogen removal. Besides, the study also observed the effect of iron nanoparticles on the biofilm production. The experiments were operated at HRT of 4 hours and flowrate of 18 L/day with a glucose synthetic wastewater of 500, 1000, 2000, and 3000 mg COD/L. The results, started from the variation of PVA gel with filling ratio of 10, 20, and 30%, showed that COD removal efficiency was in range of 86 – 89%. The highest removal efficiency occurred in the filling ratio of 20% with 89% and had a specific COD removal rate equal to 425.86 ± 69.79 mg COD/L-m²-day. The experiment, which compared between PVA gel and PE media, reported that COD removal efficiency was not significant different in range of 78 - 80% by using t-test evaluation. The addition of ferric oxide nanoparticles promoted slightly increase of COD removal efficiency, but the t-test result indicated no significant difference as well. About nitrogen removal, all of the experiments were not significantly different with t-test analysis by reporting as a TKN removal in range of 33.88 – 38.49%. Furthermore, the experiments focused on the observation of microbial attachment on plastic media. SEM images showed the filament group microbes were a dominant group. The microbes were observed at the different position in each media which was the outside surface of PVA and in the protected area of PE. The iron nanoparticles which was added in the final experiment promoted the microbial shifting from filament group to rod shape group. The chemical composition of biofilm resulted that the proportion of protein was higher than carbohydrate content. However, it had some difference in the protein concentration which was lower in PVA gel when compared with PE. Finally, it can conclude that media types, filling ratio, and additional iron nanoparticles have some effects on the microbial attachment, but the COD and nitrogen was not removal.

Field of Study: Environmental Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. จามร เชวงกิจวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา แนะนำถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์รวมถึง ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวสิต รัตนธรรมสกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. พรินท์พิดา สนธิพันธ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชมและแก้ไขให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยนี้ การสนับสนุนบางส่วนจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเทศไทย ในโปรแกรม Research Network NANOTEC (RNN)

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้อุปกรณ์สถานที่ทำงานวิจัย เอื้อเพื่อเครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ด้านต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณบริษัทคูราเร่ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพีวีเอเจลสำหรับการนำมาใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือผู้ทำการวิจัยในทุกๆ ด้าน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ ในการศึกษาและทำวิจัยระดับปริญญาโทมาบัดนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้

เพ็ญพนิต โพธิ์สวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง	ง
กิตติกรรมประกาศ..... จ	จ
สารบัญ..... ฉ	ฉ
สารบัญรูปภาพ..... 1	1
สารบัญตาราง..... 5	5
บทที่ 1 บทนำ..... 7	7
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 7	7
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 9	9
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 9	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 10	10
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 11	11
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ..... 11	11
2.2 ความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับการบำบัดสารอินทรีย์..... 14	14
2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง..... 16	16
2.4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ (MBBR)..... 18	18
2.4.1 ลักษณะระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางเคลื่อนที่..... 21	21
2.4.2 ระบบเติมอากาศ..... 22	22
2.4.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับตัวกลาง (Filter media)..... 22	22
2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไบโอฟิล์ม..... 24	24
2.5.1 กลไกการเกิดไบโอฟิล์ม..... 25	25

2.5.2 การเกาะติดและการหลุดของไปโอฟิล์ม	26
2.5.3 กระบวนการบำบัดสารอินทรีย์.....	27
2.5.4 วิธีการวิเคราะห์ไปโอฟิล์มแบบดั้งเดิม.....	28
2.6 อนุภาคเหล็กนาโน.....	29
2.7 การประเมินคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.8.1 การศึกษาตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดแบบตัวกลางเคลื่อนที่	33
2.8.2 การศึกษาชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย.....	36
2.8.3 การศึกษาอนุภาคเหล็กต่อการเจริญของจุลินทรีย์	37
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 แผนการทดลอง.....	39
3.1.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	39
3.1.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ	40
3.1.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.1.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	43
3.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาปริมาณของตัวกลางและชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมในการเดิน ระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบดเคลื่อนที่	43
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	46
3.3.1 เริ่มต้นเดินระบบ.....	46
3.3.2 การทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบด เคลื่อนที่	46
3.3.3 การทดลองที่ 1.2 ศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมเมื่อกำหนดให้พื้นที่ผิวของตัวกลาง เท่ากัน.....	49
3.3.4 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อการผลิตไปโอฟิล์ม.....	51

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	53
3.5 การวิเคราะห์ทางด้านเคมี	53
เพื่อศึกษาการวิเคราะห์	53
3.6 การวิเคราะห์ทางด้านชีวภาพ	54
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ	54
3.8 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	55
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	58
4.1 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านต่างๆ.....	58
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH).....	58
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen, DO).....	60
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของสารแขวนลอย (Suspended solids, ss).....	63
4.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี ศึกษาการวิเคราะห์ EPS เพื่อหาปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในไบโอฟิล์มบนตัวกลาง	64
4.2 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD).....	69
4.2.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของปริมาณตัวกลางพีวีเอจที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี	69
4.2.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของชนิดตัวกลางพีวีเอจและตัวกลางพลาสติกพีอีที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี.....	76
4.2.3 การทดลองที่ 2 ผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี.....	81
4.3 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN).....	82
4.3.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของปริมาณตัวกลางพีวีเอจที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น	82

4.3.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของชนิดตัวกลางพีวีเอจและตัวกลางพลาสติกพีอีที่ส่งผลต่อระบบ ในการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น.....	82
4.3.3 การทดลองที่ 2 ผลของอนุภาคเหล็กนาโนส่งผลต่อระบบในการเปลี่ยนแปลงของค่า ทีเคเอ็น	83
4.4 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการ เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ.....	85
4.4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของตัวกลางพีวีเอเจล	85
4.4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของตัวกลางพลาสติกพีอี	89
4.5 การวิเคราะห์ทางด้านชีวภาพ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี 16S Metagenomic Miseq500 Prices	92
4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นแนวทางในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ ระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการจัดการน้ำเสีย.....	93
4.3.1 การศึกษาความแตกต่างต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอี.	93
4.3.2 การพิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินการของระบบบำบัดแบบชีวภาพเบด เคลื่อนที่เทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง.....	94
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการทดลอง	98
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม	147
ประวัติผู้เขียน	152

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย.....	15
รูปที่ 2.2	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง	17
รูปที่ 2.3	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่	19
รูปที่ 2.4	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (MBBR)	21
รูปที่ 2.5	การบำบัดสารก่อมลพิษจากน้ำเสียด้วยไบโอฟิล์มบนตัวกลาง	25
รูปที่ 2.6	ขั้นตอนการเกิดไบโอฟิล์ม	26
รูปที่ 2.7	ลักษณะชั้นไบโอฟิล์ม	27
รูปที่ 2.8	การเพิ่มชั้นฟิล์ม	28
รูปที่ 3.1	ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	40
รูปที่ 3.2	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่.....	42
รูปที่ 3.3	แผนผังการไหลของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่.....	42
รูปที่ 3.4	แผนผังการดำเนินการทดลอง.....	45
รูปที่ 3.5	แผนภาพการทดลองที่ 1.1.....	48
รูปที่ 3.6	แผนภาพการทดลองที่ 1.2	50
รูปที่ 3.7	แผนภาพการทดลองที่ 2.....	52
รูปที่ 4.1	ค่าพีเอชระหว่างการศึกษาระดับตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร...59	
รูปที่ 4.2	ค่าพีเอชระหว่างการศึกษามลของอนุภาคเหล็กนาโน ที่ความเข้มข้นซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง....60	

- รูปที่ 4.3** ปริมาณออกซิเจนละลายระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีไอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....62
- รูปที่ 4.4** ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง63
- รูปที่ 4.5** ปริมาณโปรตีนจากการสกัด EPS ตัวกลางพีวีเอเจลระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร65
- รูปที่ 4.6** ปริมาณคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ตัวกลางพีวีเอเจลระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร65
- รูปที่ 4.7** ปริมาณโปรตีนของ EPS จากการสกัดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....66
- รูปที่ 4.8** ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ EPS จากการสกัดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....67
- รูปที่ 4.9** ปริมาณโปรตีนของ EPS จากการสกัดตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....68
- รูปที่ 4.10** ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ EPS จากการสกัดตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร68
- รูปที่ 4.11** ปริมาณซีไอดีระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีไอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 71
- รูปที่ 4.12** ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีไอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 72

รูปที่ 4.13 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....75

รูปที่ 4.14 รูประหว่างการเดินระบบ.....75

รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นซีโอดีระหว่างการศึกษาระดับกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) พลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 77

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร...78

รูปที่ 4.17 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร...80

รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย ระหว่างการศึกษาระดับกลางของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อระบบภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน 81

รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับกลางของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อระบบ ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน82

รูปที่ 4.20 ปริมาณความเข้มข้นที่เคเอ็น (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร...83

รูปที่ 4.21 ปริมาณความเข้มข้นที่เคเอ็น เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง.....84

- รูปที่ 4.22** ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นเฉลี่ย ที่ความเข้มข้นซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง.....84
- รูปที่ 4.23** ตัวกลางพีวีเอเจลที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (ก) ก่อนเริ่มเดินระบบ (ข) 1,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร (ค) 2,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร (ง) 3,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร86
- รูปที่ 4.24** ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ((SEM-EDS(IT-500HR)) ของตัวกลางพีวีเอเจลก่อนใช้งาน (ก) ตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ข) พื้นผิวของตัวกลางพีวีเอเจลกำลังขยาย 500 เท่า (ค) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ง) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 500 เท่า.....87
- รูปที่ 4.25** ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ((SEM-EDS(IT-500HR)) ของตัวกลางพีวีเอเจลหลังใช้งาน (ก) ตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ข) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนขอบพื้นผิวตัวกลางที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนพื้นที่รูพรุน กำลังขยาย 500 เท่า (ง) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนพื้นที่รูพรุน กำลังขยาย 5,000 เท่า.....88
- รูปที่ 4.26** ตัวกลางพลาสติกฟีด (ก) ยังไม่ได้ใช้งาน (ข) หลังจากบ่ม 14 วัน (ค) หลังจากเดินระบบ 24 วัน (ง) หลังจากเดินระบบ 79 วัน89
- รูปที่ 4.27** ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) (ก) ตัวกลางพลาสติกฟีดเมื่อใช้เหล็กคลอไรด์เป็นองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ กำลังขยาย 17 เท่า (ข) ตัวกลางพลาสติกฟีดเมื่อใช้เหล็กคลอไรด์เป็นองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ กำลังขยาย 5,000 เท่า (ค) ตัวกลางพลาสติกฟีดเมื่อใช้เหล็กอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ 5,000 เท่า.....91
- รูปที่ 4.28** ผลการวิเคราะห์กลุ่มไฟลัม (Phylum) ของประชากรจุลินทรีย์ที่สกัดจากตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกฟีด92

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่งและระบบชีวภาพเคลื่อนที่.....	20
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระบบบำบัดน้ำเสีย.....	31
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร	39
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวกลาง.....	41
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.1.....	46
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.2.....	49
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 2.....	51
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย.....	52
ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษ ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	58
ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษ ชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	59
ตารางที่ 4.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษ ปริมาณตัวกลาง.....	61
ตารางที่ 4.4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษ ชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	62
ตารางที่ 4.5 ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ของตัวกลางพีวีเอเจลระหว่างการศึกษ ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ.....	64
ตารางที่ 4.6 ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ของตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษ ชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	66
ตารางที่ 4.7 ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ของตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษ ผลของอนุภาคเหล็กนาโน	67
ตารางที่ 4.8 ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษ ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	71

ตารางที่ 4.9	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1	72
ตารางที่ 4.10	อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) ระหว่างการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	74
ตารางที่ 4.11	ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 2 ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	77
ตารางที่ 4.12	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 2 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 3 ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ	78
ตารางที่ 4.13	อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)	80
ตารางที่ 4.14	เปรียบเทียบต้นทุนค่าจ่ายของตัวกลางที่ใช้ในการทดลองที่ 4.1	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์ปี 2559 ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกอาหารอันดับที่ 13 ของโลก และเป็นอันดับที่ 3 ในเอเชีย (ฐานเศรษฐกิจ, 2016) ทำให้แนวโน้มของการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านอาหารของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและส่งผลให้เศรษฐกิจภายในประเทศดีขึ้น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศที่มีการส่งออกสินค้าอาหารไปทั่วโลก

ในประเภทของอาหารที่ส่งออกนั้นกลุ่มของการประมงมีการส่งออกสูงเป็นอันดับ 3 รองลงมาจากข้าวและผลไม้ ซึ่งแม้การประมงจะอยู่เป็นอันดับ 3 แต่อุตสาหกรรมอาหารจำพวกนี้ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ถ้าหากน้ำเสียเหล่านั้นไม่ได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ คุณภาพน้ำเสื่อมโทรม แหล่งน้ำส่งกลิ่นเหม็น และก่อให้เกิดการแพร่ระบาดของเชื้อโรค อีกทั้งส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพ ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นต้องได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป โดยวิธีบำบัดน้ำเสียที่นิยมในปัจจุบันคือวิธีการทางฟิสิกส์ เคมีและชีวภาพ ซึ่งการเลือกวิธีการบำบัดให้เหมาะสมกับประเภทน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีความสำคัญเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพอย่างสูงสุด และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันโดยทั่วไปคือระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated sludge system, AS) ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological treatment) มีหลักการทำงานโดยใช้จุลินทรีย์ที่อยู่ในรูปแขวนลอยในการบำบัดน้ำเสีย เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ถังเติมอากาศและถังตกตะกอน เมื่อน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะเข้าสู่ถังตกตะกอน ตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยทิ้งออกและบางส่วนจะสูบกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศเพื่อเป็นการรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้คงที่ แต่เนื่องจากในปัจจุบันพื้นที่ใช้สอยมีอย่างจำกัด แต่โรงงานมีกำลังผลิตที่สูง ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมีปริมาณมากทำให้ระบบไม่อาจรองรับได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและประยุกต์ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสขึ้นมาเป็นระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ (Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR) ซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง (Bassin และคณะ 2016; Gu และคณะ 2014; Zhang และคณะ 2016) โดยระบบมีหลักการคือการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะติดบนตัวกลาง และเคลื่อนที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมอากาศเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย สารอินทรีย์จะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้สูงและยังสามารถบำบัดน้ำเสียได้

หลายประเภท เช่น น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม ด้วยระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่เป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในรูปเกาะติดจึงทำให้เป็นการแยกเชื้อจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งในบางส่วน จึงทำให้ระบบมีขนาดกะทัดรัดและใช้พื้นที่น้อยกว่าการที่มีถังตกตะกอนขนาดเล็กลง อีกทั้งการเดินระบบและการบำรุงรักษาไม่ซับซ้อนทำให้เป็นระบบที่ประหยัดค่าใช้จ่ายเหมาะสมกับสภาพปัจจุบันซึ่งราคาที่ดินค่อนข้างสูงและมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสามารถรับการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันได้ดี (shock load) และยังเป็นระบบที่ปรับตัวได้เร็วจากสภาพแวดล้อม ดังนั้นระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ จึงมีความสามารถในการช่วยแก้ปัญหา shock load ของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมอาหารที่มีอัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ส่งออกในปริมาณที่สูงได้

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน จึงมีงานวิจัยศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง และผลของอัตราการอินทรีย์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ที่ระบบสามารถรับได้ ((Bassin และคณะ 2016)) มีการศึกษาอัตราการบรรจุตัวกลาง โดยบางงานวิจัยพบว่า อัตราการใส่ตัวกลางไม่มีผลต่ออัตราการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียน้อย (Gu และคณะ (2014)) และอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือธาตุอาหาร (Nutrient) ซึ่งหลักเป็นธาตุอาหารหนึ่งที่มีการเติมเพื่อเป็นธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์ (โดยปกติมักเติมในรูปเฟอริคคลอไรด์) การเติมธาตุอาหารจะต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าธาตุอาหารมีมากเกินไปจะทำให้เป็นการสิ้นเปลืองและยังเป็นสารพิษทำลายสิ่งแวดล้อมด้วย นอกจากนี้หลักจะพบว่าธาตุอาหารที่จำเป็นของจุลินทรีย์แล้ว ถ้าหลักอยู่ในรูปของอนุภาคหลักนาโนจะมีสมบัติในการทำปฏิกิริยารีดิวซ์สารอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดมลภาวะ ให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลง จึงได้รับความสนใจในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่า เหล็กนาโนอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และระยะ lag phase ทั้งในทางบวกและทางลบ (Lee และคณะ, 2008; Li และคณะ, 2010; Xiu และคณะ, 2010a, 2010b) รวมทั้งมีการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์สามารถส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ เมื่อใช้ความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กแตกต่างกัน (Mohanraj และคณะ 2014)

จากการทดลองส่วนใหญ่ที่ผ่านมายังขาดการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่ได้ อาจไม่คุ้มค่ากับราคาของตัวกลางส่งผลให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน และยังไม่มีการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ เพื่อช่วยลดอันตรายจากสภาพแวดล้อมของจุลินทรีย์ในระบบและลดระยะ lag phase ทำให้ระบบใช้เวลาช่วงเริ่มต้นเดินระบบลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับวัสดุตัวกลางชนิด

ต่างๆที่เหมาะสมในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น โดยใช้ตัวกลางต่างชนิดกันคือพลาสติกพีอีและพีวีเอเจล โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งศึกษาปริมาณการใส่ตัวกลางที่เหมาะสม ปริมาณคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนในชีวมวลที่เกาะติดตัวกลาง ผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อการเกิดไบโอฟิล์มและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาชนิดตัวกลางและปริมาณการบรรจุที่เหมาะสมต่อการเกาะของจุลินทรีย์
- 1.2.2 ประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ต่อการบำบัดซีไอดีและไนโตรเจน โดยใช้ตัวกลางต่างชนิดกัน
- 1.2.3 ศึกษาผลของการเติมอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอฟิล์ม และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นแนวทางในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการจัดการน้ำเสียต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.2 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน มีองค์ประกอบ COD : N : P (100 : 5 : 1)
- 1.3.3 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ทรงสี่เหลี่ยมทำจากแผ่นอะคริลิก กว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.15 เมตร และ สูง 0.2 เมตร มีปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 0.006 ลูกบาศก์เมตร และมีปริมาตรสำหรับทำงาน 3 ลิตร
- 1.3.4 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย คือ พลาสติกพีอีและพีวีเอเจล
- 1.3.5 หัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากบริษัท รอยัลฟูดส์ จำกัด
- 1.3.6 เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นอนุภาคเหล็กนาโน
- 1.3.7 ศึกษาพารามิเตอร์ พีเอช (pH) ปริมาณสารแขวนลอย (suspended solids) ออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) ซีไอดี (chemical oxygen demand; COD) และไนโตรเจน(ไนโตรเจนอินทรีย์และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน) ในระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่

1.3.8 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุตัวกลางและไบโอฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

1.3.9 ศึกษาปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนของชีวมวลที่เกาะติดตัวกลาง

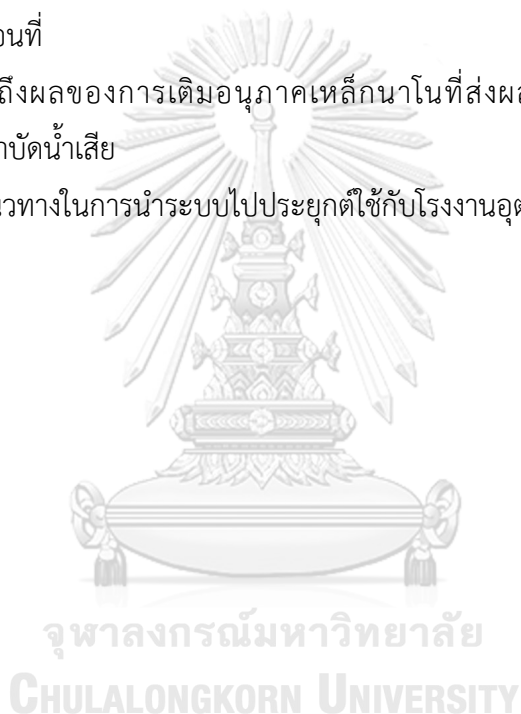
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร

1.4.2 ทราบถึงชนิดของวัสดุตัวกลางและลักษณะตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่

1.4.3 ทราบถึงผลของการเติมอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอฟิล์ม และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

1.4.4 เป็นแนวทางในการนำระบบไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) คือ ระบบที่ใช้บำบัดหรือลดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำ ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์และส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ได้ โดยจุลินทรีย์จะทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลายสิ่งสกปรกให้มีขนาดเล็กและกลายเป็นธาตุอาหาร โดยมีแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกเป็นจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่บำบัดสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสียโดยตรง สารอินทรีย์จะถูกนำไปใช้ในการสร้างพลังงานและเพิ่มจำนวน ซึ่งชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ในระบบบำบัดน้ำเสียมักมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำงานร่วมกัน ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของน้ำเสีย อุณหภูมิ พีเอช สภาวะออกซิเจน และสารพิษ เป็นต้น การบำบัดทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากในงานบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุด มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำและผลกระทบจากการบำบัดแบบชีวภาพ ที่เกิดขึ้นมีน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการบำบัดทางเคมีหรือกระบวนการอื่นๆ โดยการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต้องประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ คือ

1. ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์หรือถังบำบัดน้ำเสีย มีไว้เพื่อให้จุลินทรีย์อยู่อาศัยและทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียจะขึ้นกับความสามารถของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมที่จุลินทรีย์อาศัย ดังนั้นถังปฏิกรณ์จึงมีความสำคัญทั้งขนาดและรูปร่าง เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโต เช่น ถังบำบัดในระบบเลี้ยงตะกอนเร่งต้องออกแบบให้ไม่มีจุดอับในการกวนผสมหรือการเติมอากาศเข้าไปในระบบ

2. การควบคุมสภาพแวดล้อมของน้ำเสีย

การควบคุมสภาพแวดล้อมของน้ำเสียให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2.1 ความเป็นกรด-ด่าง

การควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโต เพิ่มจำนวน และยับยั้งกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ เช่น การควบคุมสภาวะให้เป็นกลาง เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อราและแบคทีเรียเส้นใย

2.2 สภาวะไร้อากาศหรือมีอากาศในระบบบำบัด

จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียมีความต้องการสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะมีกลุ่มของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการอากาศ และระบบบำบัดแบบใช้อากาศจะมีกลุ่มจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย

2.3 การควบคุมสารพิษ

น้ำเสียบางชนิดอาจมีสารที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ปนเปื้อนเข้ามาในระบบบำบัด ซึ่งส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบตายและทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียเกิดความล้มเหลวไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้ ดังนั้นต้องมีการควบคุมสารพิษให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับจุลินทรีย์ในระบบ

2.4 การบำบัดตะกอนจุลินทรีย์

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะเปลี่ยนเป็นมวลของจุลินทรีย์ จึงต้องมีการบำบัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย และมีการหมุนเวียนตะกอนกลับเข้าสู่ถังบำบัดเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ให้คงที่

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบ่งได้ 2 วิธี คือ การบำบัดแบบใช้อากาศและการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศเป็นหลัก

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศ หรือการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิต ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Aerobic heterotrophic bacteria ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งาน การควบคุมและเทคโนโลยีที่ใช้ โดยจะมีตั้งแต่ระบบที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ บ่อผึ่ง บ่อปรับเสถียร ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ได้ อาจไม่สูงมาก จนถึงระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงแต่ต้องอาศัยการควบคุมที่ยุ่งยากซับซ้อน เช่นระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง เป็นต้น ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทตามลักษณะของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย คือ ระบบตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended growth system) และระบบตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง (Attached growth system)

2.1.1 ระบบตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended growth system)

ระบบตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย เป็นระบบที่จุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียที่เข้ามาในถังปฏิกรณ์ ซึ่งภายในถังจะมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ระบบนี้จำเป็นต้องมีถังตกตะกอน เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านบำบัดแล้ว และต้องรักษาระดับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ให้คงที่

2.1.2 ระบบตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง (Attached growth system)

ระบบตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง เป็นระบบมีการออกแบบให้ตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลางในถังเติมอากาศ ซึ่งตัวกลางที่นำมาใช้จะต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสม เช่น มีน้ำหนักเบา มีความพรุน มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จุลินทรีย์สามารถเกาะติดได้ง่าย ข้อดีของระบบตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง คือ สามารถควบคุมความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดได้ และเนื่องจากระบบจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลางมีอายุตะกอนสูงทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มไนโตรไฟอิงแบคทีเรียและดีไนโตรไฟอิงแบคทีเรีย ดังนั้นจึงทำให้สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้ ซึ่งระบบจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลางสามารถแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวกลางได้ 2 ประเภท คือ

2.1.2.1 ระบบบำบัดแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed)

เป็นระบบบำบัดที่ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังบำบัดน้ำเสียที่มีการบรรจุตัวกลางอยู่ภายในถังบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่โดยที่ตัวกลางจะถูกตรึงอยู่กับที่ เช่น ระบบโปรยกรอง ซึ่งจะเป็นระบบที่มีตะกอนจุลินทรีย์เจริญอยู่บนตัวกลางโดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ น้ำจะเคลื่อนที่ไหลจากด้านบนผ่านตัวกลางเพื่อให้เกิดการสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวตัวกลาง เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสารอินทรีย์และเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนไปโอฟิล์มจะหนาขึ้นเรื่อยๆและหลุดออกจากตัวกลาง

2.1.2.2 ระบบบำบัดแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving bed)

เป็นระบบที่มีการบรรจุตัวกลางลงในถังบำบัดน้ำเสีย ภายในมีตัวกลางเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในถังบำบัดแบบตัวกลางเคลื่อนที่ มีการป้อนน้ำเสียและระบบเติมอากาศเข้าสู่ระบบตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของตัวกลางและเกิดการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนตัวกลางกับน้ำเสียและเกิดการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

2.2 ความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับการบำบัดสารอินทรีย์

ในสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ จุลินทรีย์จะอยู่รวมกันหลายชนิดและปรับตัวเพื่อเอาตัวรอดในสภาพแวดล้อมนั้นๆ จุลินทรีย์เจริญเติบโตและดำรงชีวิต โดยใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารเพื่อเป็นแหล่งพลังงานรวมทั้งเป็นแหล่งวัตถุดิบในการสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งอัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตและเป็นพลังงานในการดำรงชีวิตนั้นจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ เช่น จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจะมีการใช้สารอินทรีย์ ร้อยละ 50-70 ในการสร้างเซลล์ใหม่และจะใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตร้อยละ 30-50 ปฏิกริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน มี 2 ขั้นตอนคือ

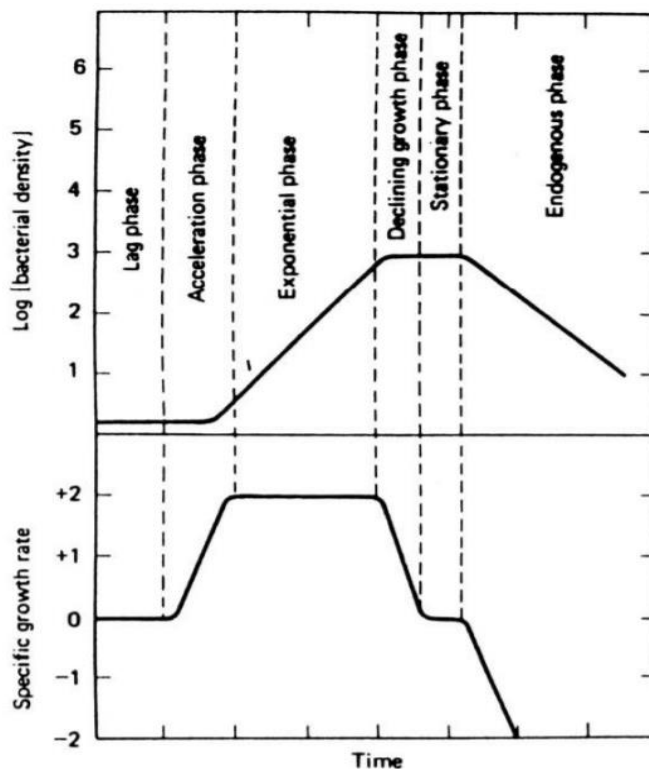
1. ปฏิกริยาการใช้ออกซิเจนในการสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงาน



2. การสร้างเซลล์ใหม่จากพลังงานที่ได้ในขั้นตอนแรก



ลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด แบ่งออกเป็น 6 ช่วงเวลา ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

(ที่มา : http://infofile.pcd.go.th/ptech/anair_manual2.pdf?CFID=2565577&CFTOKEN=64340246)

ช่วงที่ 1 Lag phase ระยะปรับตัว เป็นช่วงระยะแรกที่จุลินทรีย์มีการเริ่มปรับตัวเข้าสู่สภาพแวดล้อมใหม่ ต้องการเวลาในการแบ่งตัวมาก อัตราการเจริญเติบโตจึงน้อย

ช่วงที่ 2 Acceleration phase ระยะเร่งเติบโต เวลาแบ่งตัวสั้นลง และมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น จำนวนจุลินทรีย์ค่อยๆเพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 3 Exponential phase ระยะเติบโตถึงขีดสุด มีการเพิ่มของจุลินทรีย์อย่างมาก ถึงระดับสูงสุดและคงที่ ช่วงนี้จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูงที่สุด จึงเป็นช่วงที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสีย

ช่วงที่ 4 Declining growth phase ระยะลดการเติบโต เป็นช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตลดลงเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียลดลง หรือจุลินทรีย์เกิดการสะสมของสารพิษ

ช่วงที่ 5 Stationary phase ระยะพักการเจริญเติบโต เป็นระยะที่ไม่มีอาหารเหลือ มีอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับอัตราการตาย

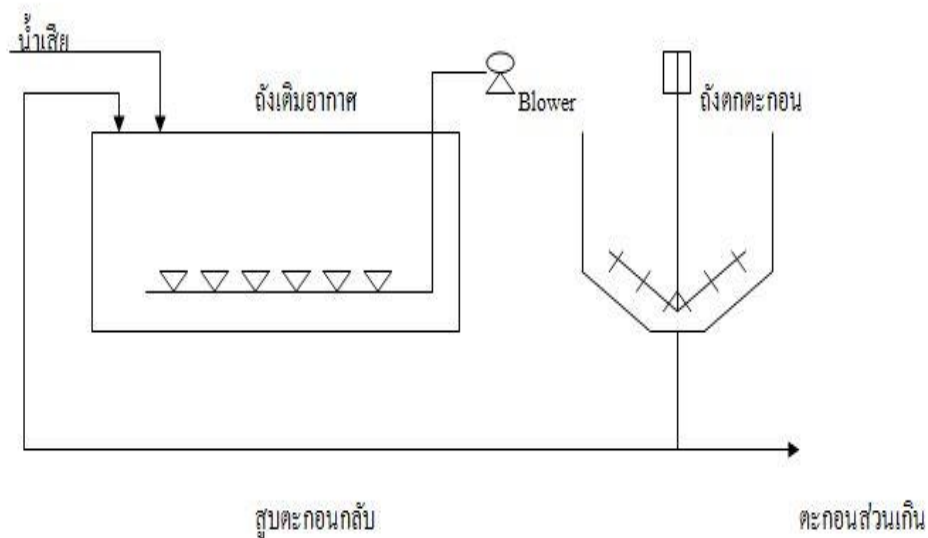
ช่วงที่ 6 Endogenous phase ระยะย่อยสลายตัวเอง มีอัตราการตายของจุลินทรีย์มาก ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบค่อยๆลดลง

2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated sludge system) เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียที่ใช้แบคทีเรียจำพวกใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นตัวหลัก นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถบำบัดได้ในน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การเดินระบบจำเป็นต้องมีการควบคุมสถานะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด และจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือต่างๆ เช่น บั้มสูบลูกตะกอนจุลินทรีย์ เครื่องเติมอากาศ เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น ดังนั้นค่าใช้จ่ายและค่าก่อสร้างในการเดินระบบค่อนข้างสูง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่งสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบตามความเหมาะสมในการใช้งาน

ในปัจจุบันระบบเลี้ยงตะกอนเร่งมีการพัฒนาใช้งานหลายรูปแบบ เช่น ระบบแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mix) ระบบแบบปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Process) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) หรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) เป็นต้น

หลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ถังเติมอากาศ (Aeration tank) และถังตกตะกอน (Sedimentation tank) ดังรูปที่ 2.2 น้ำเสียจะถูกนำเข้าสู่ถังเติมอากาศ ภายในถังจะมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออก หลังจากตกตะกอนจุลินทรีย์จะแบ่งได้ 2 ส่วนคือส่วนน้ำด้านบนจะมีลักษณะเป็นสีใส น้ำส่วนนี้จะเป็นน้ำทิ้งสามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนอยู่ก้นถัง เพื่อรักษาความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศให้คงที่ ดังนั้นตะกอนจุลินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับเข้าไปในถังเติมอากาศใหม่ และอีกส่วนหนึ่งจะนำไปบำบัดต่อไป



รูปที่ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนเร่ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง

1. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ดังนั้นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการควบคุมการทำงานที่ต้องควบคุมอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าเหมาะสม

2. สารอาหารเสริมหลัก

จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมหลัก (Nutreint) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก โดยทั่วไปจะอยู่ในน้ำเสียชุมชน ซึ่งอาหารเสริมของจุลินทรีย์อาจไม่เพียงพอในน้ำเสียอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารที่สำคัญนี้จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ไม่ดีในกลุ่มของจุลินทรีย์จำพวกสร้างฟล็อก และทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโตได้มากกว่า ส่งผลให้ตะกอนลอยไม่จมตัว และไหลปนกับน้ำที่ออกมา ปกติจะควบคุมตามอัตราส่วน BOD : N : P : Fe เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5

3. ออกซิเจนละลาย

ออกซิเจนละลายต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังเติมอากาศสูง จุลินทรีย์จะทำงานได้มาก และออกซิเจนจะมีค่าการละลายอิมตัวต่ำจึงทำให้ต้องการออกซิเจนมาก

4. ระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียต้องมีมากเพียงพอที่จะให้จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสิ่งสกปรกต่างๆ หากเวลาไม่เพียงพอสิ่งสกปรกจะถูกย่อยสลายได้ไม่หมดตกค้างในระบบ ทำให้มีค่าบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมามาก

5. พีเอช

ค่าพีเอชมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความสามารถทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกัน โดยแบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชระหว่าง 6.5-8.5 ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ว่าจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรีย แต่ถ้าค่าพีเอชสูงจะทำให้ฟอสฟอรัสตกตะกอนผลึกแยกออกจากน้ำ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทำให้ระบบทำงานไม่ได้

6. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ถ้าหากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะทำให้จุลินทรีย์เจริญช้าหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และถ้าไม่เหมาะสมมากจะทำให้จุลินทรีย์ตาย

7. การกวน

ภายในถังเติมอากาศต้องมีการกวนอย่างทั่วถึงเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้ามาบำบัด ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง การกวนแบบสมบูรณ์จะทำให้ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed Liquor Suspended Solid : MLSS) และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสม่ำเสมอทั่วตลอดทั้งระบบ

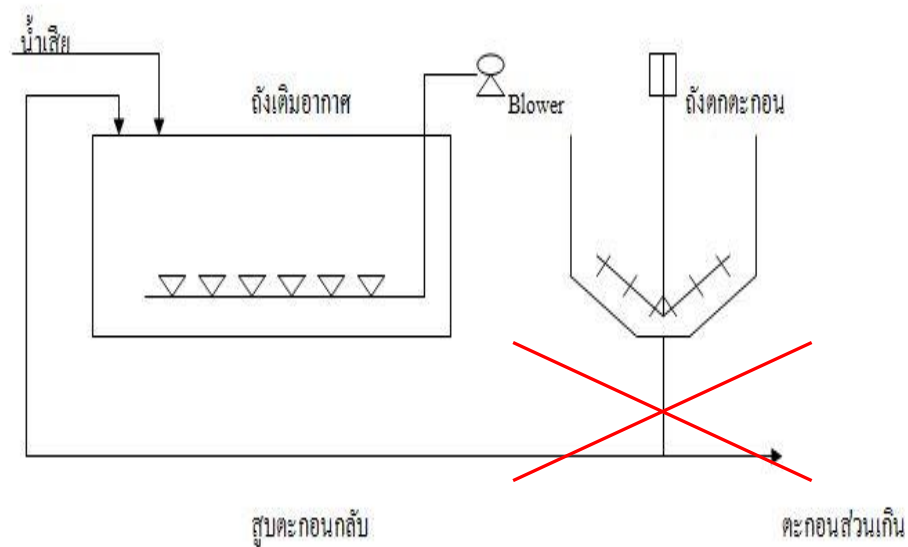
8. อัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดมีผลโดยตรงต่อการทำงานของวิธีการบำบัดทางชีวภาพ ควรมีการควบคุมให้มีการส่งน้ำเสียเข้าระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับอัตราส่วนสารอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ที่ออกแบบไว้ ดังนั้นหากน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงควรสร้างถังปรับเสมอก่อนเข้าถังเติมอากาศ

2.4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ (MBBR)

ระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ หรือ MBBR เป็นเทคโนโลยีการเติบโตของไบโอฟิล์มที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เกิดขึ้นจากการพัฒนาข้อดีของระบบจุลินทรีย์เกาะติดเพื่อบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพสูงและการพัฒนาของระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง ทำให้ระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่มีคุณสมบัติ

ที่ดีของกระบวนการกรองชีวภาพเมื่อเทียบกับระบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Zhang และคณะ (2016)) ซึ่งระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่แตกต่างจากระบบเลี้ยงตะกอนเร่งตรงที่ไม่มีการเวียนตะกอนจุลินทรีย์กลับไปใช้ในระบบและภายในระบบบำบัดน้ำเสียมีการบรรจุตัวกลางพลาสติกขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นพื้นที่ในการเกาะติดของจุลินทรีย์และสร้างไบโอฟิล์มในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติในการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้พลังงานต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

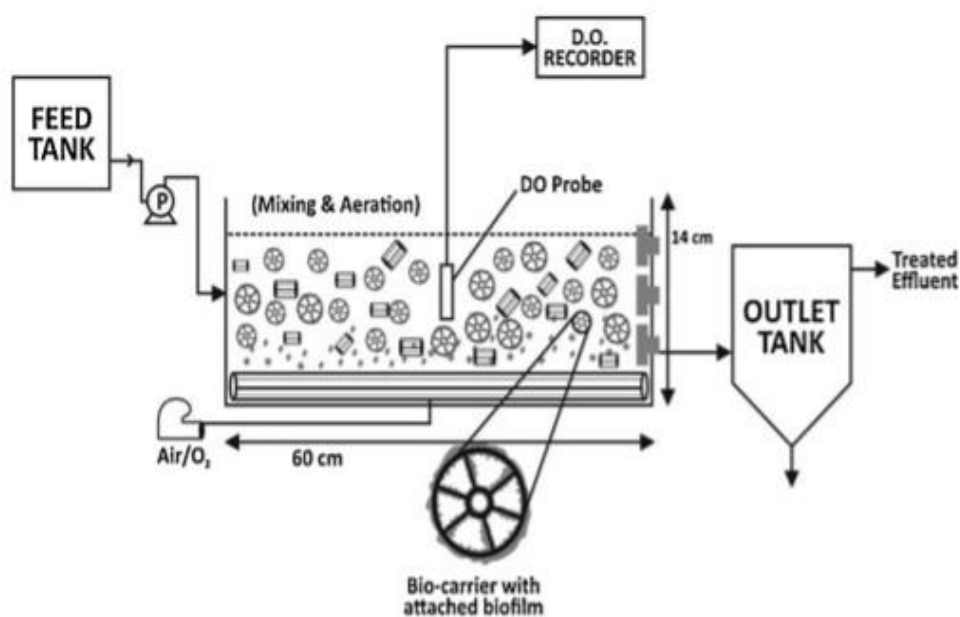
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่งและระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่

คุณสมบัติ	ระบบตะกอนเร่ง	ระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่	หมายเหตุ
ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง	/	/	
กะทัดรัด ประหยัดพื้นที่	/	/	ระบบตะกอนเร่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบบำบัดชนิดอื่นๆ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon หรือ AL) แต่เมื่อเทียบกับระบบ MBBR มีความกระชับที่น้อยกว่า
รับภาระอินทรีย์ได้ในปริมาณสูง	/	/	
บำบัดน้ำเสียได้หลายประเภท	/	/	
สามารถทำงานร่วมกับระบบบำบัดชนิดอื่นได้	/	/	
ลงทุนสูงในการก่อสร้าง ดำเนินการและดูแลรักษา	/	/	
ใช้บุคลากรที่มีความรู้และชำนาญงาน	/	/	
เกิดตะกอนส่วนเกินและตะกอนลอย	/	/	ระบบตะกอนเร่งเกิดตะกอนส่วนเกินในปริมาณสูงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนเพิ่มขึ้น
ระบบเติมอากาศ	/	/	ต้องมีระบบสำรองไฟ ป้องกันเวลาไฟฟ้าดับ และออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้จุลินทรีย์เกิดการตายได้

2.4.1 ลักษณะระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางเคลื่อนที่

Barwal และ Chaudhary (2015) แบ่งระบบบำบัดชีวภาพแบบเคลื่อนที่ออกเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.4 คือ

1. ส่วนแรกจะเป็นส่วนของตัวถังปฏิกรณ์ ในส่วนแรกนี้ จะมีการบรรจุตัวกลางในระบบบำบัดซึ่งอัตราการบรรจุตัวกลางต้องมีความเหมาะสมเพื่อตัวกลางนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้และเพื่อให้ระบบเกิดประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้สูงสุด
2. ส่วนของระบบเติมอากาศ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ภายในระบบจะต้องมีการกระจายของอากาศเพื่อให้ตัวกลางสามารถลอยตัวได้และให้ระบบได้รับออกซิเจนอย่างเพียงพอ และเป็นการเพิ่มอัตราการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลางกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย กับไบโอฟิล์มจะเจริญเติบโตเข้าไปในโครงสร้างของตัวกลาง



รูปที่ 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (MBBR)

ที่มา : Barwal และ Chaudhary (2015)

2.4.2 ระบบเติมอากาศ

การเลือกรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมมีความสำคัญสำหรับการทำงานของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ (Li และคณะ (2011)) ระบบเติมอากาศมีบทบาทหน้าที่ 2 อย่าง คือ

1. เป็นแหล่งออกซิเจนให้กับจุลินทรีย์ที่ต้องการใช้อากาศ
2. เป็นการเพิ่มการปั่นป่วนของเหลวให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ และช่วยรักษาความหนาของไบโอฟิล์มเนื่องจากการชนกัน และทำให้ไบโอฟิล์มเกิดการหลุดออกจากพื้นผิวของตัวกลาง ซึ่งถ้าความปั่นป่วนมากเกินไปในระบบอาจทำให้หลุดออกจากตัวกลางซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

ระบบการเติมอากาศมีบทบาทสำคัญ เช่นการไหลของฟองอากาศที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.0 โครงสร้างของกระแสน้ำวนจะมีเสถียรภาพและสมมาตรมากขึ้น เกิดความปั่นป่วนเล็กน้อยกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อฟองอากาศที่จะอยู่ในน้ำ มีระยะเวลาการสัมผัสที่มีประสิทธิภาพและพื้นที่ติดต่อระหว่างฟองอากาศและน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

Cheng และคณะ (2014) พบว่า ในกระบวนการเติมอากาศนี้จะส่งผลต่อขนาดและจำนวนฟองอากาศโดยตรง ซึ่งการกระจายตัวของฟองอากาศจะแตกต่างกันไป การเพิ่มของอัตราการเติมอากาศมีผลต่อการกระจายตัวของฟองอากาศและการกระจายความเร็ว ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนออกซิเจนและประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนออกซิเจน ดังนั้นอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการดำเนินงานของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่

2.4.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับตัวกลาง (Filter media)

ตัวกลาง (Filter media) คือ วัสดุที่ใส่ลงไปในระบบบำบัดเพื่อให้จุลินทรีย์เกาะและเจริญเติบโตอยู่ที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ช่วยป้องกันการหลุดของตะกอนจุลินทรีย์ ต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่จุลินทรีย์สามารถเกาะได้ดี รวมถึงไม่ก่อให้เกิดการอุดตันหรือการไหลลัดวงจรภายในระบบ เพื่อให้ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพในการดำเนินงานสูง (สิทธิโชค บัวดี, 2547)

ตัวกลางพลาสติก (Plastic Media) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์บำบัดน้ำเสียที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยวิศวกรสิ่งแวดล้อมทำหน้าที่เสมือนบ้านให้แบคทีเรียเกาะภายในระบบบำบัดน้ำเสีย (เพิ่มระยะเวลาและปริมาณแบคทีเรีย) รวมทั้งป้องกันไม่ให้แบคทีเรียหลุดออกมาพร้อมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

วัสดุตัวกลางเป็นหน่วยพื้นฐานของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบจุลินทรีย์เกาะติดพื้นผิวของตัวกลางเป็นบริเวณสำหรับการเจริญเติบโตของไบโอฟิล์ม ตัวกลางต้องมีความแข็งแรง คงทนต่อสารเคมี การเลือกขึ้นอยู่กับขนาด ความพรุน ความหนาแน่นรวมทั้งความต้านทานต่อการกัดเซาะและสารเคมี ตัวกลางในอุดมคติ จะมีคุณสมบัติที่มีพื้นผิวเฉพาะเจาะจงสูง ราคาถูก และมีความพรุนสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตัน พื้นผิวและรูปร่างของวัสดุตัวกลางมีผลต่อสถานะของไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์และส่งผลต่อการก่อตัวของไบโอฟิล์มซึ่งจะส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสีย

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุสังเคราะห์และวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น โพลีสไตรีน โพลีพรพิลีน ยางรถยนต์ และก้อนกรวด เป็นต้น เพื่อเป็นวัสดุตัวกลางในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางมีความสำคัญต่อของความเข้ากันได้กับการเจริญของไบโอฟิล์มที่เจริญ สำหรับการตรวจจับและการหาปริมาณขององค์ประกอบในตัวกลางจะมีการใช้เทคนิคทางสเปกโตรสโกปีเช่นเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

ตัวกลางมีบทบาทสำคัญในการให้จุลินทรีย์เกาะติดและเจริญเป็นไบโอฟิล์ม ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย มีหลากหลายรูปแบบ โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีขนาดเล็ก ปัจจัยที่สำคัญคือพื้นผิวจำเพาะ รูปร่าง และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โครงสร้างรูพรุน

คุณสมบัติของตัวกลางที่ควรมีได้แก่

1. มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงเพื่อให้จุลินทรีย์เกาะติดและเจริญเติบโต
2. ทนทาน มีอายุการใช้งานยาวนาน
3. ไม่มีจุดอับที่น้ำเสียไหลผ่านไม่ได้ ของเหลวต้องไหลผ่านผิวหน้าของตัวกลางที่จุลินทรีย์เกาะติดได้อย่างทั่วถึง
4. มีสภาพเฉื่อยทางชีวภาพ ไม่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

ประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ทำได้โดยตรงจากคุณสมบัติของพื้นที่ผิว ซึ่งสามารถเพิ่มได้จากปริมาณการบรรจุตัวกลางลงไปในระบบ โดยปกติอัตราการบรรจุตัวกลางจะอยู่ในช่วงร้อยละ 30-70 อย่างไรก็ตามการบรรจุตัวกลางที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวกลางทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ลดลง

2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไบโอฟิล์ม

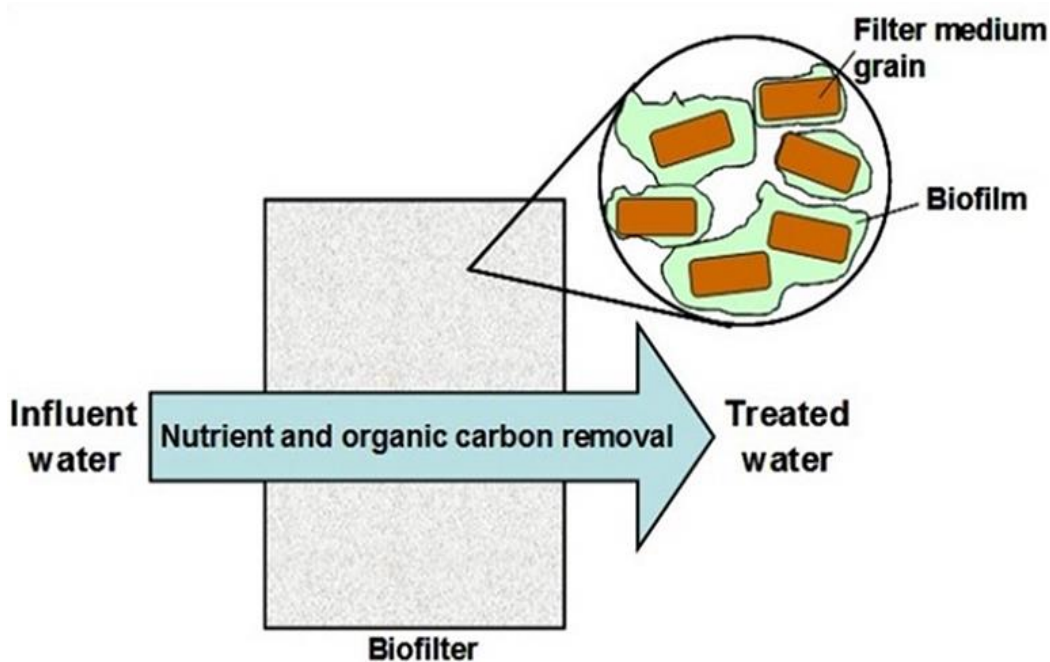
ไบโอฟิล์ม (Biofilm) คือ การรวมกลุ่มของจุลินทรีย์และยึดเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของวัสดุที่มีการสัมผัสน้ำ มีลักษณะเป็นเมือกของเหลวโพลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ และอนินทรีย์ มีสูตรเคมีคือ $(C_5H_7O_2)_n$ ส่วนใหญ่ร้อยละ 87-96 โดยน้ำหนักมีองค์ประกอบเป็นน้ำ และมีของแข็งระเหยได้เพียงร้อยละ 1.9-3.2 และยังสามารถประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์เพียงเล็กน้อย เช่น เหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม โดยปกติไบโอฟิล์มเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อมนุษย์ในหลายด้าน เช่น

ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ : ไบโอฟิล์มก่อให้เกิดโรคแก่ผู้บริโภครวมถึงเมื่อจุลินทรีย์เกิดการปนเปื้อนในน้ำจะทำให้เกิดการลัมป่วย เกิดการสะสมของคราบแบคทีเรียในปากซึ่งนำไปสู่การเกิดโรคฟันผุ และยังเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้แบคทีเรียทนทานต่อยาปฏิชีวนะส่งผลให้เกิดการดื้อยาของเชื้อโรคหลายชนิดอีกด้วย

ผลกระทบต่อระบบสาธารณสุขและอุตสาหกรรม : ไบโอฟิล์มก่อให้เกิดการอุดตันของท่อต่างๆทั้งท่อน้ำทิ้ง ท่อน้ำในระบบหล่อเย็นและในกระบวนการผลิตอาหาร จากการเกิดขึ้นไบโอฟิล์มที่หนาและส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำ

ซึ่งในทางสิ่งแวดล้อมแล้วไบโอฟิล์มมีประโยชน์ในแง่ด้านการบำบัดน้ำเสียทำให้คุณภาพน้ำทิ้งมีคุณภาพที่ดีขึ้นจากระบบการบำบัดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในไบโอฟิล์มในระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบไบโอฟิล์มเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาโดยเติมตัวกลางเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการเจริญเติบโตแบบแขวนลอยเพื่อให้พื้นผิวเกาะติดเป็นไบโอฟิล์ม เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์และอัตราการปนเปื้อนของไบโอฟิล์มเพื่อใช้ประโยชน์จากกลไกการบำบัดต่างๆรวมถึงการย่อยสลายทางชีวภาพ การสะสมทางชีวภาพ ชุมชนจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มจะสลายสารอาหารต่างๆ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน และเชื้อโรคที่ติดมาจากน้ำเสีย น้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือใช้เพื่อการเกษตรและการพักผ่อนหย่อนใจอื่นๆ การบำบัดสารก่อมลพิษจากน้ำเสียโดยใช้ไบโอฟิล์มบนตัวกรองมีการแสดงแผนภาพดังรูปที่ 2.5



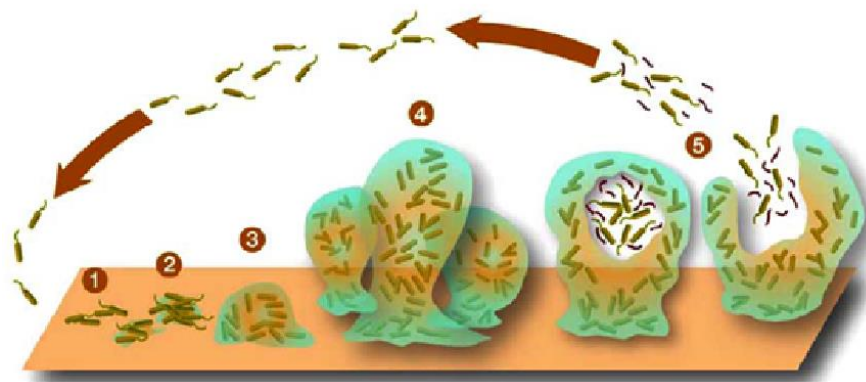
รูปที่ 2.5 การบำบัดสารก่อมลพิษจากน้ำเสียด้วยไบโอฟิล์มบนตัวกลาง

ที่มา : Sehar และ Naz (2016)

การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบไบโอฟิล์มมีข้อดีหลายอย่างรวมถึงความต้องการพื้นที่น้อย ระยะเวลาที่เก็บที่ลดลง มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม จุลินทรีย์อยู่ในระบบได้นานขึ้นส่งผลให้การผลิตตะกอนลดลง

2.5.1 กลไกการเกิดไบโอฟิล์ม

ในน้ำเสียจะมีเซลล์แบคทีเรียปะปนเข้ามาพร้อมกับกระแส น้ำ เนื่องจากแบคทีเรียมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลล์แบคทีเรียกับพื้นผิววัสดุทำให้สามารถเกาะติดบนผิวตัวกลางและเจริญเติบโตต่อไป มีการเพิ่มจำนวนและมีการพัฒนาเป็นชั้นฟิล์มบางๆ จนแพร่กระจายบริเวณกว้างขึ้น นอกจากนี้เซลล์มีการยึดติดกันด้วยสาร EPS (Extracellular polymeric substances) ซึ่งแบคทีเรียจะขับออกมานอกเซลล์ มีลักษณะเป็นเมือกเชื่อมระหว่างเซลล์ด้วยกันเองและเซลล์กับบริเวณผิววัสดุเมื่อเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ รูปร่างของชั้นไบโอฟิล์มจะแตกต่างกันตามปัจจัยต่างๆ และบางส่วนสามารถหลุดออกได้ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดไบโอฟิล์ม

ที่มา : (www.gestaltreality.com/2013/09/16/how-to-eliminate-candida-biofilms/)

2.5.2 การเกาะติดและการหลุดของไบโอฟิล์ม

ไบโอฟิล์มมีความชอบวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน การเกาะของจุลินทรีย์เกิดขึ้นจากการที่จุลินทรีย์สร้างเส้นใยขนาดเล็กกรอบตัว และเส้นใยของตัวจุลินทรีย์เองจะไปจับกับเส้นใยของเซลล์อื่น ทำให้จุลินทรีย์สามารถเกาะติดกันเป็นฟิล์มหนานบนตัวกลาง และเป็นที่เก็บสารที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงและสามารถละลายได้ในน้ำได้ก่อนแบคทีเรียจะดูดซึมเข้าสู่ผนังเซลล์

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดติดของเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิววัสดุขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมี และกายภาพของพื้นผิว เช่น ความหยาบผิวและความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว เป็นต้น ถ้าวัสดุมีพื้นผิวหยาบสูงจะส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียสามารถยึดเกาะได้ดีกว่าพื้นผิวที่มีความหยาบน้อย เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวสามารถลดแรงเฉือนของของไหลได้และมีพื้นที่ในการยึดเกาะมาก ทำให้เซลล์แบคทีเรียหลุดออกจากพื้นผิวได้ยากและมีโอกาสเจริญเติบโตต่อไป

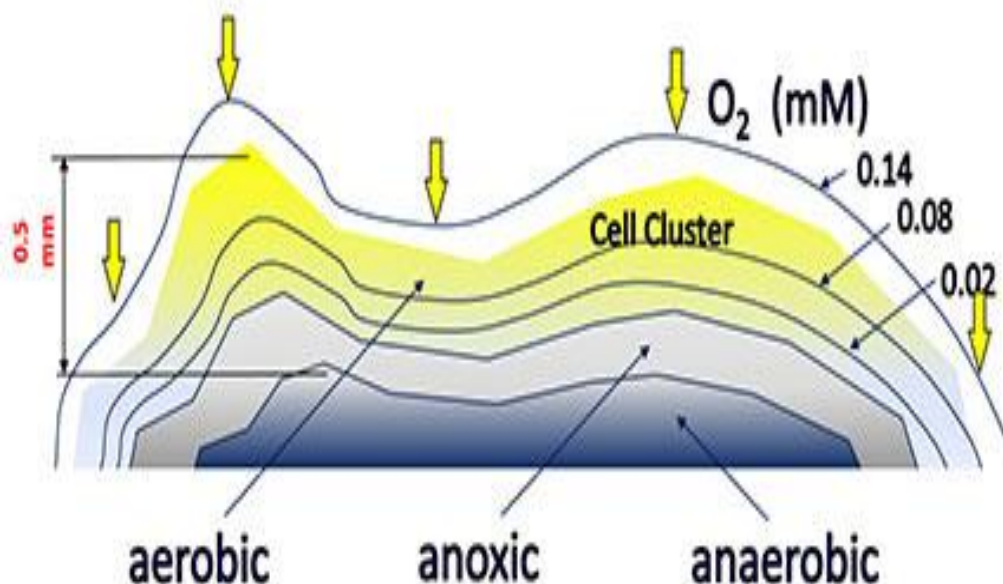
สภาวะไฮโดรไดนามิกจะส่งผลต่อการหลุดของไบโอฟิล์ม เกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอย่าง เช่นความเร็วของน้ำจะมีแรงเฉือนส่งผลให้ไบโอฟิล์มหลุดออก เมื่อชั้นไบโอฟิล์มมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดสภาพการขาดแคลนสารอาหารและปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำไม่เพียงพอ ส่งผลให้ไบโอฟิล์มที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านในเกิดสภาพการขาดอาหารและอากาศ ทำให้แบคทีเรียหลุดออกไปในที่ใหม่ที่มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตเป็นวงจรการเกิดไบโอฟิล์ม

2.5.3 กระบวนการบำบัดสารอินทรีย์

กระบวนการบำบัดสารอินทรีย์จะเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสารและปฏิกิริยาชีวเคมี มีขั้นตอนดังนี้

1. สารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำจะถ่ายเทจากชั้นของเหลวไปบริเวณระหว่างชั้นของเหลวกับไบโอฟิล์ม
2. จากนั้นสารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำจะถ่ายเทไปสู่ชั้นไบโอฟิล์ม
3. จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำ
4. จุลินทรีย์จะผลิตคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและจะถูกถ่ายเทจากชั้นไบโอฟิล์มออกไปสู่ชั้นของเหลว

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกควบคุมโดยออกซิเจนและสารอินทรีย์จากสถานะของไบโอฟิล์ม ซึ่งไบโอฟิล์มชั้นนอกจะได้รับออกซิเจนและสารอาหารที่เพียงพอทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณนี้เป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตทำหน้าที่ในการย่อยสลาย ส่วนชั้นด้านในของไบโอฟิล์ม จะเป็นส่วนที่ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ จึงทำให้บริเวณด้านในไบโอฟิล์มมีสภาวะไร้ออกซิเจน ดังนั้นจุลินทรีย์ที่จะพบในบริเวณข้างในจะเป็นจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต แสดงดังรูปที่ 2.7

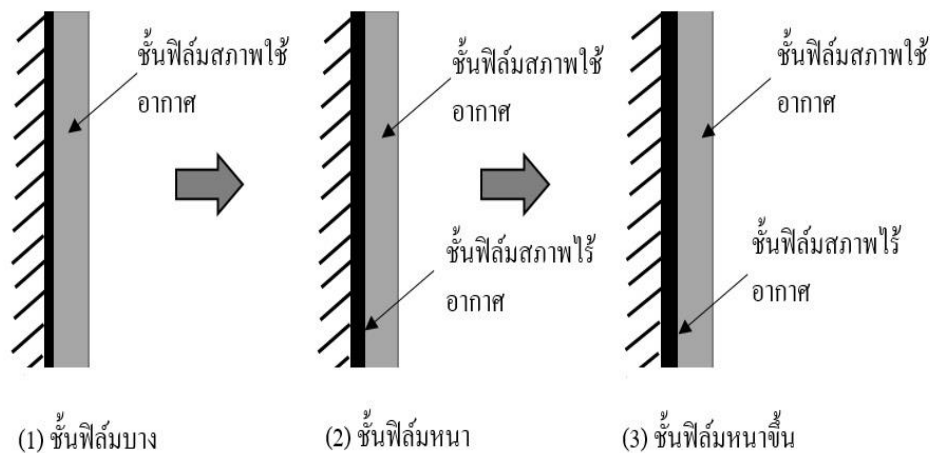


รูปที่ 2.7 ลักษณะชั้นไบโอฟิล์ม

ที่มา : (<http://www.ecologixsystems.com/system-mbbr.php>)

ปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดของชั้นฟิล์มใช้อากาศและสารอินทรีย์ การเพิ่มขึ้นของชั้นฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.8 น้ำเสียเป็นปัจจัยจำกัดชั้นฟิล์มไร้อากาศเนื่องจากออกซิเจนจะเข้าชั้นฟิล์มที่ลึกขึ้นได้ยากขึ้นเรื่อยๆเมื่อมีปริมาณความหนาของไบโอฟิล์มที่มากขึ้น จนเกิดสภาวะขาดอากาศและเมื่อลึกเข้าไปจะเกิดสภาพไร้อากาศในที่สุด เช่นเดียวกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถซึมเข้าถึงชั้นฟิล์มไร้อากาศได้ การเกาะติดตัวกลางของไบโอฟิล์มจะใช้ปัจจัยทางกายภาพเคมี 2 อย่างคือ

1. แรงไฟฟ้าสถิต เป็นประจุไฟฟ้าที่เกิดจากเอ็นไซม์ต่างๆของจุลินทรีย์ โดยมีพีเอชของสารละลายมาเกี่ยวข้อง เกิดเป็นแรงดูดติดผิวของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบกับประจุบวกของผิวตัวกลาง
2. แรงไม่ชอบน้ำ เป็นการดูดซับของจุลินทรีย์บนผิวโดยที่ผิวของตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำสามารถดูดซับจุลินทรีย์ไฮโดรโฟบิกได้



รูปที่ 2.8 การเพิ่มชั้นฟิล์ม
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.4 วิธีการวิเคราะห์ไบโอฟิล์มแบบดั้งเดิม

1. การตรวจวัดน้ำหนักไบโอฟิล์ม (น้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง)

น้ำหนักไบโอฟิล์มสามารถหาได้ในแง่ของน้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล น้ำหนักเปียกของไบโอฟิล์มวัดได้หลังจากล้างด้วยน้ำกลั่นแล้ว อย่างไรก็ตาม น้ำหนักแห้งของไบโอฟิล์มจะถูกประมาณโดยปล่อยให้แห้งภายใต้สภาวะปลอดเชื้อในชั้นอากาศในทางกลับกันตัวกลางตัวกลางแบบธรรมชาติ เช่น หิน กรวด ครอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ โดยน้ำหนักของกับไบโอฟิล์มคำนวณจากความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของตัวกลางกับไบโอฟิล์มและของตัวกลางที่ปราศจากกับไบโอฟิล์ม

2. การตรวจวัดความหนาแน่นของฟิล์มไบโอฟิล์ม OPTICAL DENSITY (OD)

วัดไบโอฟิล์มด้วยวิธี OD ไบโอฟิล์มจะหลุดออกตัวกลางในน้ำเกลือร้อยละ 0.9 ด้วยการสั่นคลื่นเสียง (sonication) เป็นเวลา 15 นาที การดูดกลืนแสงของสารละลายไบโอฟิล์มจะถูกวัดที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (OD550) (Sehar และ Naz (2016))

2.6 อนุภาคเหล็กนาโน

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีของอนุภาคหรือสิ่งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ในช่วง 1-100 นาโนเมตรโดยประมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อมีขนาดที่เล็กมากจะทำให้พื้นที่ผิวของสิ่งนั้นมีเพิ่มขึ้นและสามารถแทรกซึมไปในพื้นผิวได้ดี คุณสมบัติพิเศษของสารในระดับนาโนอาจแตกต่างกันไปได้ตามชนิดของสารนั้นๆ เช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนจะสามารถย่อยสลายสารเคมีในคราบสกปรกได้ภายใต้แสงอาทิตย์ ทำให้มีการผลิตสารเคลือบผิวแล้วทำความสะอาดตัวเองได้ เช่นสีที่ทาแล้วสะอาดอยู่เสมอ เป็นต้น โดยสารในขนาดนาโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. นาโนแมททีเรียลในธรรมชาติ ในธรรมชาติมีสารหลายชนิดที่มีคุณสมบัติตรงตามนิยาม เช่น ดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตร และเอนไซม์เอทีพีซินเทส (ATP synthase) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ และฮีโมโกลบินในเซลล์เม็ดเลือดแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.5 นาโนเมตร เป็นต้น
2. นาโนแมททีเรียลสังเคราะห์ เช่น อนุภาคเหล็กนาโน (Iron nanoparticles) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอนุภาคนาโนทองคำ (Gold nanoparticles) เป็นต้น

โลหะเหล็กนาโน คือเหล็กที่มีขนาดนาโน (nano zero-valence iron หรือ NZVI) เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยารีดิวซ์อนุมูลเหล็กให้เป็นอนุภาคของเหล็ก โดยใช้สารช่วยเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะเป็นก้อนใหญ่มาก มีสมบัติในการทำปฏิกิริยารีดิวซ์สารอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดมลภาวะ ให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงหรือไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แม้ว่าจะมีการใช้งานเพิ่มขึ้นในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา แต่การศึกษาพบว่า NZVI อาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งในทางบวกและทางลบ (Lee และคณะ, 2008; Li และคณะ, 2010; Xiu และคณะ, 2010a, 2010b) NZVI มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น

NZVI ยับยั้งการสังเคราะห์แสงของไซยาโนแบคทีเรียเนื่องจากการเคลือบเหล็ก และเหล็ก (III) ไฮดรอกไซด์ บนเซลล์อย่างรวดเร็ว (Marsalek และคณะ, 2012)

Yang Guo และ Hu (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนต่อกิจกรรมการสร้างมีเทนและการพลวัตของประชากรในการสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยใช้ NZVI ขนาดเฉลี่ย 55 ± 11 นาโนเมตร พบว่ามีฤทธิ์ในการยับยั้งการเกิดมีเทนเนื่องจากจะไปทำลายเซลล์ ซึ่งเกิดจากการผลิตและการสะสมของไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วจากการละลายของ NZVI ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ที่ความเข้มข้น 1 mM ขึ้นไป NZVI จะลดการผลิตก๊าซมีเทนลงกว่า 20% ที่ความเข้มข้น 30 mM, NZVI นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญใน ซีโอดีละลายได้ (ข้อบ่งชี้ของการทำลายเซลล์) และกรดไขมันระเหยมีการสะสมของไฮโดรเจนส่งผลให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลง 69%

Mohanraj และคณะ (2014) ได้ศึกษาผลของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์สังเคราะห์ต่อการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ *E. cloacae* พบว่าการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 423 ± 16 และ 497 ± 25 มิลลิลิตรจากกลูโคสและซูโครสที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ 125 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และการผลิตไฮโดรเจนลดลงเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 125 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากกลูโคสและน้ำตาลซูโครส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Han และคณะ, 2011 ที่พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากกลูโคสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเข้มข้นประมาณ 0-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของฮีมาไทต์ตั้งแต่ 400 ถึง 1600 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์จาก 25 เป็น 125 มิลลิกรัมต่อลิตรระยะเวลาช่วง lag phase จะลดลงจาก 7.65 เป็น 7.2 ชั่วโมง ซึ่งมีระยะเวลาที่สั้นลงกว่าการทดลองควบคุม (7.8 ชั่วโมง) และถ้าเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์จาก 150 เป็น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วง lag phase จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก 8.1 เป็น 11.6 ชั่วโมง ในขณะที่ระยะ lag phase ในระบบซูโครสลดลงจาก 10.0 เป็น 9.26 ชั่วโมงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีระยะ lag phase ที่นานขึ้นเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโนที่มีออกไซด์ของเหล็กออกมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์จะส่งผลต่อจุลินทรีย์โดยทำให้ช่วง lag phase มีการเปลี่ยนแปลงสั้นลงเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์จนมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่งที่จุลินทรีย์สามารถรับได้และจากนั้นช่วง lag phase นานขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์สูงเกิน

2.7 การประเมินค้ำค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินความค้ำค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ ใช้หลักวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost Benefit Analysis) เป็นการพิจารณาว่าผลประโยชน์ของโครงการมากกว่าหรือน้อยกว่าต้นทุนของโครงการ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาตัดสินใจว่าโครงการมีความค้ำค่าในการลงทุนหรือไม่ เพื่อช่วยในการตัดสินใจใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งใช้การประเมินต้นทุน (Cost) ทั้งต้นทุนทางตรง และต้นทุนทางอ้อม และประเมินผลประโยชน์ (Benefit) ทั้งทางตรงและผลประโยชน์ทางอ้อม (สุพร ตีวงาม, 2558)

การประเมินต้นทุนของระบบบำบัดน้ำเสียทั้งทางต้นและทางอ้อม คำนึงถึงต้นทุนในการวางแผนการออกแบบ และประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย ที่นำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหาร ซึ่งการประเมินต้นทุน (cost estimation) ประกอบไปด้วย ต้นทุนคงที่ในการบำบัดน้ำเสีย (fix cost) (เช่น ค่าก่อสร้าง ค่าพลังงานในการเติมอากาศ ค่าปั๊มมอเตอร์ ระบบท่อลม รวมถึง อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณภาพน้ำ) รวมถึง ต้นทุนการดำเนินการในระบบบำบัดน้ำเสีย (operational cost) (เช่น ค่าซ่อมแซมอุปกรณ์การบำบัด ค่าไฟฟ้า) (เสาวลักษณ์ รุ่งตะวันเรืองศรี, 2006) ในส่วนการประเมินผลประโยชน์นั้น คำนึงถึงประโยชน์จากการลดขนาดของระบบ รวมถึงการจัดการตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาการประเมินความค้ำค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

งานวิจัย	สรุป	ผู้เขียน
Cost estimation and economical evaluation of three configurations of activated sludge process for a wastewater treatment plant (WWTP) using simulation	<ul style="list-style-type: none"> - เปรียบเทียบการประเมินความค้ำค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างระบบ CAS EAAS และ SBR - พิจารณาจากค่าก่อสร้าง การเดินระบบ การดูแลระบบ วัสดุ และพลังงาน - ค่าก่อสร้าง พบว่า ระบบ CAS < EAAS < SBR - การเดินระบบ พบว่า ระบบ EAAS < CAS < SBR - การดูแลรักษา พบว่า ระบบ CAS < EAAS < SBR - วัสดุ พบว่า ระบบ CAS < EAAS < SBR 	Shahryar Jafarinejad (2016)

งานวิจัย	สรุป	ผู้เขียน
	<p>- พลังงาน พบว่า ระบบ CAS < SBR < EAAS</p> <p>- ระบบ CAS มีประสิทธิภาพเกี่ยวกับความคุ้มค่าในการเดินระบบมากที่สุด</p> <p>* conventional activated sludge (CAS), extended aeration activated sludge (EAAS) และ sequencing batch reactor (SBR)</p>	
<p>Cost analysis of trickling-filtration and activated-sludge plants for the treatment of municipal wastewater</p>	<p>- เปรียบเทียบการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างระบบ TF CMAS และ ODAS</p> <p>- พิจารณาจากค่าก่อสร้าง ค่าสารเคมี วัสดุ และพลังงาน</p> <p>- ค่าก่อสร้าง พบว่า ระบบ TF < ODAS < CMAS</p> <p>- ค่าวัสดุ สารเคมี และพลังงาน พบว่า ระบบ TF < ODAS < CMAS</p> <p>* trickling filtration (TF), complete-mix activated sludge (CMAS) และ oxidation ditch activated sludge (ODAS)</p>	<p>Zahid (2007)</p>

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดแบบตัวกลางเคลื่อนที่

Aygun Nas และ Berkday (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบบำบัด น้ำเสีย MBBR ปริมาตร 1 ลิตร และอัตราการอินทรีย์ 6-96 กรัมซีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน โดยใช้ตัวกลาง Kaldnes K1 มีความถ่วงจำเพาะ 0.96 และพื้นที่ผิว 500 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยอัตราการบรรจุร้อยละ 50 ค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลายอยู่ในช่วง 0.3-3.0 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ พบว่าในระยะเวลาเริ่มต้นเดินระบบจุลินทรีย์ใช้เวลา 4 สัปดาห์ ในการเกาะติดบนตัวกลาง และประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลงเมื่ออัตราการอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นจาก 6, 12, 24, 48 และ 96 กรัมซีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 95.1, 94.9, 89.3, 68.7 และ 45.2 ตามลำดับ

Chu และ Wang (2011) เปรียบเทียบตัวกลาง 2 ชนิด คือ โพลียูรีเทนโฟม (PU) และ โพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ในระบบบำบัดน้ำเสีย MBBR ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น C/N ต่ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัด TOC และแอมโมเนียในถังที่บรรจุ PU สูงถึงร้อยละ 90 และ 65 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 72 และ 56 ตามลำดับ ดังนั้นระบบ MBBR ที่บรรจุด้วย PU มีประสิทธิภาพดีในการบำบัด TOC และแอมโมเนียเนื่องจากจุลินทรีย์จำนวนมากเข้าไปอยู่ในรูของ PU ระบบที่บรรจุ PCL มีความสามารถที่ดีในแง่ของการบำบัด TN แต่จำเป็นต้องมีการพัฒนาตัวกลางให้มีความพรุนสูงเพื่อเพิ่มจุลินทรีย์ในการเกาะติดมากขึ้น

Feng และคณะ (2012) ศึกษาผลของอัตราการบรรจุตัวกลางโพลียูรีเทนโฟมทรงสี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ต่อการเกิดประชากรจุลินทรีย์และการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน โดยมีอัตราการบรรจุตัวกลางอยู่ที่ร้อยละ 20 , 30 และ 40 พบว่าเมื่อบรรจุตัวกลางโพลียูรีเทนโฟมร้อยละ 20 อัตราการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 ในระหว่าง 50 วันของการเดินระบบช่วงแรก และจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 95.2 เมื่อมีระยะเวลาในการบำบัดที่นานขึ้น ส่วนอัตราการบรรจุตัวกลางร้อยละ 30 หลังจากเดินระบบ 20 วันความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงเหลือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อมีระยะเวลาในการกักเก็บ 5 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นลดลงเหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สุดท้ายเมื่อบรรจุตัวกลางร้อยละ 40 ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนหลังจากเดินระบบ 20 วัน ความเข้มข้นลดลงเหลือ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการบรรจุตัวกลางที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นและพบว่าในทุกระบบจะพบแบคทีเรียกลุ่ม Proteobacteria, Bacteroidetes และ Verrucomicrobia เป็นส่วน

ใหญ่ แบบคทีเรียที่มีความโดดเด่นใน ammonia oxidizing bacteria (AOB) และ Nitrite oxidizing bacteria (NOB) พบเป็นชนิด *Nitrosomonas* และ *Nitrospira* ตามลำดับ

Gu และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ MBBR ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารต่ออัตราการบรรจุตัวกลาง ด้วยการเดินระบบเป็นเวลา 20 ชั่วโมงในถังปฏิกรณ์ขนาด 8 ลิตร ตัวกลางที่ใช้เป็นตัวกลางชนิดโพลีเอธิลีน มีอัตราการบรรจุตัวกลางร้อยละ 20 , 30 , 40, 50 และ 60 เมื่อเดินระบบในช่วงแรกพบว่าอัตราการบำบัดมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 และผลของอัตราการบรรจุตัวกลางจะไม่มีนัยสำคัญถ้าความเข้มข้นของซีโอดีที่เข้าระบบ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีสูงขึ้นถึง 2020 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอัตราการบรรจุตัวกลางที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 50 อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Shock load) การบรรจุตัวกลางที่ร้อยละ 50 ระบบจะสามารถปรับตัวได้รวดเร็วเพียง 6 วันสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้เท่าเดิม ซึ่งจะต่างกับอัตราการบรรจุตัวกลางที่ร้อยละ 30 ต้องใช้เวลานาน 11 วันในการปรับตัวกลับเข้าสู่ภาวะเดิมได้ ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 79 ภายในระยะเวลาในการบำบัด 48 ชั่วโมง และประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกักเก็บลดลงเหลือ 20 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 89

Barwal และ Chaudhary (2015) ศึกษาอัตราการบรรจุตัวกลางต่อการใช้ออกซิเจน โดยการเดินระบบในถังปริมาตร 20 ลิตร ใช้พลาสติกพอลิโพลีเอธิลีนเป็นตัวกลางในการเกาะติดของจุลินทรีย์ด้วยอัตราการบรรจุที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 0 , 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 60 และ 70 เดินระบบเป็นเวลา 15 วัน พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราการบรรจุตัวกลางส่งผลให้อัตราการใช้ออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นจากการที่จุลินทรีย์เจริญเติบโต และพบว่าการบรรจุตัวกลาง 40% เป็นปริมาณที่มีอัตราการใช้ออกซิเจนมากที่สุด 1.65 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตรต่อชั่วโมง จึงมีโอกาที่จุลินทรีย์แขวนลอยจะมาเกาะผิวของตัวกลางสูงขึ้น

Bassin และคณะ (2016) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ MBBR ในการบำบัดซีโอดีและไนโตรเจนต่ออัตราการอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ Kaldnes K1 และ Mutag Biochip เป็นตัวกลางในการเกาะติดของจุลินทรีย์ โดยบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 1 ลิตรเดินระบบต่อเนื่อง 700 วัน พบว่าการเพิ่มภาระอินทรีย์ให้สูงขึ้น ทำให้ไบโอฟิล์มมีชั้นหนามากขึ้นและจะส่งผลให้อัตราการหลุดเพิ่มออกมาแขวนลอยในระบบบำบัดทำให้ระบบมีการทำงานแบบไฮบริด อีกทั้งมีการพบจุลินทรีย์จำพวกที่ไม่ใช้อากาศในระบบบำบัด ซึ่งเกิดจากการสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้รับออกซิเจนและสารอาหารอย่างเพียงพอในบริเวณที่ถูกสะสมอยู่ภายใน ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเมื่อเพิ่มเพิ่มอัตราการอินทรีย์สูงถึง 3.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สูงกว่าร้อยละ 95 และการบำบัด

ไนโตรเจนรวมมีค่าสูงถึงร้อยละ 86 และ 73 ใน MBBR1 และ MBBR2 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระบบ MBBR1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงเป็นผลมาจากวัสดุตัวกลาง Kaldnes K1 มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอกยาวทำให้ไบโอฟิล์มเข้าไปสะสมอยู่ในช่องว่าง ทำให้เกิดจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศมากกว่า Mutag Biochip จึงมีการบำบัดไนโตรเจนได้สูงกว่าเมื่อมีอัตราการอินทรีย์เข้าระบบที่สูง

Zhang และคณะ (2016) ศึกษาผลของอัตราการบรรจุตัวกลางต่อประสิทธิภาพของระบบ MBBR โดยใช้ฟองน้ำโพลียูรีเทน (PU) ขนาด 15x15x15 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตัวกลาง ในระบบขนาด 12 ลิตร ด้วยอัตราการบรรจุร้อยละ 10 , 20 , และ 30 เริ่มต้นเดินระบบด้วยการเติมตะกอนจุลินทรีย์ 2.8 กรัมต่อลิตร ใช้เวลา 15 วันในการปรับสภาพตัวกลางเข้ากับน้ำเสีย ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 24 ชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศ 0.009 ลูกบาศก์ต่อชั่วโมง ค่าออกซิเจนละลายอยู่ในช่วง 5-6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า อัตราการบรรจุตัวกลางมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อการบำบัด TOC และ NH_4^+-N ได้แก่อ้อยละ 93 และ 95 ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพในการบำบัด TN และ SND พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวกลางจะทำประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นได้แก่ ที่ร้อยละ 10 , 20, และ 30 การบำบัด TN อยู่ที่ร้อยละ 77.2 , 85.5 และ 86.7 ตามลำดับ และ SND อยู่ที่ร้อยละ 85.5 , 91.3 , และ 93.3 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการบรรจุที่ร้อยละ 20 มีความสามารถในการบำบัด TOC, NH_4^+ , TN และ SND ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

Safwat (2018) ศึกษาความเป็นไปได้ของกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมรรถภาพระบบ MBBR ในการบำบัดน้ำเสียขนาด 3 ลิตร เปรียบเทียบ 2 ระบบ คือระบบที่เติมตะกอนจุลินทรีย์จากระบบเลี้ยงตะกอนเร่งอย่างเดี่ยว (MBBR-AS) เทียบกับระบบที่เติมตะกอนจุลินทรีย์จากระบบเลี้ยงตะกอนเร่งร่วมกับกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (MBBR-EM) โดยควบคุมทั้ง 2 ระบบให้มีปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากับ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบ 4 สัปดาห์เพื่อให้แน่ใจว่ามีไบโอฟิล์มเจริญบนผิวตัวกลาง พบว่าการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในระบบไม่มีความสำคัญเท่ากับไบโอฟิล์มที่เกาะบนตัวกลาง หลังจากเดินระบบพบว่าระบบ MBBR-AS มีความหนาของชั้นไบโอฟิล์มที่มากกว่าระบบ MBBR-EM และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบ MBBR-AS ดีกว่า MBBR-EM ที่ร้อยละ 76.1 และ 67.79 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดระบบ MBBR-EM มีความสามารถที่ดีกว่าระบบ MBBR-AS ผลของการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์อย่างกะทันหัน ระบบ MBBR-AS ใช้เวลา 2 ชั่วโมงในการปรับสภาพให้น้ำทิ้งมีค่าคงที่ อยู่ที่ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งระบบ MBBR-EM ใช้เวลา 5 ชั่วโมงในการปรับสภาพให้น้ำทิ้งมีค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ที่ 52 มิลลิกรัมต่อลิตร

Salama และคณะ (2016) ศึกษาการเจริญของไบโอฟิล์มบนตัวกลางชนิดต่างๆในระบบบำบัดน้ำเสียโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสังเคราะห์ ด้วยวัสดุตัวกลาง 6 ชนิด ได้แก่ pozzolan, polyvinyl chloride¹ (PVC1), polyvinyl chloride² (PVC2), foam, polyethylene terephthalate (PET) และ polystyrene (PS) โดยการนำตัวกลางเพาะเลี้ยงในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีไอที 624 มิลลิกรัมต่อลิตร และ KNO_3 0.26 กรัม และทำการสกัดสาร ESP ออกจากตัวกลางโดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยน้ำเย็น (Sutherland และ Wilkinson, 1971; Jia และคณะ, 1991) ปริมาณโปรตีนของ EPS (EPSP) วัดโดยใช้วิธี Lowry และคณะ (1951) และปริมาณคาร์โบไฮเดรต (EPSC) โดยวิธี phenol / sulfuric-acid สุ่มตัวอย่าง ADR1 และ ADR2 จากระบบตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ลำดับยีน 16S rRNA sequence analysis พบว่า ADR1 เป็นแบคทีเรียแกรมบวก มีความคล้ายคลึงกันร้อยละ 99 กับ *Bacillus cereus* และ ADR2 คล้ายคลึงกันร้อยละ 99 กับ *Bacillus tequilensis* ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอที ในถังปฏิกรณ์ที่มี PVC1 (89.93%) สูงกว่าในถังที่มี PVC2 (78.82%) และประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรต PVC1 ร้อยละ 78.75 สูงสุดใน 42 วัน ในทางกลับกันถังที่บรรจุ PVC2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 66.81 ซึ่ง PVC1 และ PVC2 เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างกับไบโอฟิล์มและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

Deng และคณะ (2016) ประเมินความประสิทธิผลของการดัดแปลงตัวกลางพลาสติกด้วยฟองน้ำในระบบไฮบริดระหว่าง MBBR (S-MBBR) และ MBBR-MBR โดยศึกษาจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 5 : 1 มีถังปฏิกรณ์มีปริมาตรการทำงาน 12 ลิตร และบรรจุตัวกลางร้อยละ 20 พบว่า S-MBBR-MBR และ MBBR-MBR มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอทีร้อยละ 98.27 ± 0.94 และ 94.56 ± 1.06 ดังนั้นเมื่อระบบมีการทำงานแบบไฮบริดจะทำให้มีประสิทธิภาพที่สูง วัสดุฟองน้ำดัดแปลงไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสารอาหารโดยรวมแล้วยังสามารถช่วยยืดระยะเวลาในการเดินระบบของระบบไฮบริด MBBR-MBR เนื่องจากมีการลดการอุดตัน ดังนั้น S-MBBR-MBR จึงเป็นความหวังในการแก้ปัญหาเพื่อปรับปรุงการบำบัดด้วยระบบ MBBR-MBR

2.8.2 การศึกษาชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

Calderón และคณะ (2012) ศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรีย โดยอาศัยเทคนิค PCR-TGGE ด้วยระบบ MBBR ปริมาตร 3 ลิตร ระยะเวลาในการกักเก็บ 5 , 10 และ 15 ชั่วโมง ตามลำดับทดสอบวัสดุตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ Aqwise ABC5, K1 และ BIOCONS ที่อัตราส่วนการบรรจุร้อยละ 50, 35 และ 20 วิเคราะห์โครงสร้างของไบโอฟิล์มด้วย LEO 1430-VP SEM พบว่าเมื่อมีการบรรจุตัวกลางร้อยละ 50 การเจริญของไบโอฟิล์มและการเกาะติดพื้นผิวตัวกลางดีที่สุด และข้อมูลจาก

TGGE fingerprinting ทุกลำดับของยีน 16S-rRNA พบความชุกของเชื้อ Proteobacteria ในทุกชั้น ตอน ซึ่ง TGGE มีความสัมพันธ์กับ Betaproteobacteria (43%) Firmicutes (34%) Alphaproteobacteria (14%) สรุปได้ว่า Proteobacteria มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของแบคทีเรีย และ Betaproteobacteria เป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบวิเคราะห์ส่วนใหญ่

Abzazou และคณะ (2016) ศึกษาลักษณะของเซลล์ทั้งหมดและเซลล์เดียวที่ทำให้เกิดไนติไฟอิงแบคทีเรียโดยใช้ DAPI staining และเทคนิค FISH จากการทดสอบน้ำเสียอุตสาหกรรมระยะเวลาพักเก็บน้ำ 42 ± 21 ชั่วโมง ความเข้มข้นของแอมโมเนียมเฉลี่ย 676 ± 194 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ตัวกลาง โพลีเอทิลีน K1 และ AnoxKaldnes ระบบทำงานที่อุณหภูมิ 31 ± 1.5 องศาเซลเซียส หาปริมาณของเซลล์แบคทีเรียโดยรวมวิเคราะห์ตามโปรโตคอล DAPI staining และ FISH reaction ใช้ DNA probe 3 ตัว คือ Nso-190 probe Nspa-662 probe และ Nit-3 probe วิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ fluorescence พบว่า จากการตรวจติดตามเป็นเวลา 479 วัน ระบบ MBBR สามารถบำบัดน้ำเสียแอมโมเนียมได้อย่างสมบูรณ์ กระบวนการส่วนใหญ่เกิดในช่วง HRT 40 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียมพบค่า $N-NH_4^+$ มีความหลากหลายตลอดการทดลองโดยมีค่าน้อยสุดในวันแรกของการเดินระบบ 195 มิลลิกรัมต่อลิตร และซึ่งจะพบค่าแอมโมเนียมสูงในระหว่างวันที่ 255-323 ค่ามากที่สุด เท่ากับ 1110 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 282 ส่วนในวันที่ 100 เริ่มพบว่าเซลล์โพรคาริโอตในไบโอฟิล์มและในของเหลวเกิดความอุดมสมบูรณ์ ไบโอฟิล์มที่เกิดบนตัวกลางมีค่าอยู่ในช่วง $9.52 \times 10^8 - 3.80 \times 10^{12}$ cell/ml เฉลี่ยเท่ากับ 6.72×10^{10} cell/ml ในขณะที่ในของเหลวมีค่าอยู่ในช่วง $4.01 \times 10^7 - 2.29 \times 10^{11}$ cell/ml เฉลี่ยเท่ากับ 7.42×10^8 cell/ml ammonia oxidizing bacteria (AOB) แบคทีเรียที่พบชัดเจนมากที่สุดคือ Beta-proteobacteriar พบตลอดการทดลอง และ Nitrite oxidizing bacteria (NOB) พบ Nitrospira และ Nitrobacter

2.8.3 การศึกษาอนุภาคเหล็กต่อการเจริญของจุลินทรีย์

Han และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนของแร่เฮมาไทต์ พบว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนของแร่เฮมาไทต์ความเข้มข้นตั้งแต่ 25-1600 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ระยะ lag phase ลดสั้นลงจาก 36.6 ชั่วโมง เหลือเพียง 24.4 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติมอนุภาคเฮมาไทต์นาโน และเมื่อความเข้มข้นของเหล็กเพิ่มขึ้นจะส่งเสริมให้เกิดการผลิตไฮโดรเจน แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์อีกทั้งทำให้เกิดการผลิตไฮโดรเจนลดลง และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนของแร่เฮมาไทต์จะทำให้จุลินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม

Hayrapetyan และคณะ (2015) พบว่าเมื่อมีการเติมเหล็กลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อจะส่งผลต่อการเกิดไบโอฟิล์มที่เพิ่มสูงขึ้นบนผิวตัวกลางสแตนเลสตีลมากกว่าโพลิสไตรีนซึ่งลักษณะแบคทีเรียที่เกาะบนตัวกลางทั้งสองชนิดนั้นมีโครงสร้างที่เหมือนกัน

Ranmadugala และคณะ (2017) ศึกษาผลของอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของ *Bacillus subtilis* โดยใช้ superparamagnetic iron oxide (naked IONs) และ 3-aminopropyltriethoxy silane coated IONs (IONs@APTES) พบว่า ความหนาแน่นของไบโอฟิล์มจุลชีพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความเข้มข้นของอนุภาค IONs@APTES น้อย เมื่อเทียบกับ naked IONs ซึ่งถ้าความเข้มข้นของเหล็กมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไบโอฟิล์มของจุลชีพเกิดการลดลงที่น้อยขึ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่า IONs@APTES ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่าน การถ่ายโอนมวล และการดูดซึมอาหาร

สรุปการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบความเป็นไปได้ว่าการบำบัดเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงสามารถเกิดขึ้นได้ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่เพียงถังเดียว และระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูง ซึ่งมีวัสดุตัวกลางและปริมาณการบรรจุตัวกลาง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งอันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ เนื่องจากตัวกลางแต่ละชนิดมีผลต่อความชอบของจุลินทรีย์ที่ไม่เหมือนกัน การบำบัดไนโตรเจนจะเกิดขึ้นได้เมื่อจุลินทรีย์ในระบบมีอายุตะกอนที่นาน อีกทั้งการเติมอนุภาคเหล็กอนุภาคนาโนในระบบจะทำให้ระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบเกิดได้เร็วขึ้นและยังสามารถส่งเสริมให้จุลินทรีย์เกิดการผลิตไบโอฟิล์มที่มากขึ้น

บทที่ 3

แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่

3.1.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) ซึ่งดัดแปลงจากสูตรของ สุรชัย ทักษิณวรารจารย์, (2526) โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนและมีแร่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีการควบคุมระดับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-8.5 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อเป็นบัฟเฟอร์ของระบบ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

องค์ประกอบ	หน่วย	ปริมาณองค์ประกอบ			
		500	1,000	2,000	3,000
กลูโคส	มก.	500	1,000	2,000	3,000
ยูเรีย	มก.	75	150	300	450
NaHCO_3	มก.	60	120	240	360
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	มก.	20	40	80	120
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	มก.	5	10	20	30
K_2HPO_4	มก.	10	20	40	60
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	มก.	3	6	12	18

ที่มา : ดัดแปลงจาก (สุรชัย ทักษิณวรารจารย์, 2526)

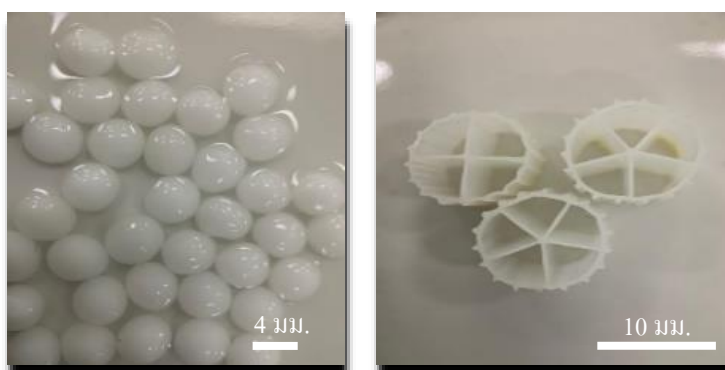
3.1.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ เป็นจุลินทรีย์ที่นำหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์มาจากระบบเติมอากาศของบริษัท รอยัลฟู้ดส์ จำกัด โรงงานผลิตปลากระป๋องสามแม่ครัว นำมาเลี้ยงในสภาวะแบบแบตช์ (Batch) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำตัวกลางมาบ่มจนจุลินทรีย์เกาะที่ตัวกลางบางส่วน จากนั้นนำตัวกลางแยกออกจากถังเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ เลี้ยงในถังเปล่าใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะแบบแบตช์ (Batch) เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นการทำให้จุลินทรีย์และไบโอฟิล์มเกาะเกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนบนพื้นผิวของตัวกลางเพียงอย่างเดียวโดยปราศจากจุลินทรีย์ที่แขวนลอย เมื่อทำการเดินระบบจะนำตัวกลางที่มีไบโอฟิล์มเกาะอยู่บนตัวกลางบรรจุลงในถังปฏิกรณ์และทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องต่อไป

L. Deng และคณะ 2016 ก่อนที่จะเริ่มการทดลองจะทำให้แบคทีเรียปรับสภาพและชินกับสภาพแวดล้อมในระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่เป็นเวลา 15 วันเพื่อให้แน่ใจว่ามีการสร้างไบโอฟิล์มบนพื้นผิวและรูพรุนของตัวกลางพลาสติก

3.1.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้ตัวกลางที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ 2 ชนิด คือตัวกลางพีวีเอเจล polyvinyl alcohol hydrogel (PVA Gel) จาก บริษัท Kuraray (Tokyo, Japan) และตัวกลางพลาสติกพีอี แสดงดังรูปที่ 3.1 และรายละเอียดของตัวกลาง ดังตารางที่ 3.2 ตัวกลางทั้ง 2 เป็นตัวกลางชีวภาพที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยทำการล้างตัวกลางด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ให้สะอาดเป็นจำนวน 3 ครั้งก่อนนำมาใช้งาน



(ก) พีวีเอเจล

(ข) พลาสติกพีอี

รูปที่ 3.1 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวกลาง

สมบัติ	หน่วย	ชนิดของตัวกลาง	
		ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
รูปร่าง	-	ทรงกลม	ทรงกระบอก
ขนาด	มิลลิเมตร	4	10*7
ความหนาแน่น	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	1.025	0.96-0.98
พื้นที่ผิว	ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร	2,500	1,000

ขนาดวัสดุรูปร่างและโครงสร้างของพตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีแตกต่างกัน ตัวกลางพลาสติกพีอี ประกอบด้วยวงแหวนโพลีเอทิลีนทรงกระบอกมีพื้นสั้น ๆ จำนวนมากขึ้นออกไป ด้านนอกรอบตัวกลางและการเชื่อมต่อยื่นออกมาตรงกลางวงแหวน ในตัวกลางพีวีเอเจล เป็นตัวกลางที่มีเม็ดรูทรงกลมขนาด 4 มิลลิเมตร และมีรูพรุนมาก (Kuraray Co. , Tokyo, Japan) โครงสร้างที่มีรูพรุนของตัวกลางพีวีเอเจลทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแบบแอโรบิกและแบบไม่ใช้ออกซิเจน

- ข้อดีของการใช้ตัวกลางพีวีเอเจล

เป็นวัสดุเฉื่อยและไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อย จึงสะดวกต่อการบำรุงรักษา มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ดี มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีได้สูง สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในกระบวนการแบบใช้อากาศและไร้อากาศ

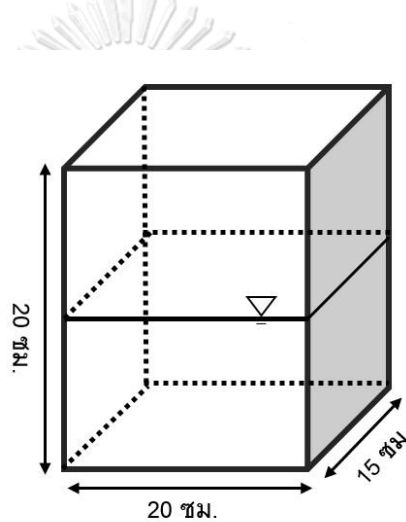
- ข้อดีของการใช้ตัวกลางพลาสติกพีอี

เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการเกาะติดของจุลินทรีย์ สามารถแช่ในน้ำเสียเป็นเวลานานและวัสดุคุณภาพดี ไม่ย่อยสลายและไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความหนาแน่นเบากว่าน้ำ และมีความทนทานต่อสภาพอากาศที่แข็งแกร่งและทนต่อแรงกระแทก โครงร่างถูกออกแบบมาเป็นพิเศษให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีประสิทธิภาพขนาดใหญ่รองรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำนวนมากและมีพื้นที่สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ และแบคทีเรียไนโตรตรต์ แบคทีเรียเส้นใยและแบคทีเรียที่มีประโยชน์อื่น ๆ

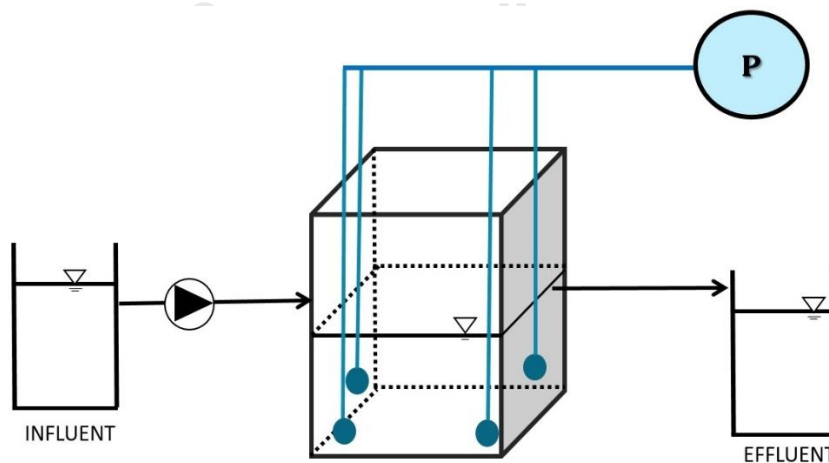
3.1.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง ทำจากอะคริลิกใสหนา 4.76 มิลลิเมตร ขนาด 20x15x20 เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) ปริมาตรการทำงาน 3 ลิตร ดังรูปที่ 3.2 ด้านล่างของถังปฏิกรณ์มีการติดตั้งหัวเติมอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.3

ขั้นตอนการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (continuous flow) เริ่มจากป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ภายในถังปฏิกรณ์ประกอบด้วยหัวเติมอากาศจำนวน 4 ชุดและบรรจุด้วยตัวกลางที่ผ่านการบ่มแล้วเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน โดยมีการติดตั้งวัสดุกันตัวกลางหลุดออกจากระบบบริเวณทางน้ำขาออก



รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่



รูปที่ 3.3 แผนผังการไหลของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่

3.2 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง แผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ โดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟลู เพื่อทำการศึกษาศรรณภาพของระบบในประเด็นต่างๆดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาปริมาณของตัวกลางและชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบดเคลื่อนที่

ในการทดลองทำการทดลองโดยแบ่งเป็น 2 การทดลองย่อย โดยมีรายละเอียดดังนี้

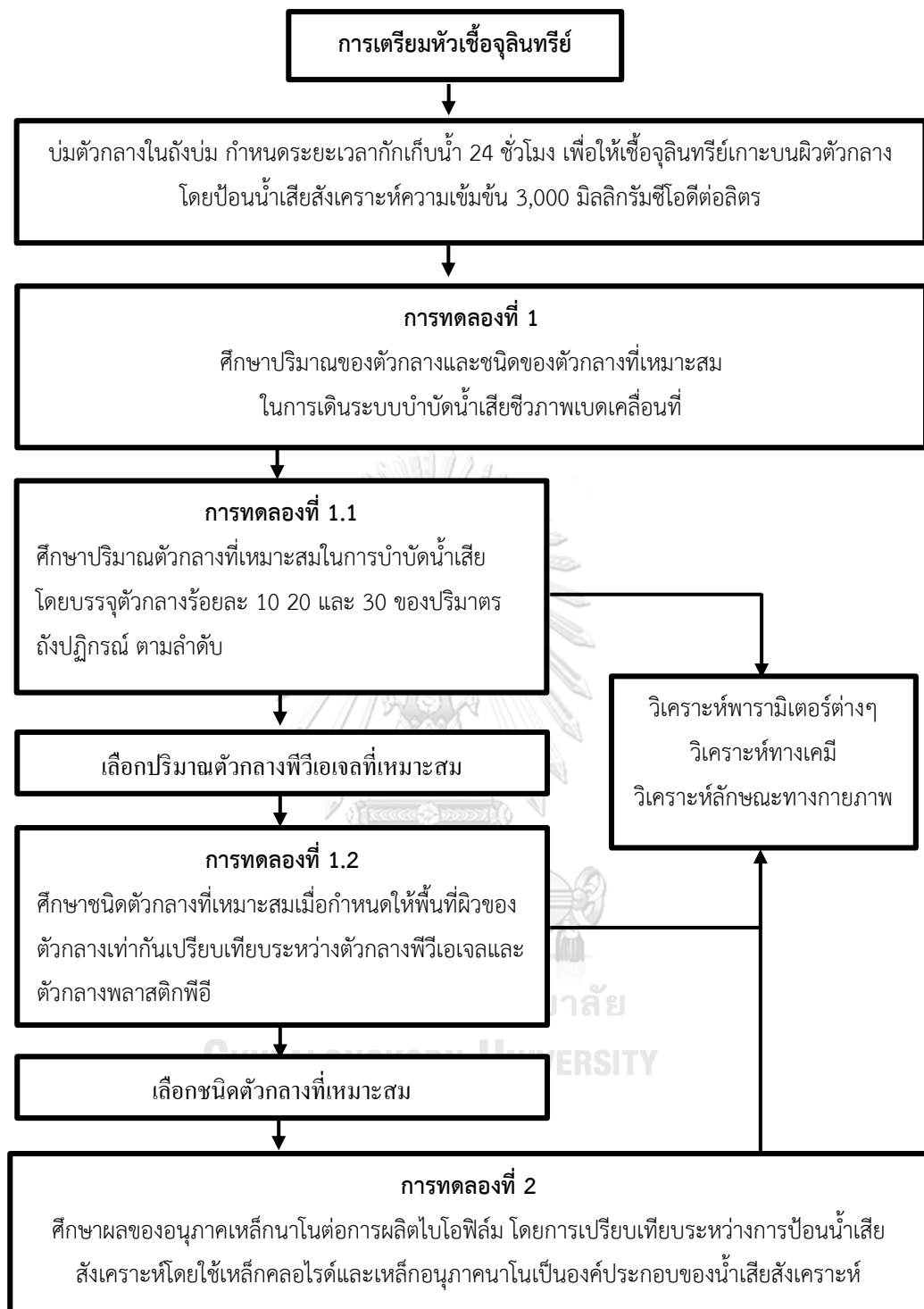
การทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ออกแบบการทดลองประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่จำนวน 3 ถัง โดยเดินระบบแบบต่อเนื่องคู่ขนานพร้อมกัน แบ่งเป็นปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ที่มีการบรรจุปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ ตามลำดับ โดยใช้ตัวกลางพีวีเอเจลที่ผ่านการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์แล้วมาบรรจุและควบคุมให้ทุกถังปฏิกรณ์มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 4 ชั่วโมง สูดน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากกลูโคสที่ความเข้มข้นซีไอดี 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตรเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่อัตราการไหล 18 ลิตรต่อวัน ควบคุมให้ระดับพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ตรวจวัดพารามิเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมเมื่อกำหนดให้พื้นที่ผิวของตัวกลางเท่ากัน ออกแบบการทดลอง ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่จำนวน 2 ถัง โดยเดินระบบแบบต่อเนื่องคู่ขนานพร้อมกัน ถังแรกเป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่มีการบรรจุปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่มีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงสุด (จากการทดลองที่ 1.1) และถังที่ 2 เป็นถังที่บรรจุตัวกลางพลาสติกฟลูซึ่งมีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 4 ชั่วโมง สูดน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากกลูโคสที่ความเข้มข้นซีไอดี 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตรเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่อัตราการไหล 18 ลิตรต่อวัน ควบคุมให้ระดับพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ตรวจวัดพารามิเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่

3.2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อการผลิตไบโอฟิล์ม

ในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดเคลื่อนที่จำนวน 2 ถัง ประกอบด้วย ถังแรกเป็นถังที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเหล็กคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จาก LOBA และถังที่ 2 เป็นถังที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้อนุภาคเหล็กนาโนเป็นองค์ประกอบสำหรับเป็นสารอาหารเพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโต โดยเหล็กอนุภาคนาโนที่ใช้ คือ Iron (III) oxide (Fe_2O_3) จาก Sigma-Aldrich เตินระบบแบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการไหล 9 ลิตรต่อวัน ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย 4 ชั่วโมง โดยตัวกลางที่นำมาใช้คือตัวกลางพลาสติกฟลูอิดจากการทดลองที่ 1.2 บรรจุร้อยละ 50 ทั้งนี้ทำการเดินระบบที่ความเข้มข้นซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมให้ระดับพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ตรวจวัดพารามิเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่





รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินการทดลอง

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 เริ่มต้นเดินระบบ

นำหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบเดิมอากาศ ถึง AS1 ของบริษัท รอยัลฟูดส์ จำกัด เลี้ยงให้ความเข้มข้นของปริมาณมวลตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS) เพิ่มสูงขึ้น ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน เติมน้ำสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากนั้นนำตัวกลางบ่มในถังบ่ม ทำการทดลองแบบทีละเท กำหนดระยะเวลาที่เก็บน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะบนผิวตัวกลาง

3.3.2 การทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบดเคลื่อนที่

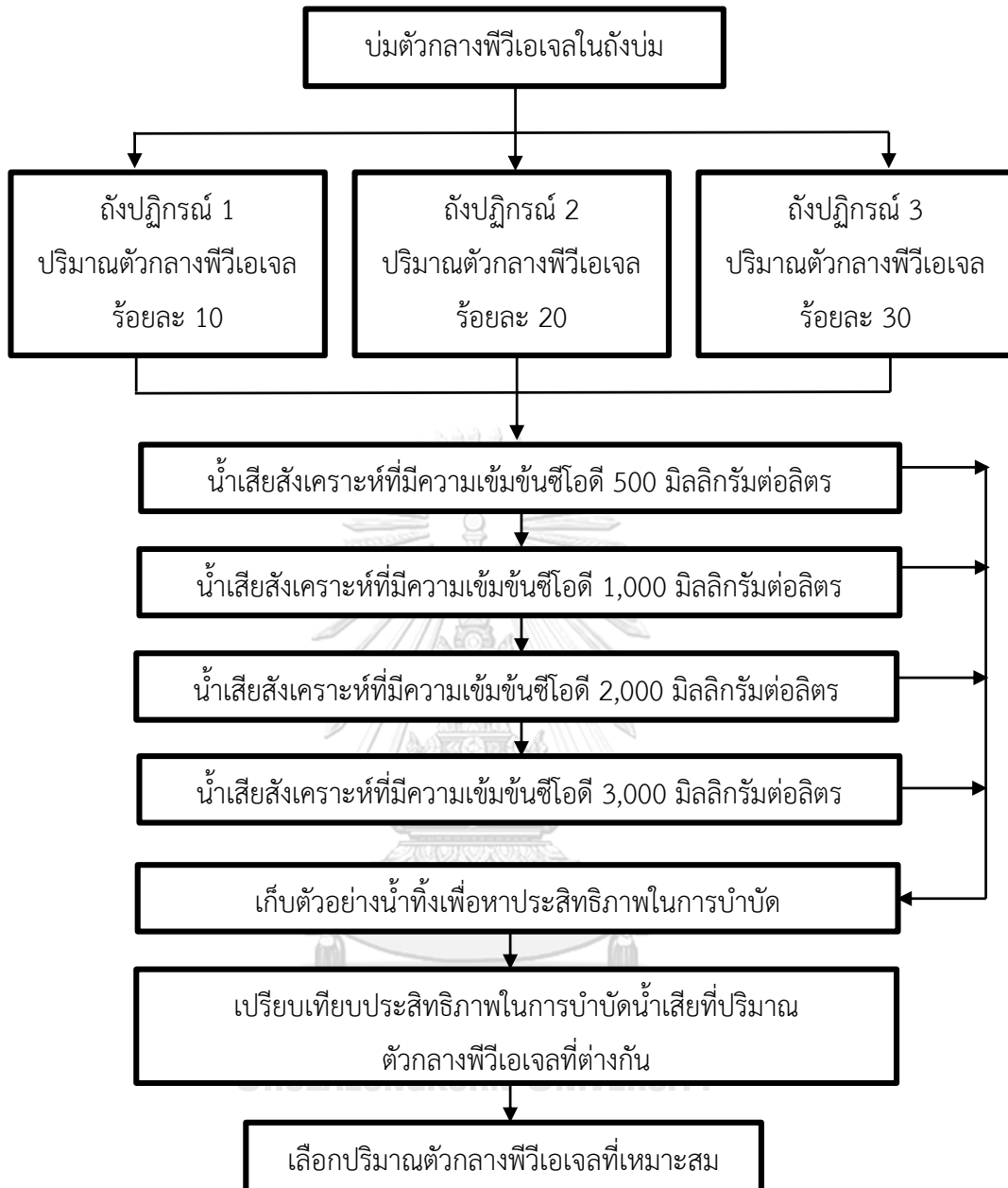
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.1

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 - ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 20 - ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 30
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ - ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4 ชั่วโมง - ปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร - พีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5

3.3.2.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1.1 แสดงดังรูปที่ 3.5

- 1) ป่มตัวกลางพีวีเอเจลในถังป่ม กำหนดระยะเวลาพักเก็บน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะบนผิวตัวกลาง โดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
- 2) เตรียมถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนจำนวน 3 ถัง ประกอบด้วยถังแรกเป็นถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ ตามด้วยถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 20 และสุดท้ายเป็นถังที่บรรจุตัวกลางร้อยละ 30 ตามลำดับ
- 3) เริ่มต้นเดินการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยปรับอัตราการไหลให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4) ตรวจสอบวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่
- 5) เพิ่มความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ได้ หาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดลองที่ 1.1

3.3.3 การทดลองที่ 1.2 ศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมเมื่อกำหนดให้พื้นที่ผิวของตัวกลางเท่ากัน

ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.2

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	- ตัวกลางพีวีเอเจล - ตัวกลางพลาสติกพีอี
ตัวแปรตาม	- ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ - ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต
ตัวแปรควบคุม	- ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4 ชั่วโมง - ปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร - พีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 - พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลาง (จากการทดลองที่ 1.1) ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

3.3.3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1.2 แสดงดังรูปที่ 3.6

1) บ่มตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีในถังบ่ม กำหนดระยะเวลาพักเก็บน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะบนผิวตัวกลาง โดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

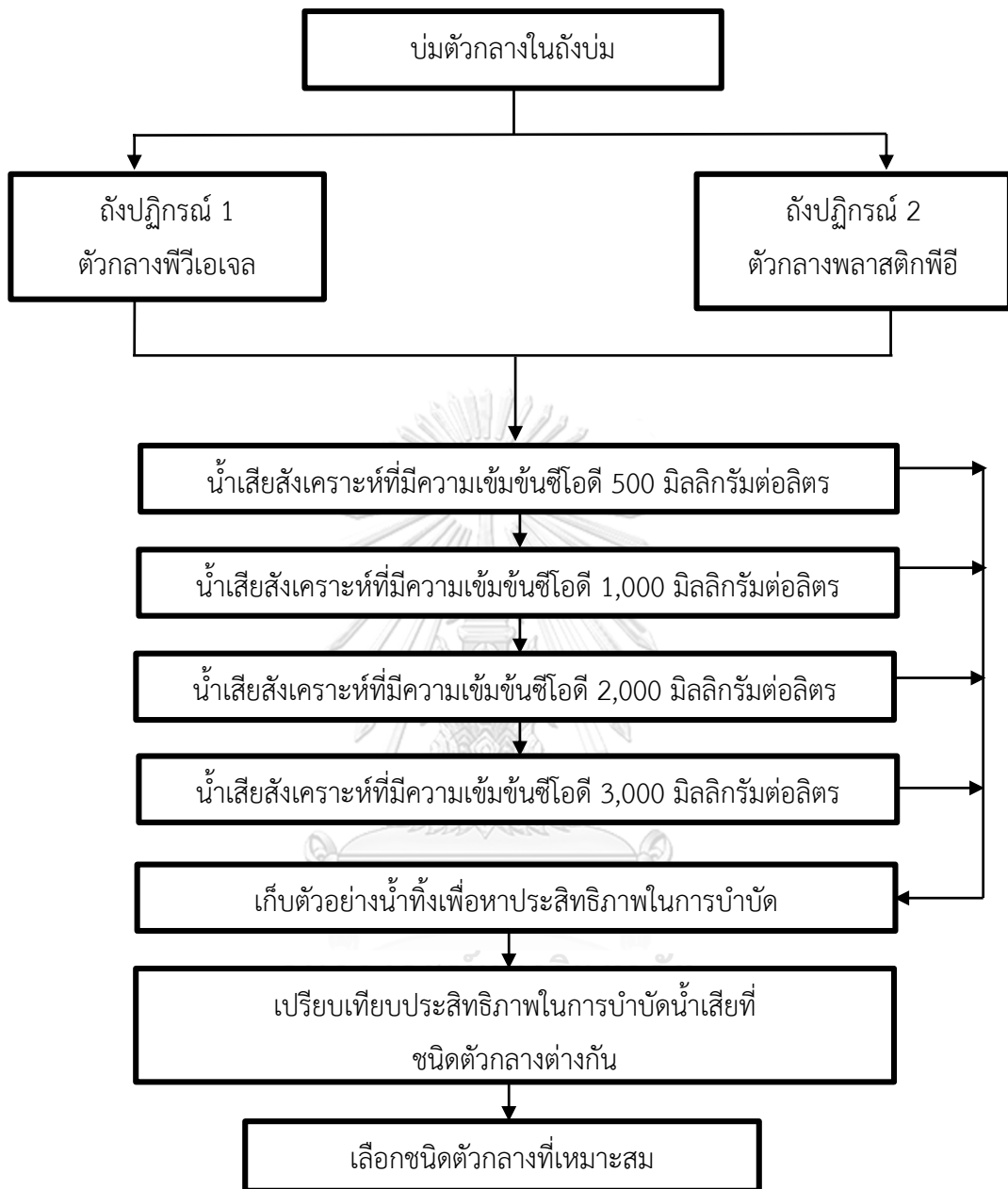
2) เตรียมถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนจำนวน 2 ถัง ประกอบด้วยถังแรกเป็นถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลและถังที่บรรจุตัวกลางพลาสติกพีอี (คำนวณจากผลการทดลองที่ 1.1)

3) เริ่มต้นเดินการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยปรับอัตราการไหลให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) ตรวจสอบวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

5) เพิ่มความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ได้ หาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทดลองที่ 1.2

3.3.4 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อการผลิตไบโอฟิล์ม

ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 2

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	<ul style="list-style-type: none"> - เหล็กคลอไรด์ - เหล็กอนุภาคนาโน
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ - ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง - ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4 ชั่วโมง - ปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร - พีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 - ชนิดตัวกลางและปริมาณบรรจุตัวกลาง

3.3.4.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.7

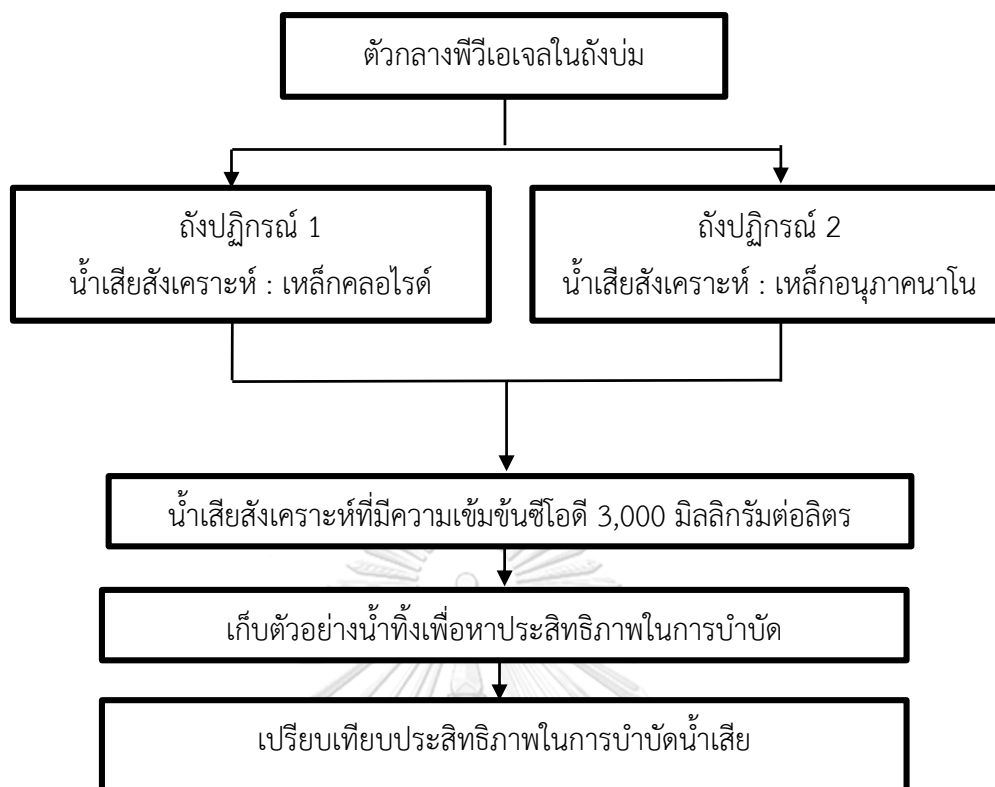
1) บ่มตัวกลางในถังบ่ม กำหนดระยะเวลาที่เก็บน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะบนผิวตัวกลาง โดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

2) เตรียมถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนจำนวน 2 ถัง ประกอบด้วยถังแรกเป็นถังที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเหล็กคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ และถังที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเหล็กอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบ

3) เริ่มต้นเดินการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยปรับอัตราการไหลให้มีระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) ตรวจวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

5) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ได้



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดลองที่ 2

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	หน่วย
พีเอช (PH)	เครื่องวัดพีเอช	-
ออกซิเจนละลาย (DO)	เครื่องวัดออกซิเจนละลาย	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (COD)	รีฟลักซ์แบบปิด	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทีเคเอ็น (TKN)	Macro Kjeldahl	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย (SS)	ทำให้แห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส	มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์โบไฮเดรต	วิธีฟินอล-ซัลฟูริก	มิลลิกรัมต่อลิตร
โปรตีน	วิธีเบรดฟอร์ด	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลักษณะทางกายภาพ	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	-

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว รูปร่างที่เปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มที่เกาะบนตัวกลางพีวีเอเจล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

ในงานวิจัยศึกษาลักษณะของตัวกลางโดยสุ่มตัวอย่างตัวกลางที่มีไบโอฟิล์มจากถังปฏิกรณ์ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) ซึ่งจะทำให้การสุมเก็บตัวอย่างในช่วงที่ระบบคงตัว เพื่อนำมาตุลักษณะพื้นผิวภายนอกของไบโอฟิล์ม โดยนำตัวกลางแช่สารละลาย 2.5% Glutaraldehyde ใน 0.1M phosphate buffer พีเอช 7.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือข้ามคืนที่อุณหภูมิ 4 องศา จากนั้นล้างออกด้วย phosphate buffer saline (PBS) จำนวน 2 ครั้ง แล้วตามด้วยน้ำปราศจากไอออน 2 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที จากนั้นเป็นขั้นตอนไล่น้ำออก (Dehydrated) โดยใช้สารละลายเอธานอล (ethanol) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 50 70 (2 รอบ) 95 และร้อยละ 100 (3 รอบ) ขั้นตอนละ 15 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทำให้แห้ง (Dried) ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง Critical point dryer (Leica model EM CPD300, Austria) และทำการผ่าครึ่งตัวกลาง จากนั้นติด ตัวอย่างบนแท่นวาง (Stab) ด้วยเทปกาวคาร์บอน จากนั้นนำไปฉาบทอง (Sputter coater, Balzers model SCD 040, Germany) นำตัวอย่างไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกและ ภายในของตัวกลางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Scanning Electron Microscope (SEM) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาฯ

3.5 การวิเคราะห์ทางด้านเคมี

เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ EPS เพื่อหาปริมาณ โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในไบโอฟิล์มบนตัวกลาง การสกัด EPS ที่อยู่บนตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอี ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ใช้วิธีการสกัดแบบ CER (AMBERLITE® HPR1100 Na+ Form 20 x 50 mesh, Sigma-Aldrich) ซึ่งใช้วิธีการสกัดของ Elhadidy, A. M. และคณะ (2017); Keithley, S. E. และคณะ (2018) นำเรซิน Na⁺ แช่ด้วย PBS 1 ชั่วโมง ในที่มืด และ stir ก่อนใช้งาน จากนั้นสุมตัวกลางพีวีเอเจล 30 เม็ด ใส่ในหลอดเซนติฟิวก์และใส่ PBS 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงในเครื่อง Centrifuge 9000 rpm ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดสารละลายใส่ทิ้งไปและล้างด้วย PBS 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงอีก 1 ครั้ง จากนั้นนำตัวกลางเทใส่ขวดลูกชมพู่พร้อมใส่เรซิน Na⁺ 12 กรัม Stir ที่ 600 rpm ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในที่มืด แล้วเทลงหลอดเซนติฟิวก์ไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 rpm 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เก็บส่วนน้ำใสมารองผ่านกระดาษกรอง 0.47 and 0.45 μm nylon เก็บในอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส (Elhadidy et al, 2017) แล้วนำไปวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธี (Lowry, Rosebrough, Farr, & Randall, 1951) ใช้ bovine serum

albumin (BSA) เป็นสารมาตรฐาน ส่วนคาร์โบไฮเดรตวิเคราะห์ด้วยวิธี phenolic-sulfuric acid ใช้กลูโคสเป็นสารมาตรฐาน

3.6 การวิเคราะห์ทางด้านชีวภาพ

นำตัวอย่างตัวกลาง 20 เม็ด มาวิเคราะห์ โดยขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการสกัด DNA ออกมาจากเม็ดตัวกลาง PVA Gel ซึ่ง Metagenomic DNA ถูกสกัดโดยใช้ชุดสกัด TIANamp Soil DNA kit (TIANGEN) ยีน 16S rRNA ถูกเพิ่มขยายจำนวนดีเอ็นเอโดยใช้ไพรเมอร์ 341F และ 805R, ซึ่งควบคุมช่วง V3-V4 variable regions และใช้เอนไซม์ sparQ HiFi PCR master mix (Quanta bio, USA) ซึ่ง 16S Amplicon primer มีรหัส Forward Primer เป็นดังนี้ TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG และมี Reverse Primer เป็น GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC ภาวะการเพิ่มขยายจำนวนดีเอ็นเอ เริ่มจากขั้นตอนการทำลายสภาพ 3 นาที ที่ 94 องศาเซลเซียส ตามด้วย 25 รอบที่ 98 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วินาที, ที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที และที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยขั้นตอน extension เป็นขั้นสุดท้ายที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้น metagenomic markers amplicons ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ AMPure XP beads และ 5 ไมโครลิตร ของ Nextera XT index primer ในปฏิกิริยา PCR ปริมาตร 50 ไมโครลิตร 8-10 รอบ นำผลิตภัณฑ์ PCR ขั้นสุดท้ายทำให้บริสุทธิ์ นำตัวอย่างทั้งหมดมารวมกันเป็นกลุ่ม และปรับความเข้มข้นสุดท้ายที่ 6 pM จากนั้นนำ ตัวอย่างมาส่งเพื่อทำการดีลัมบ์รหัสด้วยเครื่องใน Illumina MiSeq ที่ Omics Sciences และ Bioinformatics Center (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย) และการอ่านค่า นำไปเข้าโปรแกรม QIIME 2 2019.10.(Bolyen และคณะ 2019)

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่อหาค่าสำคัญทางสถิติ ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละการทดลองใช้วิธี One way ANOVA และโปรแกรม t-test ทดสอบความมีนัยสำคัญ ทางสถิติ $p < 0.05$ จะมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.8 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

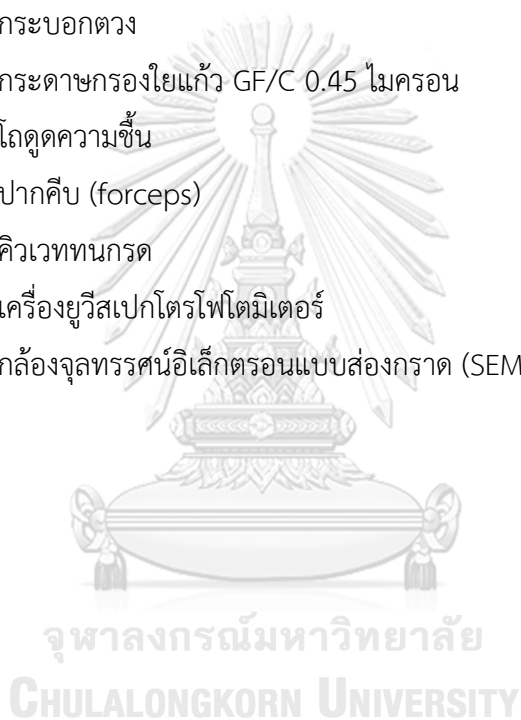
ลำดับ	สารเคมี	เกรด	บริษัท
<u>การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์</u>			
1	กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$)	AR	Kemaus
2	ยูเรีย (CH_4N_2O)	AR	Kemaus
3	โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)	AR	AJAX
4	แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)	AR	LOBA
5	เฟริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)	AR	
6	ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4)	AR	AJAX
7	แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	AR	AJAX
8	เฟริกออกไซด์ (Fe_2O_3)		
<u>การวิเคราะห์ซีไอดี</u>			
9	โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)	AR	AJAX
10	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4)	AR	Qrec
11	เมอร์คิวริก (II) ซัลเฟต ($HgSO_4$)	AR	Qrec
12	ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)	AR	Qrec
13	เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)	AR	Kemaus
14	เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	AR	Kemaus
15	1,10-ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)	AR	Qrec
<u>การวิเคราะห์ทีเคเอ็น</u>			
16	เมทิลเรด (Methyl red)	AR	Kemaus
17	เมทิลีนบลู (Methyl blue)	AR	Kemaus
18	เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH)	AR	Kemaus
19	boric acid (H_3BO_3)	AR	Kemaus
20	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4)	AR	Qrec
21	Potassium Sulfate (K_2SO_4)	AR	Kemaus
22	สารละลาย Copper Sulfate ($CuSO_4$)	AR	Kemaus
23	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)	AR	Kemaus
24	โซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$)	AR	Kemaus

ลำดับ	สารเคมี	เกรด	บริษัท
<u>การสกัด EPS</u>			
25	Na ion exchange resin		Sigma-Aldrich
26	โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	AR	Kemaus
27	โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	AR	Kemaus
28	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	AR	Kemaus
29	โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	AR	Ajax
30	กรดไฮโดรคลอริก (HCl)		
31	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	AR	Ajax
<u>การวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรต</u>			
32	ฟีนอล (phenol)	AR	LOBA
33	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4)	AR	Qrec
34	กลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	AR	Kemaus
<u>การวิเคราะห์โปรตีน</u>			
35	Coomassie Brilliant BlueG-250 (CBB)		
36	เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	AR	Qrec
37	กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)		
38	Bovine Serum Albumin (BSA)	AR	LOBA
39	<u>ลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง</u>		
40	เอทิลแอลกอฮอล์	AR	Qrec

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (DO meter)
3. น้ำกลั่น
4. ตู้อบ (oven)
5. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. หลอดซีโอตี
7. ชุดกรองบุคเนอร์ (Buchner funnel)

8. กระจกกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 ซม.
9. บิวเรต ขนาด 50 มล.
10. เครื่องกวนแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็ก (Hotplate Stirrer)
11. ปีกเกอร์
12. ซ้อนตักสาร
13. ชุดเครื่องย่อยสลาย
14. ขวดวัดปริมาตร
15. ปิเปต
16. กระจกบอทดวง
17. กระจกกรองใยแก้ว GF/C 0.45 ไมครอน
18. โถดูดความชื้น
19. ปากคีบ (forceps)
20. คิวเวททนกรด
21. เครื่องยิวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
22. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS (IT-500HR))



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านต่างๆ

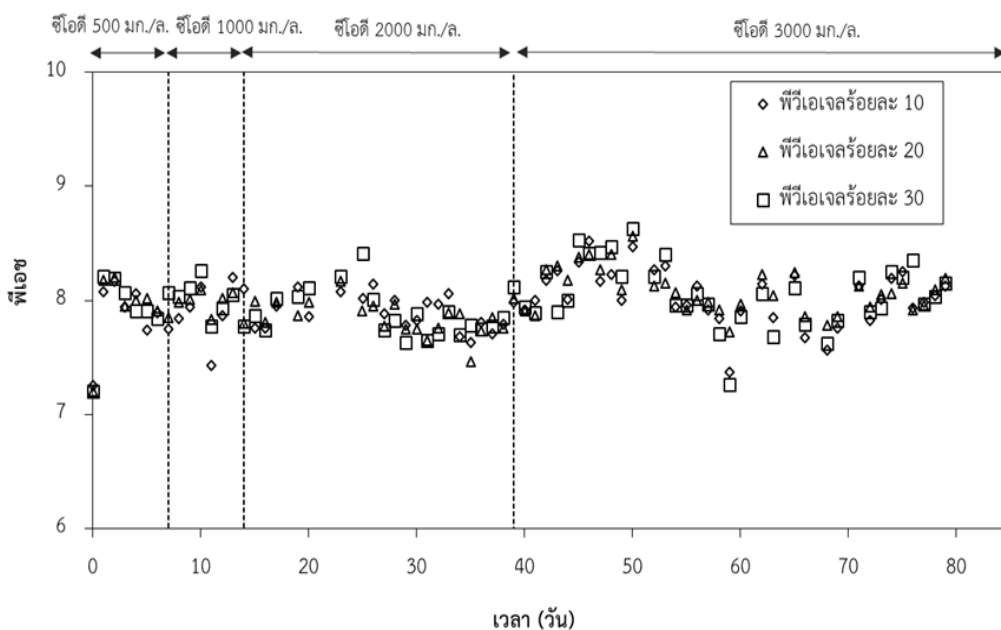
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH)

การศึกษาพีเอช ในการทดลองมีการควบคุมระดับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่มีสภาวะเป็นกลางตลอดการดำเนินการทดลองด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบ

จากการทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางที่เหมาะสม ค่าพีเอชระหว่างการเดินระบบตลอดการทดลองทำให้เห็นว่าปริมาณการบรรจุตัวกลางพีวีเอเจล ร้อยละ 10 20 และ 30 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เนื่องจากเมื่อตรวจวัดค่าพีเอชในระบบพบว่าค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีค่าอยู่ในช่วง 7.88-8.08 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ขณะที่การทดลองที่ 1.2 หาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมระหว่างตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกฟลู พบว่าในการทดลองนี้ทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์มีค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.76 - 8.07 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และสุดท้ายการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโน พบว่าค่าพีเอชระหว่างการเดินระบบตลอดการทดลอง ทำให้เห็นว่าอนุภาคเหล็กนาโนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช โดยตลอดการทดลองถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคลอไรด์มีค่าพีเอชเฉลี่ยที่ 7.73 ± 0.38 และถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กอนุภาคนาโนมีค่า 7.86 ± 0.19 ดังรูปที่ 4.2 โดยค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้ทั้ง 3 การทดลองมีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ (กรรณิการ์ ชูเกียรติวัฒนา, 2561)

ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

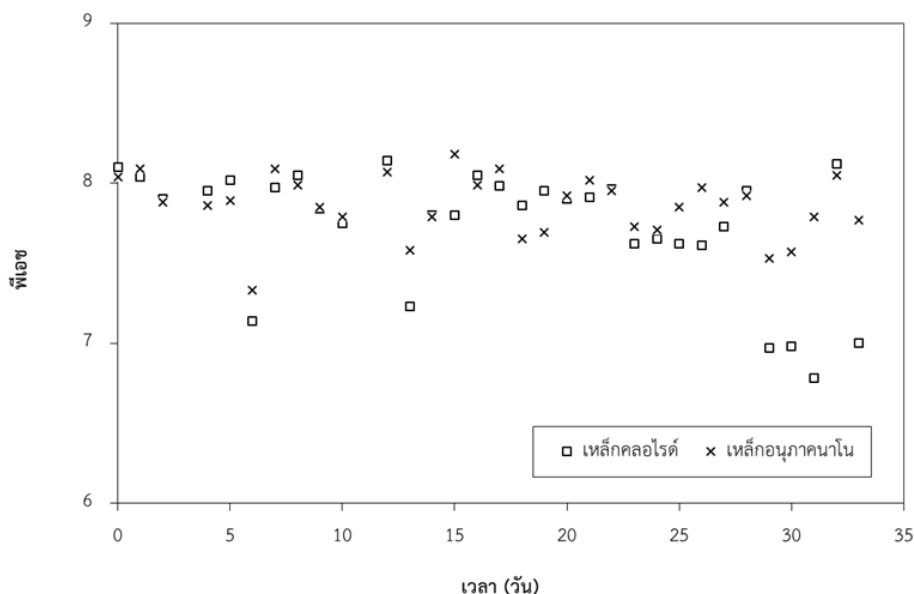
น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล)	พีเอช		
	พีวีเอเจลร้อยละ 10	พีวีเอเจลร้อยละ 20	พีวีเอเจลร้อยละ 30
500	7.88 ± 0.31	7.92 ± 0.34	7.90 ± 0.34
1,000	7.83 ± 0.23	7.96 ± 0.10	8.03 ± 0.17
2,000	7.91 ± 0.16	7.85 ± 0.15	7.88 ± 0.20
3,000	8.04 ± 0.24	8.08 ± 0.19	8.06 ± 0.28



รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษ ปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอติ ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษ ชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล)	พีเอช	
	ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
500	7.76 ± 0.37	7.92 ± 0.09
1,000	7.84 ± 0.51	8.07 ± 0.17
2,000	7.86 ± 0.33	7.96 ± 0.29
3,000	7.98 ± 0.20	7.97 ± 0.37



รูปที่ 4.2 ค่าพีเอชระหว่างการศึกษผลของอนุภาคเหล็กนาโน ที่ความเข้มข้นซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen, DO)

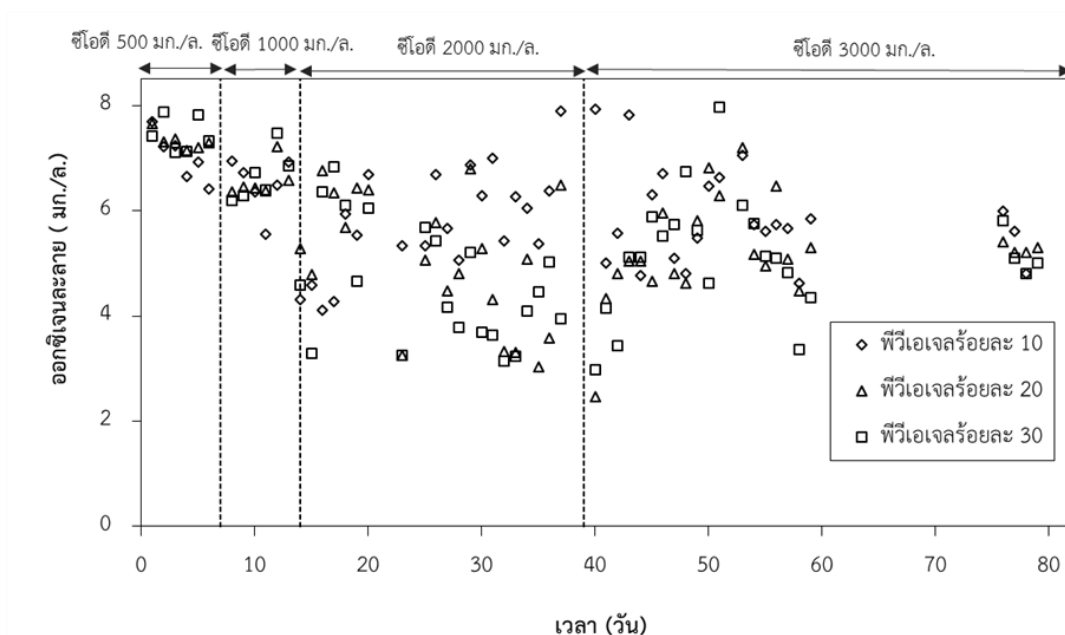
การศึกษาค่าออกซิเจนละลาย ในศึกษานี้ปริมาณออกซิเจนละลายเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นการเติมออกซิเจนให้มากกว่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการ เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มใช้อากาศ โดยค่าแนะนำที่เหมาะสมอยู่ที่ 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสม ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (start-up) พบว่าเมื่อเริ่มต้นเดินระบบที่ความเข้มข้นซีไอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร วันที่ 1-5 ปริมาณค่าออกซิเจนละลายเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.02-7.44 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากระบบชีวภาพเบดเคลื่อนต้องทำให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วถึงปฏิกรณ์ และในการทดลองนี้ใช้ตัวกลางพีวีเอเจล มีความหนาแน่น 1.025 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งหนักกว่าน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การเติมอากาศเข้าไปในระบบเพื่อเป็นตัวช่วยให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการ โดยพบว่าต้องมีการเติมอากาศในปริมาณที่สูงจึงส่งต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบทำให้มีค่าสูงกว่าค่าที่นิยมใช้ แสดงดังตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.3 และเมื่อเดินระบบต่อเนื่องพร้อมเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์จนความเข้มข้นซีไอดีสูงสุด 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายในระบบค่อยๆลดต่ำลงตามความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เพิ่มสูงขึ้น จนมีค่าอยู่ในช่วง $5.85 \pm 0.92 - 5.14 \pm 1.10$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษหาปริมาณบรรจุตัวกลางที่เหมาะสม

และในการทดลองที่ 1.2 การศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมในระบบที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลปริมาณออกซิเจนละลายในระบบลดลงจากช่วงเริ่มต้นเดินระบบปริมาณค่าออกซิเจนละลายเฉลี่ยเท่ากับ 7.76 ± 0.37 และ 7.92 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จนมีค่าเท่ากับ 3.77 ± 0.99 และระบบที่บรรจุตัวกลางพลาสติกฟิโอมีมีค่าเท่ากับ 4.46 ± 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.4 การที่ค่าออกซิเจนละลายในระบบลดลงเนื่องจากความเข้มข้นซีโอดีในระบบที่สูงขึ้นทำให้จุลินทรีย์มีความต้องการใช้ออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น รวมถึงปัจจัยจากพื้นผิวของหัวทรายเดิมอากาศมีการสะสมของไบโอฟิล์มทำให้เกิดการอุดตันของจึงส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนละลาย เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโน พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ค่าออกซิเจนละลายน้ำของทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 4.31 ± 1.16 และ 4.39 ± 0.95 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับถังที่ใช้เหล็กคลอไรด์และเหล็กอนุภาคนาโน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเหล็กนาโนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลาย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ย (มก./ล.)		
	พีวีเอเจลร้อยละ 10	พีวีเอเจลร้อยละ 20	พีวีเอเจลร้อยละ 30
500	7.02 ± 0.46	7.33 ± 0.18	7.44 ± 0.34
1,000	6.41 ± 0.53	6.56 ± 0.36	6.62 ± 0.17
2,000	5.82 ± 1.00	5.13 ± 1.26	4.70 ± 1.21
3,000	5.85 ± 0.92	5.23 ± 0.96	5.14 ± 1.10



รูปที่ 4.3 ปริมาณออกซิเจนละลายระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางฟิวเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล)	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล)	
	ตัวกลางฟิวเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
500	7.76 ± 0.37	7.92 ± 0.09
1,000	4.93 ± 0.31	5.01 ± 0.48
2,000	4.50 ± 0.30	4.49 ± 0.73
3,000	3.77 ± 0.99	4.46 ± 0.97

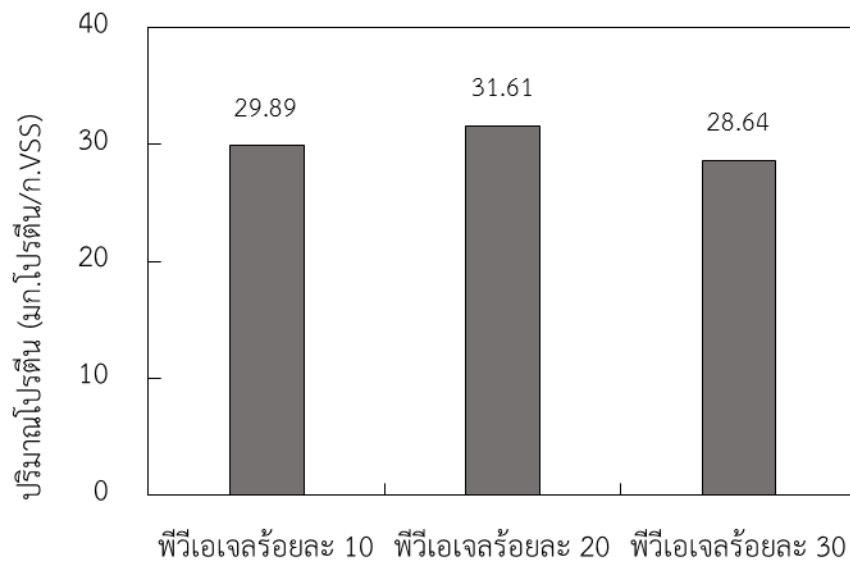
4.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี ศึกษาการวิเคราะห์ EPS เพื่อหาปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในไบโอฟิล์มบนตัวกลาง

ในระหว่างระยะคงที่ EPS ในไบโอฟิล์มบนตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอี ถูกสกัดออกโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน (Cation Exchange resin, CER) และวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีเบรดฟอร์ด ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร การวิเคราะห์ EPS จะประเมินค่าโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากแต่ละถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าแตกต่างกันซึ่งจะพบปริมาณโปรตีนเป็นส่วนใหญ่

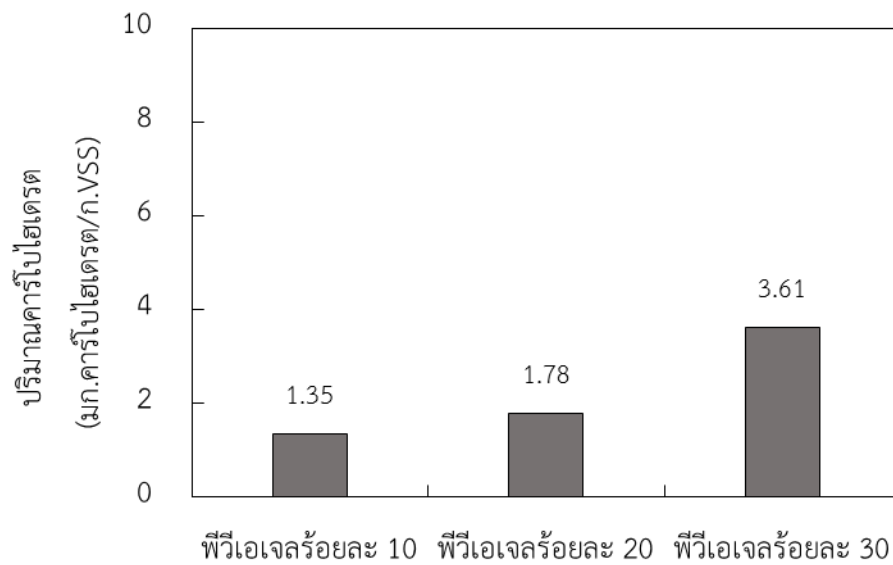
จากการทดลองที่ 1.1 ศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีจากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 30 เม็ดและวิเคราะห์ที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30 มีปริมาณโปรตีน 28.89 31.61 และ 28.64 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์ ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 1.35 1.78 และ 3.61 มิลลิกรัมคาร์โบไฮเดรตต่อกรัมจุลินทรีย์ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5-4.6 จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปริมาณการบรรจุตัวกลางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS โดยพบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการบรรจุปริมาณตัวกลางที่เพิ่มมากขึ้น (ร้อยละ 10 20 และ 30)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ของตัวกลางพีวีเอเจลระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์	ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัม จุลินทรีย์)	ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (มิลลิกรัมคาร์โบไฮเดรตต่อกรัม จุลินทรีย์)
พีวีเอเจลร้อยละ 10	28.89	1.35
พีวีเอเจลร้อยละ 20	31.61	1.78
พีวีเอเจลร้อยละ 30	28.64	3.61



รูปที่ 4.5 ปริมาณโปรตีนจากการสกัด EPS ตัวกลางฟิวเอเจอร์ระหว่างการศึกษาระดับกลาง ฟิวเอเจอร์ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

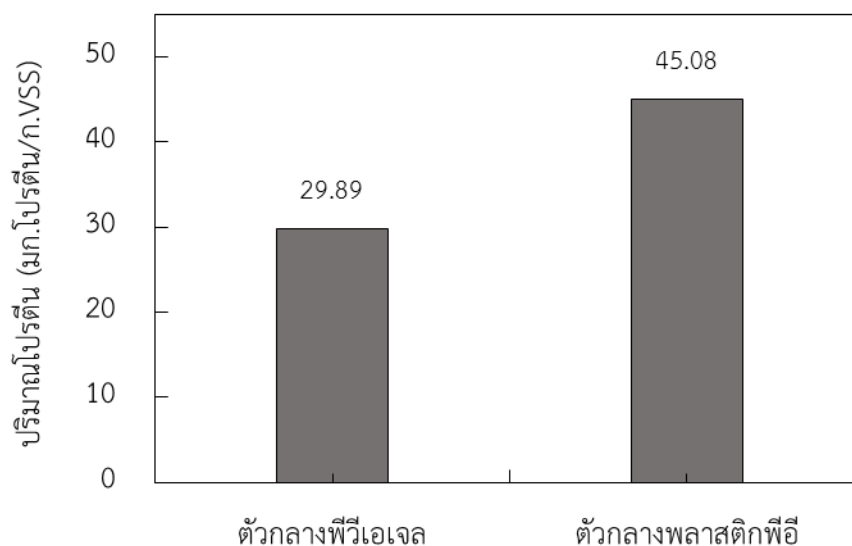


รูปที่ 4.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ตัวกลางฟิวเอเจอร์ระหว่างการศึกษาระดับกลาง ฟิวเอเจอร์ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีโอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

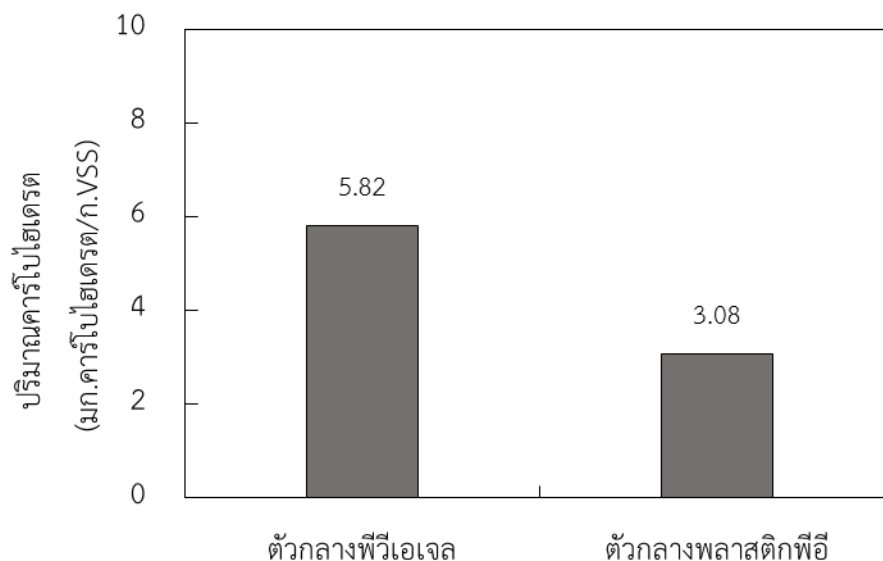
จากการทดลองที่ 1.2 ศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสม ระหว่างตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟอโต้ต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการสุ่มตัวอย่างตัวกลางพีวีเอเจลจำนวน 30 เม็ด พบว่ามีปริมาณโปรตีน 28.89 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 5.82 มิลลิกรัมคาร์โบไฮเดรตต่อกรัมจุลินทรีย์ และสุ่มตัวอย่างตัวกลางพลาสติกฟอโต้จำนวน 10 ชิ้น พบว่ามีปริมาณโปรตีน 45.08 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 3.08 มิลลิกรัมคาร์โบไฮเดรตต่อกรัมจุลินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7-4.8 ผลการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่าชนิดของตัวกลางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS ในปริมาณโปรตีนซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าตัวกลางพีวีเอเจล

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากการสกัด EPS ของตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟอโต้ระหว่างการศึกษานิตตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

ถึงปฏิกรณ์	ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัม จุลินทรีย์)	ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (มิลลิกรัมคาร์โบไฮเดรตต่อกรัม จุลินทรีย์)
ตัวกลางพีวีเอเจล	28.89	5.82
ตัวกลางพลาสติกฟอโต้	45.08	3.08



รูปที่ 4.7 ปริมาณโปรตีนของ EPS จากการสกัดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟอโต้ระหว่างการศึกษานิตตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

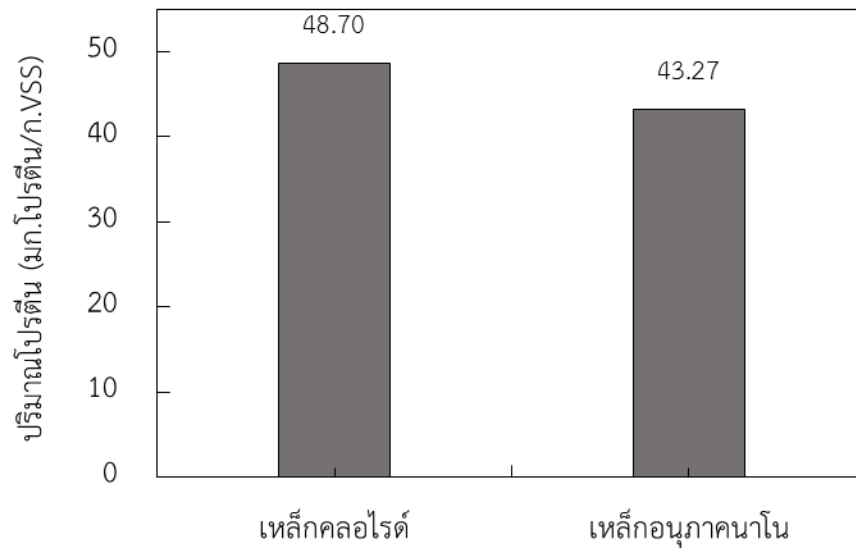


รูปที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ของ EPS จากการสกัดตัวกลางฟิวเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟิว ระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมต่อการเดินระบบที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

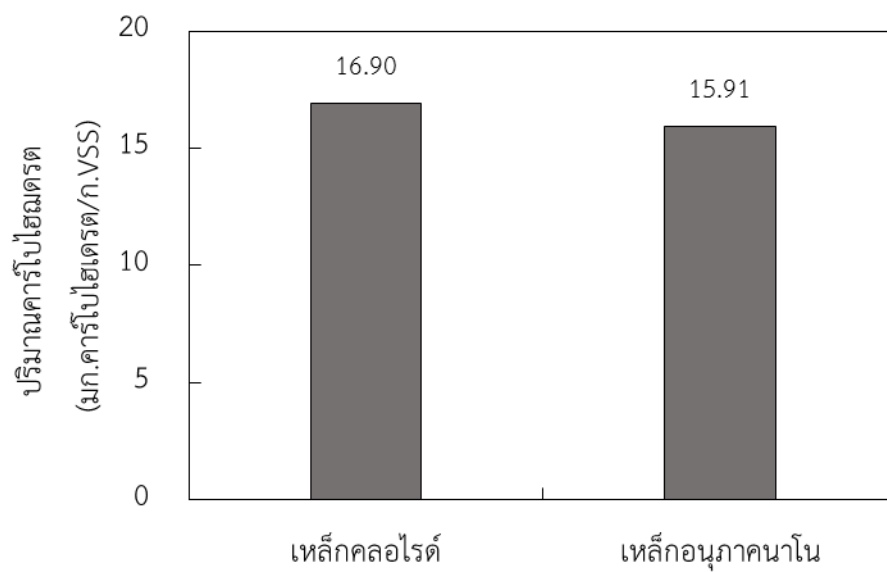
จากการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนบนตัวกลางพลาสติกฟิวต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการสู่มตัวอย่างตัวกลางพลาสติกฟิว จำนวน 10 ชิ้น ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคอลลอยด์พบว่ามีปริมาณโปรตีน 48.70 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัม จุลินทรีย์และมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 16.90 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม จุลินทรีย์ และในส่วนของถังปฏิกรณ์ที่ใช้อนุภาคเหล็กนาโนมีปริมาณโปรตีน 43.27 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัม จุลินทรีย์และมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 15.91 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม จุลินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.9-4.10 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเหล็กนาโนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS โดยพบว่าเหล็กอนุภาคนาโนทำให้ปริมาณโปรตีนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโปรตีนและคาร์บอนไดออกไซด์จากการสกัด EPS ของตัวกลางพลาสติกฟิวระหว่างการศึกษผลของอนุภาคเหล็กนาโน

ถังปฏิกรณ์	ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัม จุลินทรีย์)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม จุลินทรีย์)
เหล็กคอลลอยด์	48.70	16.90
เหล็กอนุภาคนาโน	43.27	15.91



รูปที่ 4.9 ปริมาณโปรตีนของ EPS จากการสกัดตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.10 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ EPS จากการสกัดตัวกลางพลาสติกพีอีระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี วิเคราะห์ EPS เพื่อหาปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในไบโอฟิล์มบนตัวกลาง สามารถสรุปได้ว่าชนิดของตัวกลางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS โดยพบว่าตัวกลางพลาสติกพีวีพบปริมาณโปรตีนที่มากกว่าตัวกลางพีวีเอเจล และการเพิ่มปริมาณการบรรจุตัวกลางจะทำให้ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และพบว่าปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีโอดีเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาผลของปริมาณ EPS (โปรตีน) เมื่อความเข้มข้นของซีโอดีต่างกัน (ขนิษฐา, 2562) อีกทั้งยังพบว่าการใช้เหล็กอนุภาคนาโนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS ซึ่งจะทำให้ปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตลดลง เมื่อนำปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตมาวิเคราะห์สัดส่วนพบว่า EPS ที่สกัดจากตัวกลางมีปริมาณโปรตีนมากกว่าคาร์โบไฮเดรต (Tian และคณะ, 2006) แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากระบบบำบัดเกิดจากการทำงาน 2 ส่วนคือส่วนที่เกาะอยู่ที่ตัวกลางและส่วนที่แขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ ประสิทธิภาพที่ได้จึงไม่แตกต่างกัน ระบบที่มีปริมาณการบรรจุตัวกลางเยอะจะมีไบโอฟิล์มเกาะอยู่บนตัวกลางได้มากกว่าระบบที่บรรจุตัวกลางน้อย เมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะบนตัวกลางถูกเกาะเต็มพื้นที่ทำให้จุลินทรีย์เกิดการเจริญเติบโตแบบแขวนลอยเพิ่มขึ้น

4.2 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD)

ซีโอดี 500 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการระสาดอินทรีย์ 3 6 12 และ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.2.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของปริมาณตัวกลางพีวีเอจที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในช่วงซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ มีซีโอดีในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 10.0-60.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 55.0 ± 8.66 , 28.3 ± 17.56 และ 23.3 ± 11.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในช่วงซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งอยู่ในช่วง 28.0-88.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 64.8 ± 22.82 , 41.4 ± 12.08 และ 46.8 ± 17.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ช่วงที่ 3 ซีโอดี 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งอยู่ในช่วง 40.0-436.7 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 193.6 ± 136.60 , 107.3 ± 43.99 และ 101.4 ± 36.29

มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในช่วงสุดท้ายที่ซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 78.7-1,036.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถบำบัดซีโอติเฉลี่ยให้เหลือ 387.3 ± 215.73 306.3 ± 169.96 และ 350.8 ± 220.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.11

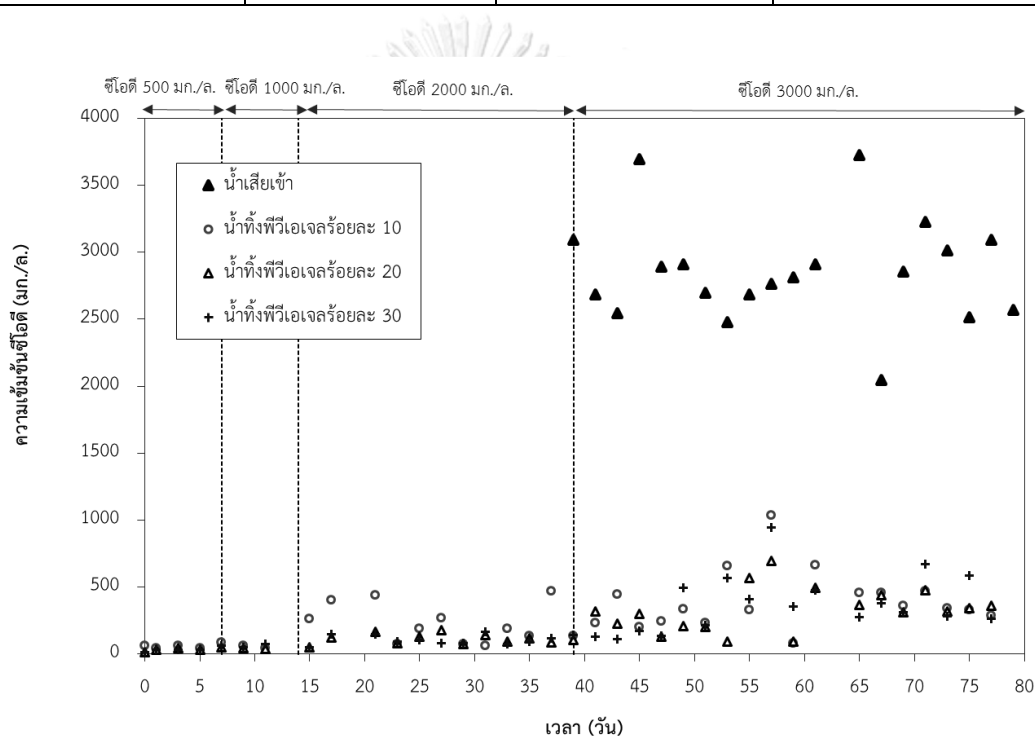
เมื่อนำค่าซีโอติในแต่ละชุดการทดลองมาคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติเฉลี่ยพบว่าถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจอร์ร้อยละ 10 20 และ 30 ในการทดลอง เมื่อซีโอติ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติเท่ากับ ร้อยละ 89.0 ± 1.73 , 94.3 ± 3.51 และ 95.3 ± 2.31 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มซีโอติ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 93.5 ± 2.28 95.9 ± 1.21 และ 95.3 ± 1.79 ตามลำดับ ที่ซีโอติ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 90.3 ± 6.83 94.6 ± 2.20 และ 94.9 ± 1.81 ตามลำดับ และสุดท้ายซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 86.4 ± 7.60 89.1 ± 6.12 และ 87.3 ± 7.62 ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดพบว่าถึงปฏิกรณ์ทั้ง 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่เมื่อมีการใช้ปริมาณตัวกลางที่ต่างกัน พบว่า เมื่อบรรจุปริมาณตัวกลางร้อยละ 40 ส่งผลให้ซีโอติลดลงสูงสุดที่ร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับการบรรจุตัวกลางร้อยละ 10 และ 20 ที่อัตราบรรจุทุกซีโอติผันผวนในช่วง 1.33-8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Vyrides และคณะ 2018)

ระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจอร์ร้อยละ 20 และ 30 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ อัตราการบรรจุทุกซีโอติ 3-12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระบบสามารถบำบัดซีโอติให้น้ำทิ้งสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) แต่ถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจอร์ร้อยละ 10 ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดให้ต่ำกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มอัตราการบรรจุทุกซีโอติ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันพบว่าไม่มีการทดลองชุดใด (ตัวกลางพีวีเอเจอร์ร้อยละ 10 20 และ 30) มีน้ำทิ้งที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งระบบที่บรรจุตัวกลางร้อยละ 20 สามารถบำบัดซีโอติลดลงให้เหลือได้น้อยที่สุด (306.3 ± 169.96 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)	ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มก./ล.)		
	พีวีเอเจลร้อยละ 10	พีวีเอเจลร้อยละ 20	พีวีเอเจลร้อยละ 30
500	55.0 ± 8.66	28.3 ± 17.56	23.3 ± 11.55
1,000	64.8 ± 22.82	41.4 ± 12.08	46.8 ± 17.90
2,000	193.6 ± 136.60	107.3 ± 43.99	101.4 ± 36.29
3,000	387.6 ± 215.73	306.3 ± 169.96	350.8 ± 220.04



รูปที่ 4.11 ปริมาณซีโอดีระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

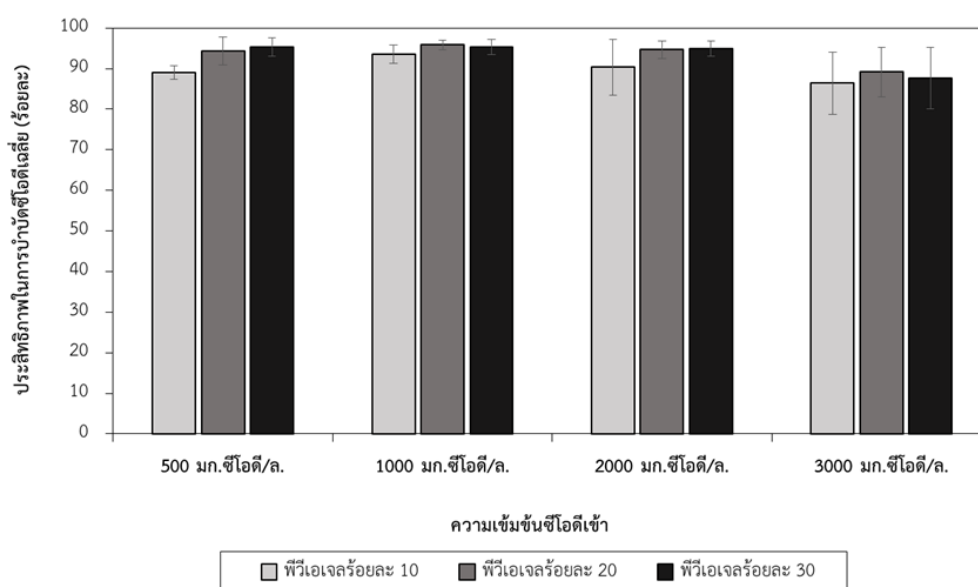
น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี		
	พีวีเอเจลร้อยละ 10	พีวีเอเจลร้อยละ 20	พีวีเอเจลร้อยละ 30
*500	89.0 ± 1.73	94.3 ± 3.51	95.3 ± 2.31
**1,000	93.5 ± 2.28	95.9 ± 1.21	95.3 ± 1.79
***2,000	90.3 ± 6.83	94.6 ± 2.20	94.9 ± 1.81
3,000	86.4 ± 7.60	89.1 ± 6.12	87.6 ± 7.62

หมายเหตุ

*ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 500 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

**ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 1,000 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

***ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 2,000 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อทำการพิจารณาจากพื้นที่ผิวตัวกลางต่อ 1 ตร.ม. หรืออัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ทั้ง 3 ถัง ซึ่งอาศัยการคำนวณอัตราการบำบัดจำเพาะแสดงผ่านสมการ

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะ} = \frac{(\text{ซีโอดีน้ำเข้า} - \text{ซีโอดีน้ำทิ้ง})}{\text{ระยะเวลาถังน้ำ} \times \text{พื้นที่ผิวจำเพาะ}}$$

พบว่าที่อัตราการสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ มีอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 148.3 ± 2.89 , 78.6 ± 2.93 และ 53.0 ± 1.28 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราการสารอินทรีย์เป็น 6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 311.7 ± 7.61 , 159.8 ± 2.01 และ 105.9 ± 1.99 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ที่อัตราการสารอินทรีย์เป็น 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 607.5 ± 47.24 , 316.9 ± 8.69 และ 211.9 ± 5.04 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ สุดท้ายเมื่ออัตราการสารอินทรีย์สูงสุด 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 824.7 ± 135.51 , 425.9 ± 69.79 และ 279.0 ± 48.67 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13

จากข้อมูลการวิเคราะห์อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ของการบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30 ต่อการบำบัดซีโอดี พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสารอินทรีย์สูงขึ้น (3 6 12 และ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) จะส่งผลให้อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นตาม และพบว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางร้อยละ 10 ของปริมาตรถัง จะมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะสูงสุดในทุกอัตราการสารอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่าผลของปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะ และจากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่อัตราการสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าปริมาณการบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 10 20 และ 30) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ซึ่งระบบไม่สามารถบำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้แต่ระบบยังคงมีประสิทธิภาพได้มากกว่าร้อยละ 80 และพบว่าในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางร้อยละ 10 พบว่าพื้นที่ผิว 1 ตารางเมตรของตัวกลางพีวีเอเจลมีความสามารถในการบำบัดซีโอดี 824.7 ± 135.51 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความสามารถในการบำบัดได้สูงที่สุด แต่พบปัญหาหาระหว่างเดินระบบ คือเกิดฟองในถัง ดังรูปที่ 4.14 ทำให้จำเป็นต้องมีการกำจัดฟองออกจากถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ฟองที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการที่ในทั้ง 3 ระบบมีอัตราการเติมอากาศที่เท่ากัน แต่มีปริมาณตัวกลางที่แตกต่างกัน ซึ่งในถังที่บรรจุตัวกลาง

ร้อยละ 10 เป็นถึงที่บรรจุตัวกลางน้อยที่สุด เมื่อเชื้อจุลินทรีย์และไบโอฟิล์มเกาะจนเต็มพื้นที่บนตัวกลางพีวีเอเจล ด้วยแรงเฉือนระหว่างการเติมอากาศ ไบโอฟิล์มจึงหลุดและเกิดการเจริญเติบโตและมีปริมาณ EPS เป็นส่วนที่แขวนลอยเพิ่มในระบบที่สูงขึ้น มีลักษณะเป็นเมือกเคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวตัวกลางและผิวหน้าของน้ำในถังปฏิกรณ์ ทำให้เวลาที่เติมอากาศลงไป อากาศจึงถูกดันลงไปแทนพื้นที่ในน้ำทำให้เกิดเป็นฟอง ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ผู้วิจัยเลือกใช้ปริมาณการบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลที่ร้อยละ 20 ในการเดินระบบในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.10 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) ระหว่างการศึกษาปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

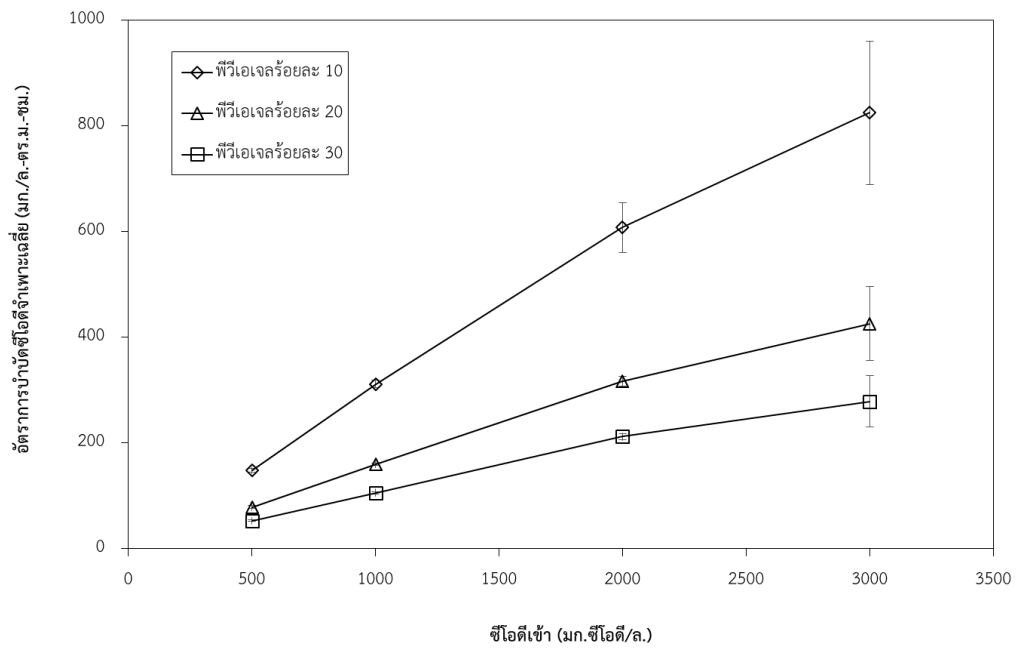
น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)	อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มก./ล.-ตร.ม.-ชม.)		
	พีวีเอเจลร้อยละ 10	พีวีเอเจลร้อยละ 20	พีวีเอเจลร้อยละ 30
*500	148.3 ± 2.89	78.6 ± 2.93	53.0 ± 1.28
*1,000	311.7 ± 7.61	159.8 ± 2.01	105.9 ± 1.99
*2,000	607.5 ± 47.24	316.9 ± 8.69	211.9 ± 5.04
3,000	824.7 ± 135.51	425.9 ± 69.79	279.0 ± 48.67

หมายเหตุ

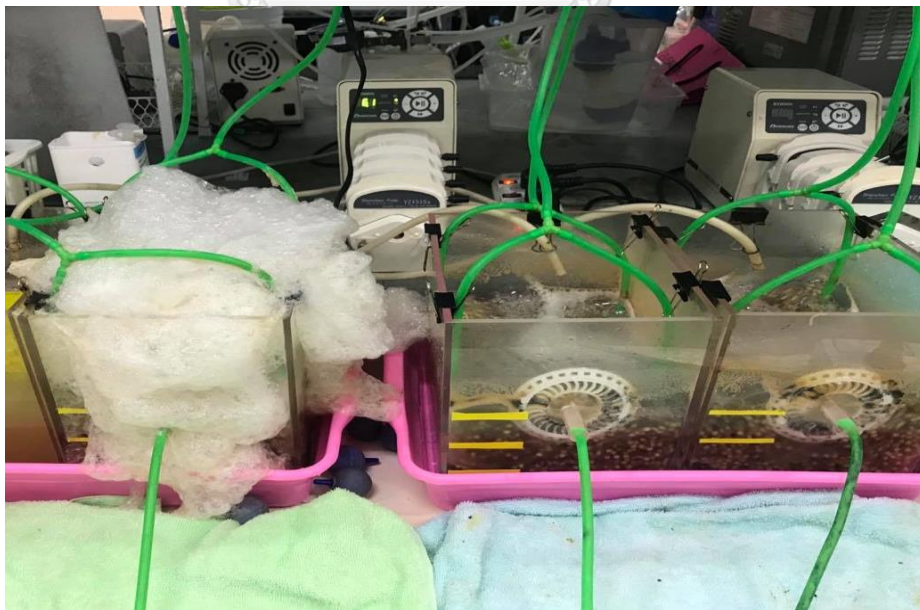
*ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 500 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

**ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 1,000 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

***ใช้ความเข้มข้นขาเข้า 2,000 มก./ล ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.13 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระดับปริมาณตัวกลางพีวีเอเจลที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (ร้อยละ 10 20 และ 30) ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.14 รูประหว่างการเดินระบบ

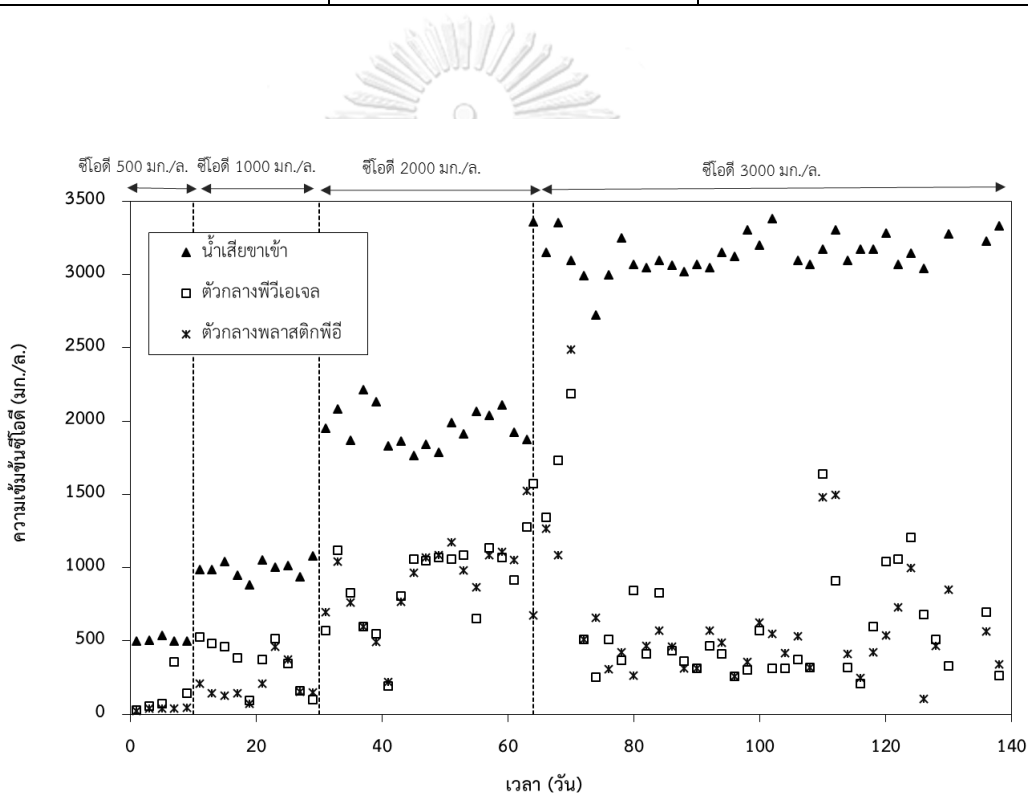
4.2.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของชนิดตัวกลางพีวีเอจและตัวกลางพลาสติกพีอีที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในช่วงที่ 1 ที่ซีไอ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุเม็ดตัวกลางพีวีเอจมีค่าซีไอในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 26.3 - 140.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 73.2 ± 46.68 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังปฏิกิริยาที่บรรจุพลาสติกพีอีมีค่าซีไอในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 21.0-43.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 35.80 ± 10.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ที่ซีไอ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุเม็ดตัวกลางพีวีเอจมีค่าซีไออยู่ในช่วง 96.1-526.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 344.6 ± 167.66 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังปฏิกิริยาที่บรรจุพลาสติกพีอีมีปริมาณซีไออยู่ในช่วง 74.4 - 459.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 203.4 ± 120.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ที่ซีไอ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุเม็ดตัวกลางพีวีเอจมีค่าซีไออยู่ในช่วง 193.6 - 1274.9 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 883.7 ± 285.26 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังปฏิกิริยาที่บรรจุพลาสติกพีอีมีค่าซีไออยู่ในช่วง 219.4-1522.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 910.7 ± 301.39 มิลลิกรัมต่อลิตร สุดท้ายที่ซีไอ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุเม็ดตัวกลางพีวีเอจมีค่าซีไออยู่ในช่วง 206.3-2184.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เฉลี่ยเท่ากับ 679.14 ± 493.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังปฏิกิริยาที่บรรจุพลาสติกพีอีมีค่าซีไออยู่ในช่วง 104.9-2488.9 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นซีไอเฉลี่ยเท่ากับ 626.4 ± 457.46 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยพบว่าที่ซีไอ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยร้อยละ 85.7 ± 9.73 และถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีอีมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยร้อยละ 93.0 ± 1.94 และเมื่อเพิ่มซีไอ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 65.5 ± 16.62 และถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีอีมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยร้อยละ 79.7 ± 11.83 ที่ซีไอ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 54.5 ± 15.55 และถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีอีมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยร้อยละ 53.1 ± 16.33 และซีไอ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 78.6 ± 15.40 และถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางพีอีมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอเฉลี่ยร้อยละ 80.3 ± 14.53 แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.16 ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค t-test พบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอที่ได้นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า $P > 0.05$

ตารางที่ 4.11 ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

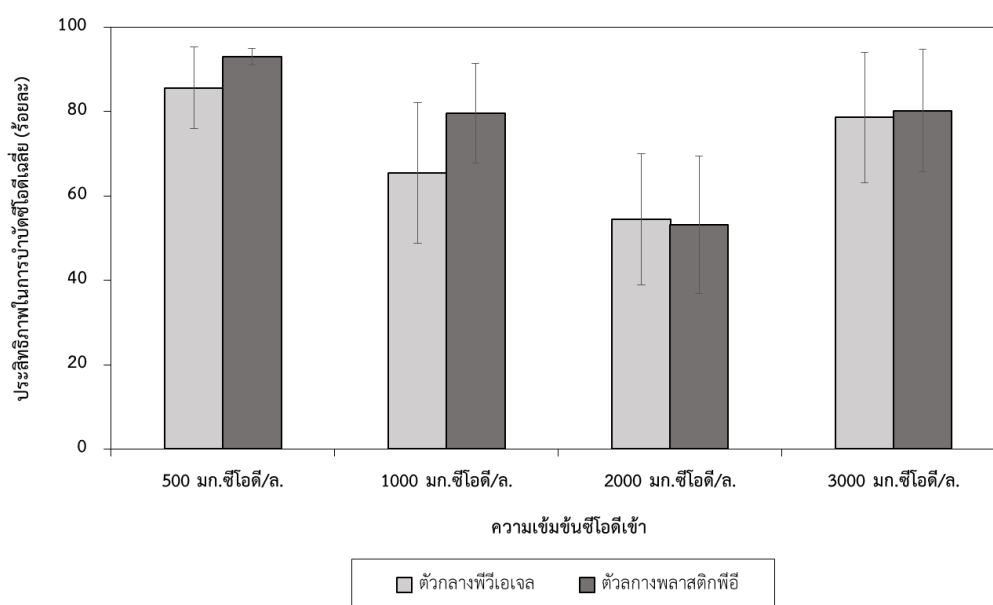
น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)	ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งเฉลี่ย (มก./ล.)	
	ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
500	73.2 ± 46.68	35.8 ± 10.07
1,000	344.6 ± 167.66	203.4 ± 120.44
2,000	883.7 ± 285.26	910.7 ± 301.39
3,000	679.1 ± 493.25	626.4 ± 457.46



รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นซีโอดีระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) พลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล)	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ย	
	ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
500	85.7 ± 9.73	93.0 ± 1.94
1,000	65.5 ± 16.62	79.7 ± 11.83
2,000	54.5 ± 15.55	53.1 ± 16.33
3,000	78.6 ± 15.40	80.3 ± 14.53



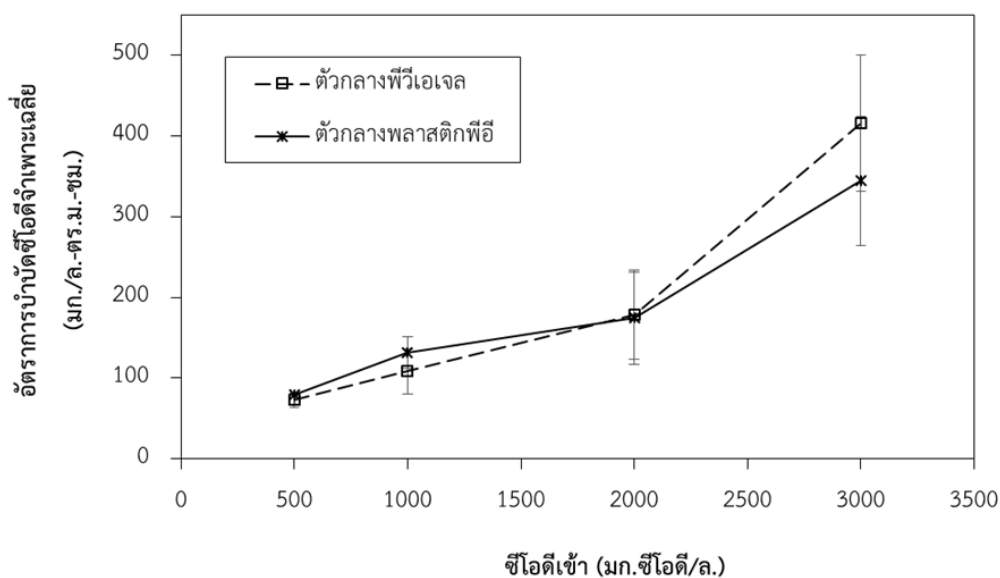
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาชนิดตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอีที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ทั้ง 2 ถัง พบว่าที่อัตราการระสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 73.0 ± 8.66 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. และถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีอีมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 79.2 ± 2.88 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 108.1 ± 27.36 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. และถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีอีมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 131.6 ± 19.72 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 178.6 ± 55.6 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. และถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีอีมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 174.1 ± 57.69 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. ที่อัตราการระสารอินทรีย์สูงสุด 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 415.6 ± 84.81 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. และถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีอีมีค่าอัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 424.4 ± 80.31 มก./ล.-ตร.ม.-ชม. แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.17

จากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าชนิดตัวกลางการบรรจุตัวกลาง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ซึ่งระบบไม่สามารถบำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้แต่ระบบที่ใช้ตัวกลางพลาสติกพีอียังคงมีประสิทธิภาพได้มากกว่า และพบว่าในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกพีอี พื้นที่ผิว 1 ตารางเมตรของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีที่ใกล้เคียงกันแต่ตัวกลางพลาสติกพีอีมีค่ามากกว่าอยู่ที่ 424.4 ± 80.31 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าตัวกลางพลาสติกพีอีมีอัตราการบำบัดซีโอดีได้สูงกว่าและจากผลการวิเคราะห์ชนิดของตัวกลางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ EPS ที่กล่าวข้างต้น ตัวกลางพลาสติกพีอีมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่มากกว่าตัวกลางพีวีเอเจล แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์มีการเจริญและเกาะติดเป็นไบโอฟิล์มบนตัวกลางพลาสติกพีอีได้ดีกว่าบนตัวกลางพีวีเอเจล เนื่องมาจากการที่ตัวกลางพลาสติกพีอีมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่ภายในโครงสร้างซึ่งเป็นพื้นที่ว่างภายในตัวกลาง ทำให้จุลินทรีย์เกาะติดและเจริญได้ง่าย ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างของตัวกลางพีวีเอเจลที่มีรูพรุนอยู่ภายในทำให้จุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนไม่สามารถเข้าไปเจริญอยู่ภายในตัวกลางได้และเกิดการเจริญอยู่ภายนอกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งเมื่อถูกแรงเฉือนของอากาศทำให้เกิดการหลุดออกไปในระบบ ทำให้เมื่อวิเคราะห์ eps จึงพบปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนบนตัวกลางพีวีเอเจลได้น้อยกว่าตัวกลางพลาสติกพีอี ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวกลางพลาสติกพีอีในการเดินระบบในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.13 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

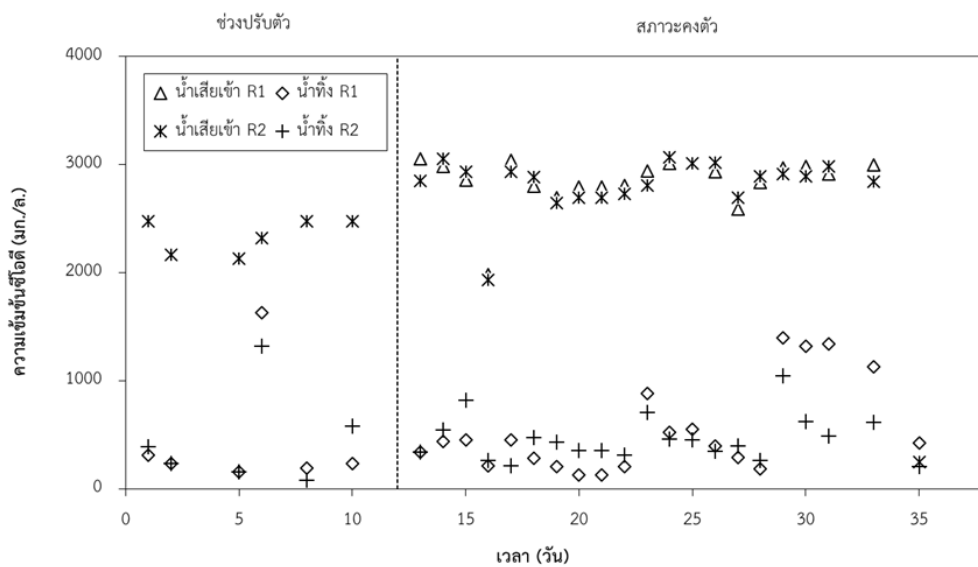
น้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล)	อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (มก./ล.-ตร.ม.-ชม.)	
	ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
500	73.0 ± 8.66	79.2 ± 2.88
1,000	108.1 ± 27.36	131.6 ± 19.72
2,000	178.6 ± 55.6	174.1 ± 57.69
3,000	415.6 ± 84.81	424.4 ± 80.31



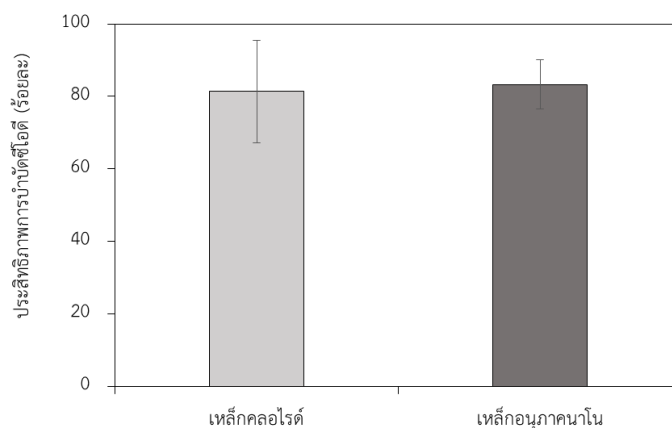
รูปที่ 4.17 อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะเฉลี่ย (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บ 4 ชั่วโมง เตินระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.3 การทดลองที่ 2 ผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอติ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.18 โดยใช้เวลาเดินระบบทั้งหมด 33 วัน ประกอบด้วยช่วงก่อนเริ่มการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่นำเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลางมาเลี้ยงเพื่อปรับสภาพให้จุลินทรีย์พร้อมที่จะทำงาน เป็นเวลา 12 วัน และเริ่มต้นเดินซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 13 ที่พบว่า ถังที่ใช้เหล็กคลอไรด์มีค่าซีโอติในน้ำทิ้งเฉลี่ย 541.9 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติเฉลี่ยร้อยละ 81.4 และถังที่ใช้อนุภาคเหล็กนาโนมีค่าซีโอติในน้ำทิ้งเฉลี่ย 474.7 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติเฉลี่ยร้อยละ 83.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค t-test พบว่าค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า $p > 0.05$ ทั้งนี้ในสภาวะที่เดินระบบพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 แต่น้ำทิ้งยังคงมีค่าซีโอติที่สูงกว่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการเพิ่มระยะเวลาเก็บน้ำให้มากกว่า 4 ชั่วโมง หรือเพิ่มหน่วยกระบวนการบำบัดอื่นๆ เช่น ระบบบำบัดแบบไร้อากาศเป็นระบบบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นซีโอติเฉลี่ย ระหว่างการศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลต่อระบบภายใต้ระยะเวลาเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยระหว่างการศึกษาระบบของอนุภาคเหล็กนาโนที่ส่งผลกระทบต่อระบบ ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง ที่ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน

4.3 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

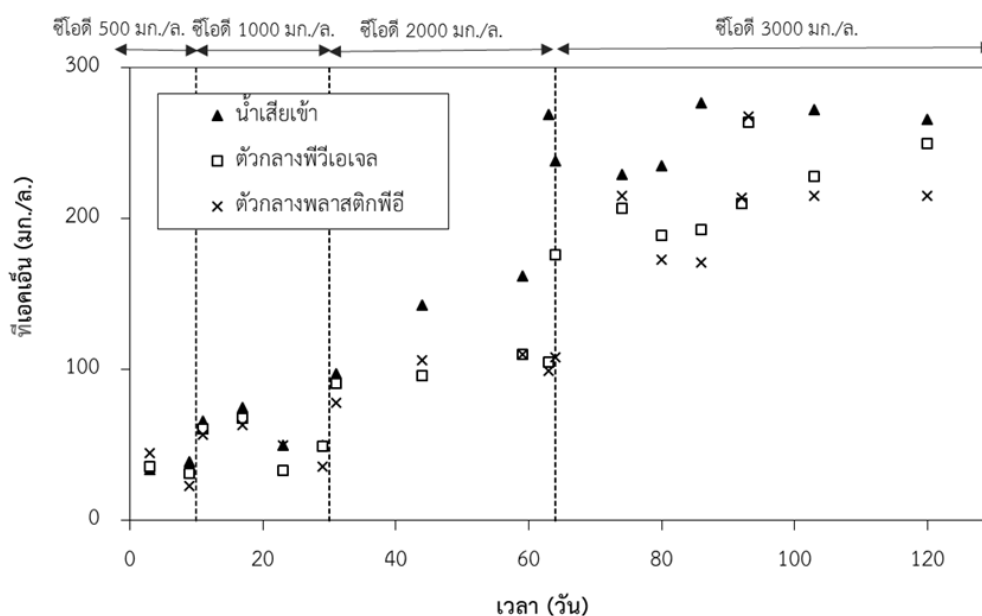
4.3.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของปริมาณตัวกลางพีวีเอจที่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับพบว่า ค่าทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 150 - 160 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นเท่ากับร้อยละ 36.0 37.6 และ 33.9 ตามลำดับ

4.3.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของชนิดตัวกลางพีวีเอจและตัวกลางพลาสติกพีอีที่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าทีเคเอ็น

จากผลการวิเคราะห์ทีเคเอ็น พบว่าระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนได้เพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ อัตราภาระสารอินทรีย์ 3 6 และ 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอจสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 20.5, 13.2 และ 31.6 ตามลำดับ และเมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นลดลงเหลือร้อยละ 16.3 ส่วนถึงที่บรรจุตัวกลางพลาสติกพีอีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นอยู่ที่ ร้อยละ

41.0 14.4 39.1 และ 22.2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค t-test ของค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นในทุกช่วงการเดินระหว่างถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลและถังที่บรรจุตัวกลางพลาสติก มีค่า $P > 0.05$ แสดงถึงค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ



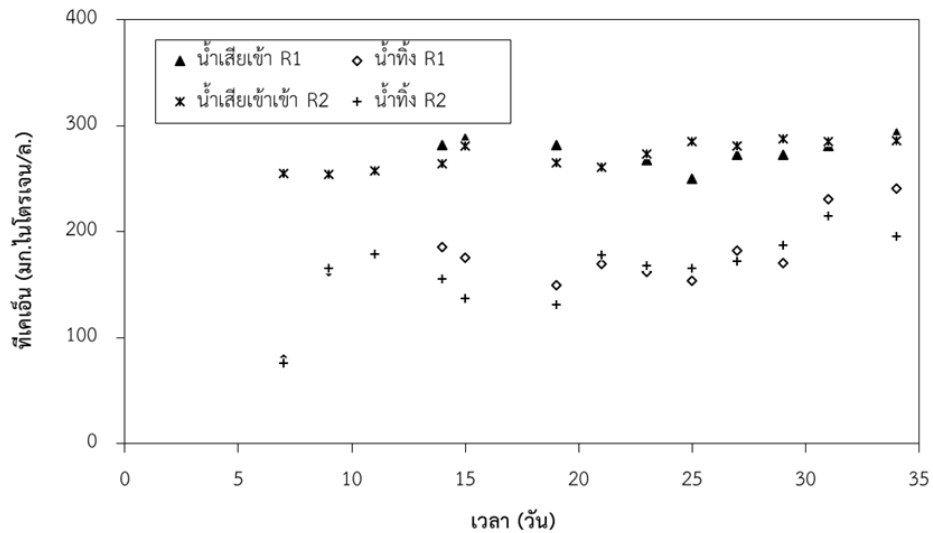
รูปที่ 4.20 ปริมาณความเข้มข้นที่เคเอ็น (1) ตัวกลางพีวีเอเจล (2) ตัวกลางพลาสติกพีอี ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง เดินระบบที่ความเข้มข้นซีโอติ ช่วงที่ 1 ; 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ; 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงที่ 3 ; 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่ 4 ; 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

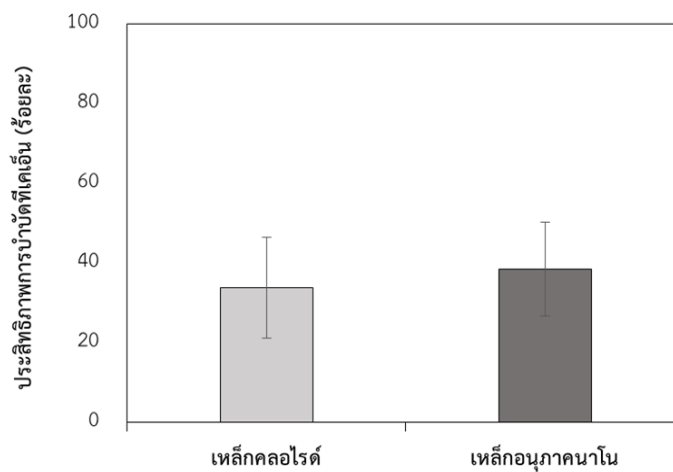
4.3.3 การทดลองที่ 2 ผลของอนุภาคเหล็กนาโนส่งผลกระทบต่อระบบในด้านการเปลี่ยนแปลงของค่าที่เคเอ็น

จากผลการวิเคราะห์ที่เคเอ็นช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคลอไรด์สามารถบำบัดที่เคเอ็นได้ร้อยละ 33.89 และถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กนาโนมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นได้ร้อยละ 38.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค t-test พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของทั้งสองถึงปฏิกรณ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยไนโตรเจนที่หายไปบางส่วนเกิดจากการที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างซีโอติที่ใช้ไปต่อไนโตรเจนในถึงปฏิกรณ์ที่ใช้อนุภาคเหล็กคลอไรด์มีค่า 150 : 5.56 และถึงปฏิกรณ์ที่ใช้อนุภาคเหล็กอนุภาคนาโนมีค่าเท่ากับ 150 : 6.39

ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนระหว่างซีโอติต่อไนโตรเจนทางทฤษฎีของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์กลุ่มใช้อากาศที่มีค่าเท่ากับ 150 : 5 (Metcalf และ Eddy, 2014)



รูปที่ 4.21 ปริมาณความเข้มข้นที่เคเอ็น เติบโตขึ้นที่ความเข้มข้นซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง

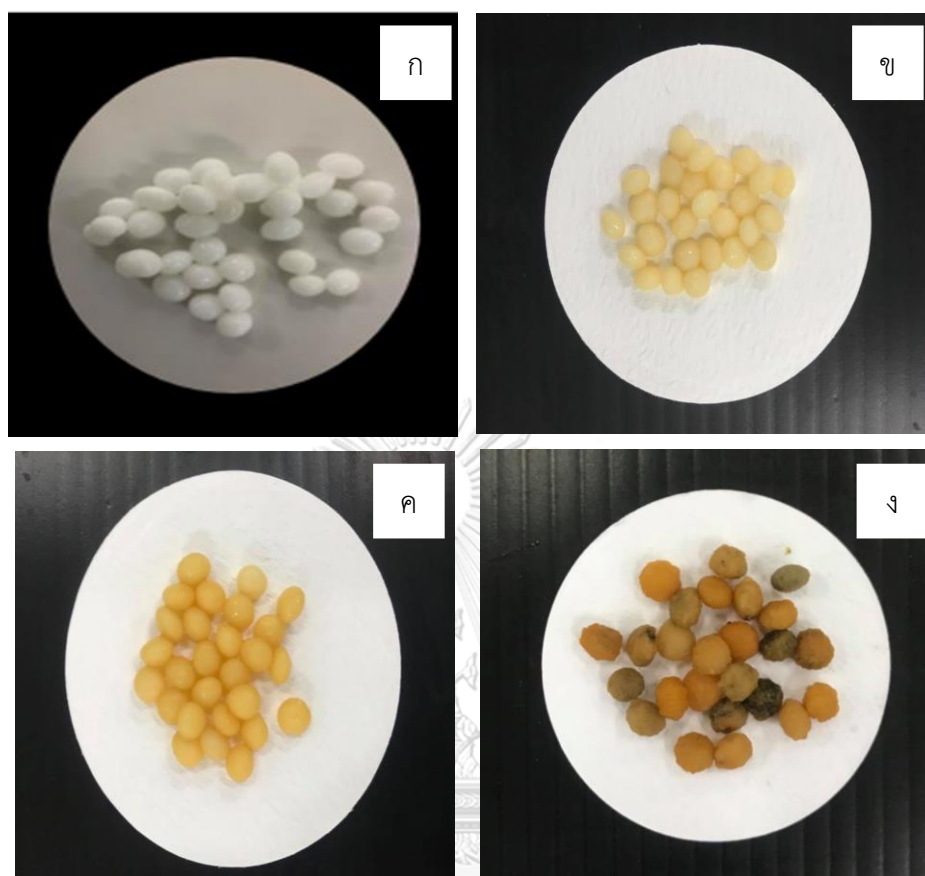


รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นเฉลี่ย ที่ความเข้มข้นซีโอติ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย (R1) ใช้เหล็กคลอไรด์ (R2) ใช้เหล็กอนุภาคนาโน ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชั่วโมง

4.4 ผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในด้านการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ

4.4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของตัวกลางพีวีเอเจล

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว สีและรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มที่เกาะบนตัวกลางพีวีเอเจลที่ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.23 ตัวกลางพีวีเอเจลก่อนเริ่มใช้งานจะมีลักษณะกลมและมีสีขาว เมื่อทำการเดินระบบป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พบว่าตัวกลางเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเทียบกับตัวกลางที่ยังไม่ได้นำมาใช้งาน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 2,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตัวกลางพีวีเอเจลจะมีสีเหลืองเข้ม ขณะที่เพิ่มความเข้มข้นสูงสุดที่ 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พบว่าตัวกลางเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและมีบางส่วนเริ่มเป็นสีดำรวมทั้งรูปทรงของตัวกลางพีวีเอเจลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่ลักษณะพื้นผิวเรียบเป็นขรุขระ สอดคล้องเช่นเดียวกันกับงานวิจัย (Geed และคณะ 2017; Sonwani และคณะ 2019) ในระยะเริ่มต้นช่วงปรับตัว (start-up stage) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดถูกใช้เพื่อสังเกตการก่อตัวของไบโอฟิล์มบนตัวกลาง ซึ่งแบคทีเรียจะเกาะติดที่ตัวกลางและสร้างเป็นไบโอฟิล์มสีเหลืองซีดอย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกันเมื่อระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนคั่งที่ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการเริ่มต้นเดินระบบที่ประสบความสำเร็จ และจะสังเกตเห็นไบโอฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองบนตัวกลาง



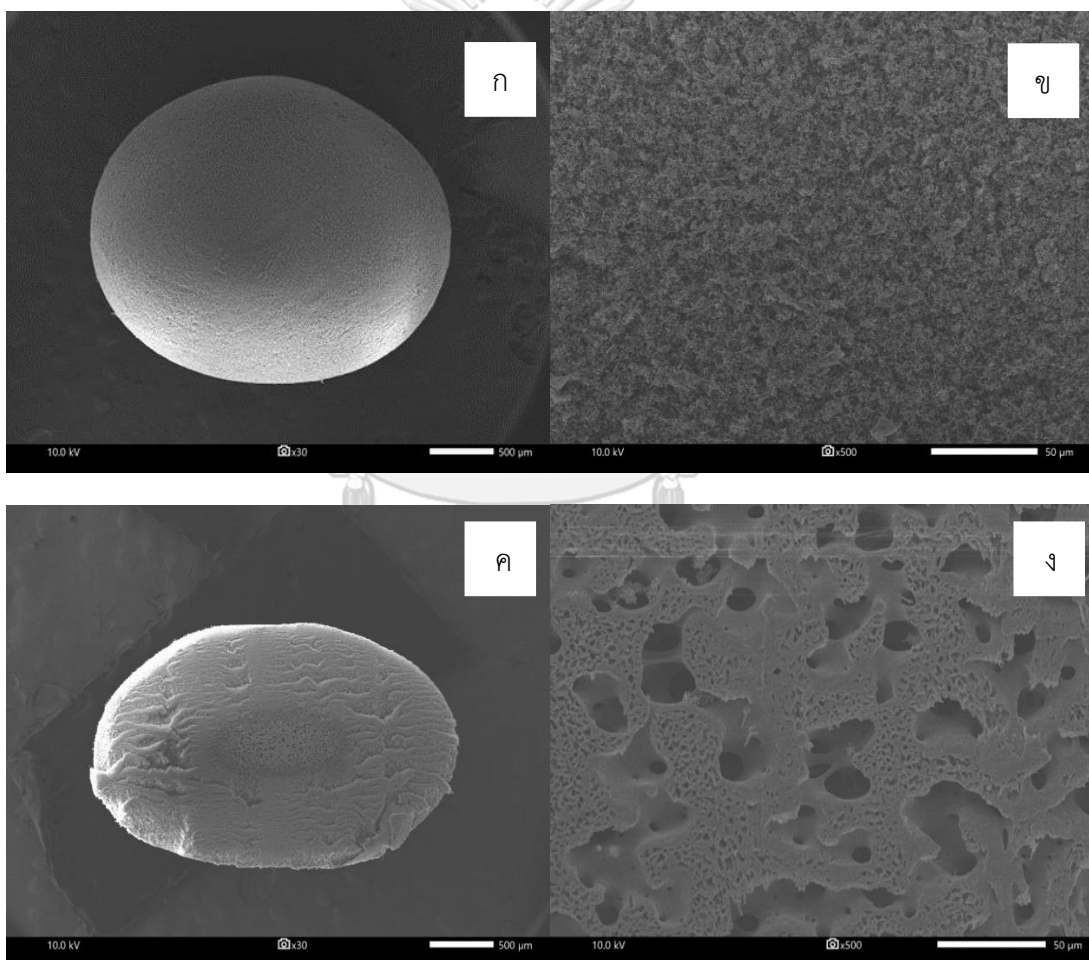
รูปที่ 4.23 ตัวกลางพีวีเอเจลที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียดังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (ก) ก่อนเริ่มเดินระบบ (ข) 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ค) 2,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ง) 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

4.4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ของตัวกลางพีวีเอเจลก่อนใช้

การวิเคราะห์ SEM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการสังเกตลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว ซึ่งตัวกลาง LDPE-PP และ PUF-PP แสดงรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำให้พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพในการสร้างไบโอฟิล์ม การก่อตัวของไบโอฟิล์มบนพื้นผิวของตัวกลางขึ้นอยู่กับกิจกรรมการเผาผลาญของแบคทีเรียและสารประกอบภายนอกเซลล์ การก่อตัวของไบโอฟิล์มของแบคทีเรียในตัวกลางอาจเกิดจากการรวมกันของชั้นจุลินทรีย์ (Sonwani และคณะ 2019)

การก่อตัวของไบโอฟิล์มบนตัวกลางขึ้นอยู่กับตัวแปรของกระบวนการเช่น pH อุณหภูมิ ความพร้อมของสารอาหารและความเข้มข้นของพื้นผิวเป็นต้น (Geed และคณะ 2017)

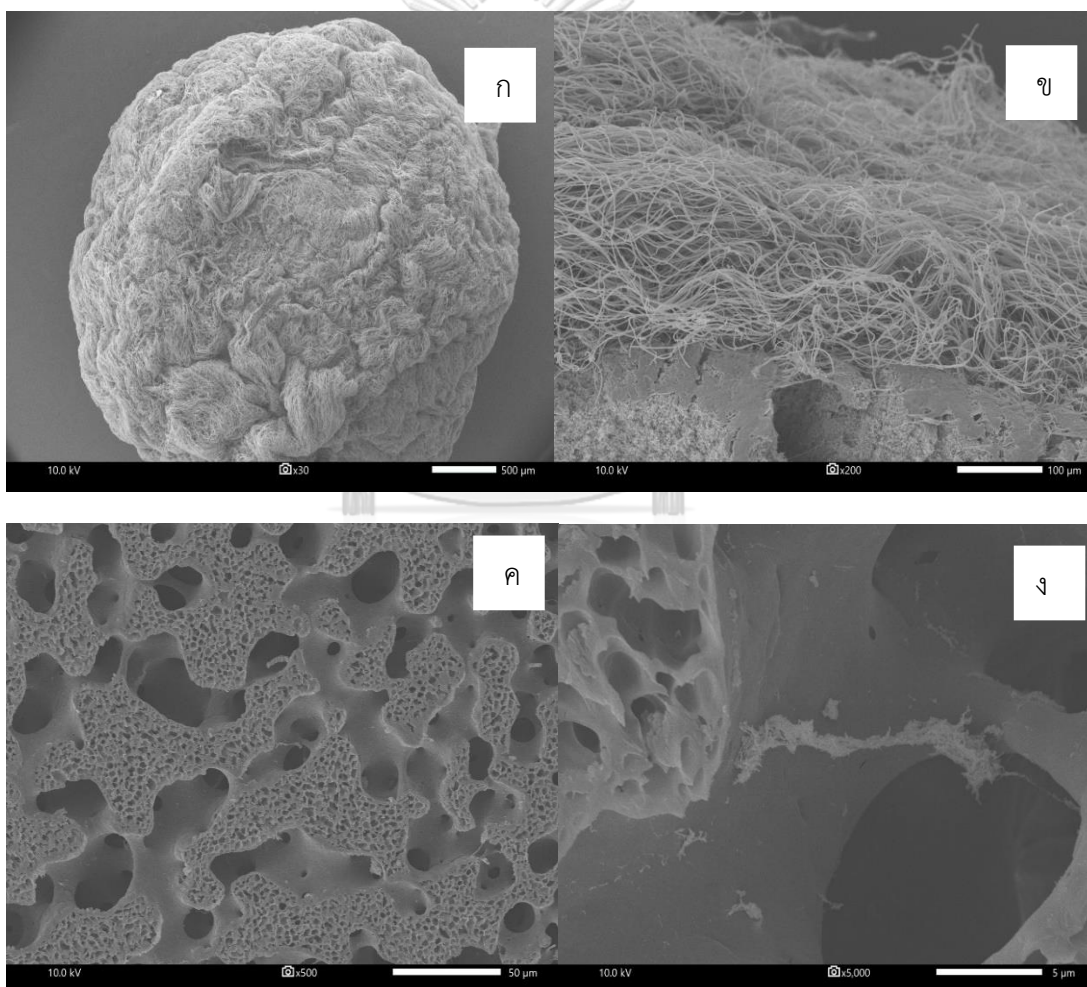
ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางพีวีเอเจลเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ((SEM-EDS(IT-500HR)) ดังรูปที่ 4.24 เมื่อส่องด้วยกำลังขยาย 30 เท่า พบว่าตัวกลางพีวีเอเจลก่อนนำมาทดลองมีลักษณะเป็นทรงกลม แสดงดังรูป 4.24 (ก) มองด้วยตาเปล่าพื้นผิวเรียบ เมื่อดูที่ กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า พื้นผิวภายนอกของตัวกลางนั้นมีความขรุขระ 4.24 (ข) และเมื่อทำการตัดขวางตัวกลางพีวีเอเจล ดังรูป 4.24 (ค) พบว่าพื้นที่ภายในมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหขนาดประมาณ 10-30 ไมครอน ดังรูป 4.24 (ง)



รูปที่ 4.24 ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ((SEM-EDS(IT-500HR)) ของตัวกลางพีวีเอเจลก่อนใช้งาน (ก) ตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ข) พื้นผิวของตัวกลางพีวีเอเจลกำลังขยาย 500 เท่า (ค) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ง) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 500 เท่า

4.4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ของตัวกลางพีวีเอเจลหลังผ่านการใช้

หลังจากเดินระบบพบว่าเชื้อจุลินทรีย์เจริญและเกาะติดอยู่บนพื้นผิวภายนอกของตัวกลางพีวีเอเจลทำให้พื้นผิวของตัวกลางพีวีเอเจลขรุขระ และมีรูปร่างที่ต่างไปจากเดิม ดังรูป 4.25 (ก) เมื่อทำการตัดขวางตัวกลางพีวีเอเจลและทำการส่องกล้องจุลทรรศน์บริเวณรูพรุนโดยทั่วไปไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อส่องที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์เจริญอยู่ภายในรูพรุนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูป 4.25 (ง) ในขณะที่เมื่อส่องบริเวณขอบพื้นผิวดังตัวกลางพีวีเอเจลพบเชื้อกลุ่มเป็นเส้นใยเจริญเติบโตอยู่เป็นจำนวนมาก ดังรูป 4.25 (ข)

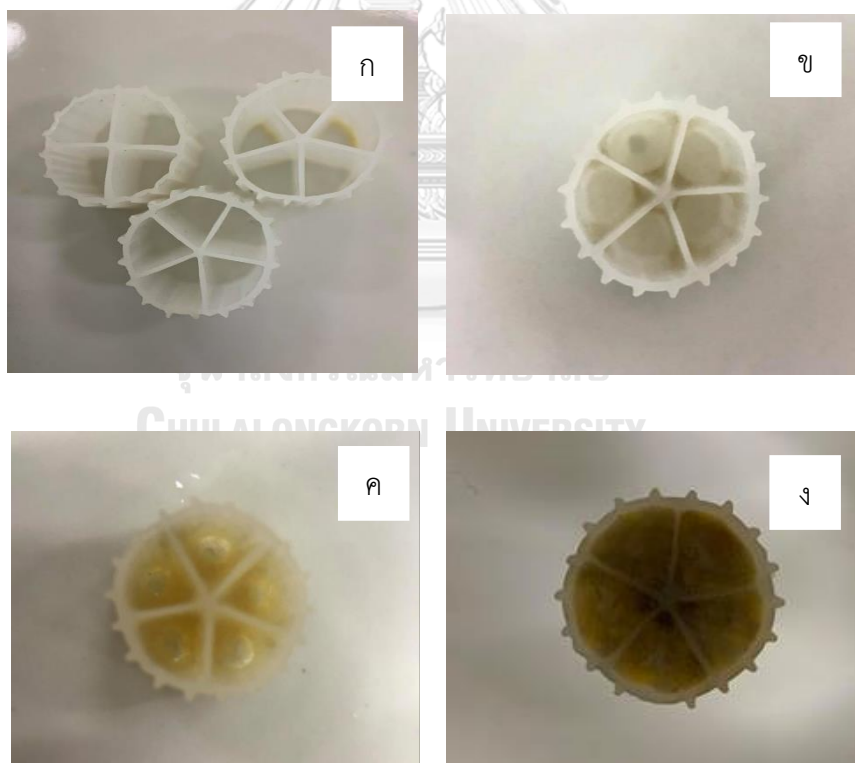


รูปที่ 4.25 ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ((SEM-EDS(IT-500HR)) ของตัวกลางพีวีเอเจลหลังใช้งาน (ก) ตัวกลางพีวีเอเจล กำลังขยาย 30 เท่า (ข) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนขอบพื้นผิวดังตัวกลางที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค) ภาพตัดขวาง

ของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนพื้นที่รูพรุน กำลังขยาย 500 เท่า (ง) ภาพตัดขวางของตัวกลางพีวีเอเจลส่วนพื้นที่รูพรุน กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของตัวกลางพลาสติกพีอี

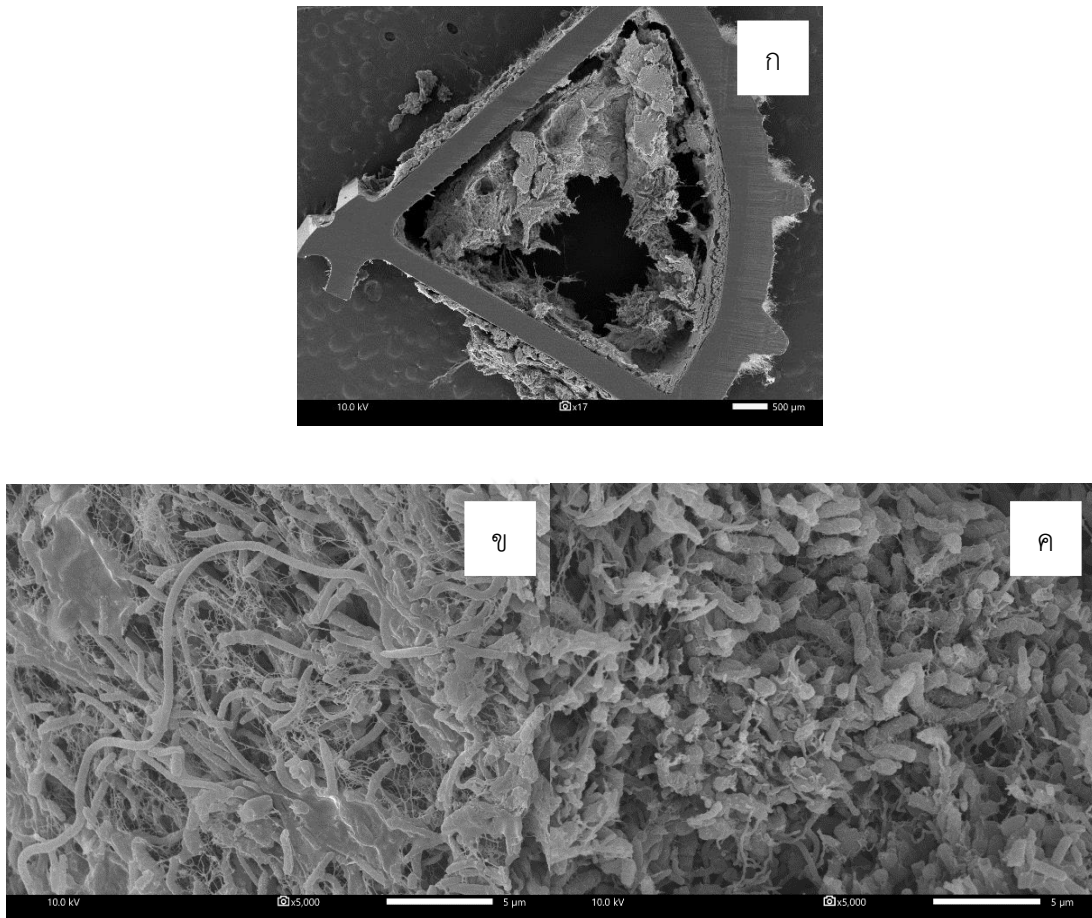
ลักษณะของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนตัวกลางพลาสติกพีอี พบว่าโครงสร้างของตัวกลางพลาสติกพีอีเป็นโครงสร้างทรงกระบอก และมีช่องกั้นระหว่างภายในโครงสร้างของตัวกลางเริ่มแรกจุลินทรีย์จะค่อยๆเริ่มเกาะบริเวณมุมของตัวกลางก่อน จากนั้นจะค่อยๆเจริญเติบโตและสร้างไบโอฟิล์มจนเต็มพื้นที่ของตัวกลาง ซึ่งในบริเวณพื้นที่ส่วนกลางของตัวกลางจุลินทรีย์อาจมีการหลุดออกจากพื้นที่ของตัวกลางในบางส่วนเนื่องจากแรงเฉือนจากการเติมอากาศ นอกจากนี้ตัวกลางเกิดการเสียดสีกันส่งผลให้ไม่พบจุลินทรีย์ที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 4.26 จากรูป ง. จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนมุม สีของเชื้อจุลินทรีย์จะมีสีที่เข้มเนื่องจากเป็นเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มแรกที่มาเกาะอยู่บนพื้นผิวทำให้มีอายุของเชื้อที่นานกว่าส่วนอื่น



รูปที่ 4.26 ตัวกลางพลาสติกพีอี (ก) ยังไม่ได้ใช้งาน (ข) หลังจากบ่ม 14 วัน (ค) หลังจากเดินระบบ 24 วัน (ง) หลังจากเดินระบบ 79 วัน

4.4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ของตัวกลางพลาสติกพีอี

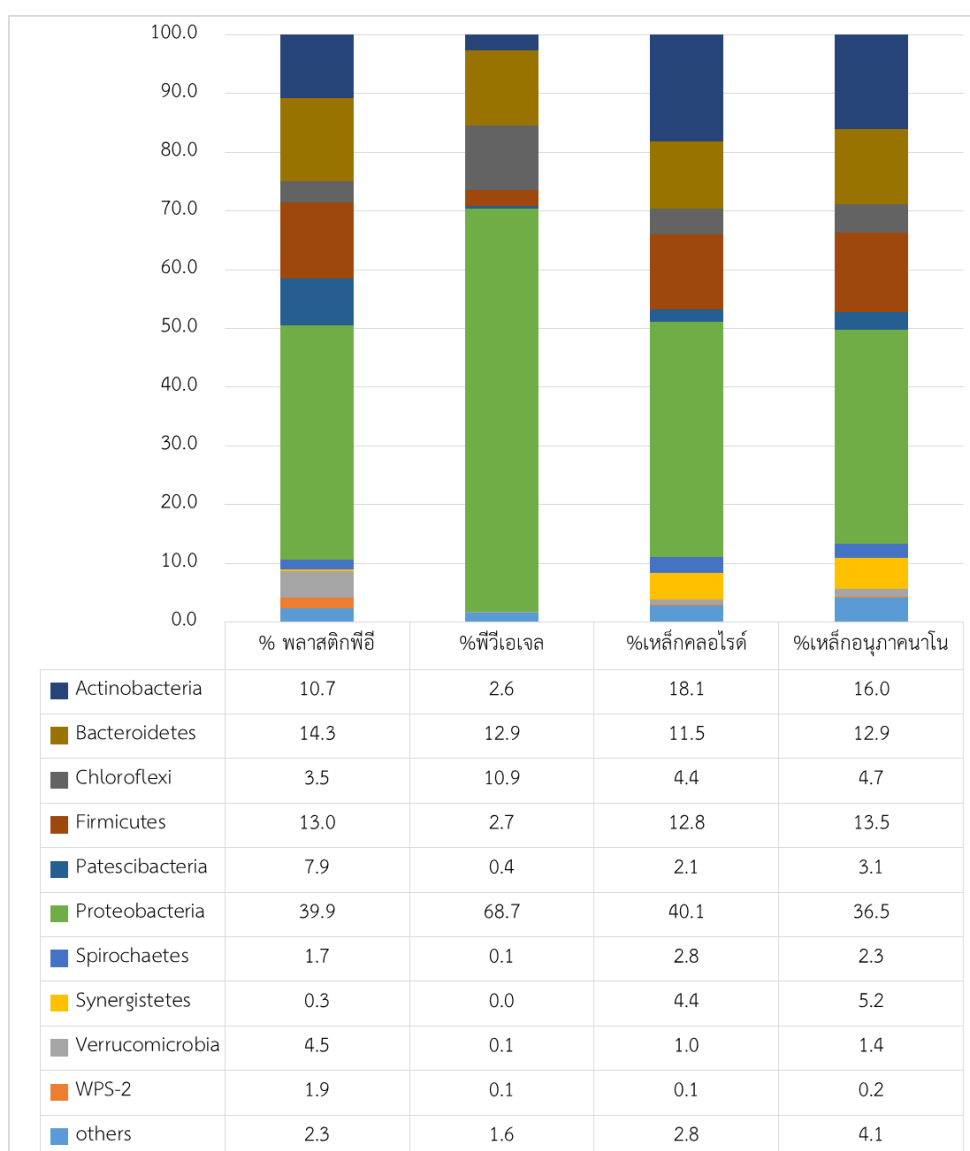
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว รูปร่างที่เปลี่ยนแปลงของไบโอฟิล์มที่เกาะบนตัวกลางพลาสติกพีอี หลังจากนำตัวกลางที่มีไบโอฟิล์มเกาะอยู่บนตัวกลาง ทำการไล่น้ำออกจากเซลล์และส่องเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางพลาสติกพีอีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM-EDS(IT-500HR)) ที่กำลังขยาย 17 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.27(ก) พบว่าเหลือเซลล์จุลินทรีย์ส่วนที่เป็นของแข็งประมาณร้อยละ 30 ดังนั้นเซลล์จุลินทรีย์จะประกอบด้วยน้ำร้อยละ 70 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำลายและเป็นตัวพาสารอาหารเข้าสู่ภายในเซลล์ (กรรณิการ์ ชูเกียรติวัฒนา, 2561) เมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเหล็กนาโนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงจุลินทรีย์และ EPS โดยพบว่าพบเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและ EPS ที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางพลาสติกพีอีของถังปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคอลลอยด์ ส่วนใหญ่มีรูปร่างและมีลักษณะเป็นเส้นใย แสดงดังรูป 4.27(ข) และเมื่อใช้เหล็กอนุภาคนาโน พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและ EPS ที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางนั้นมีลักษณะเป็นแท่ง แสดงดังรูป 4.27(ค) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han และคณะ. (2011) และเมื่อวิเคราะห์กลุ่มประชากรจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 16S Metagenomic Miseq500 Prices พบว่าอนุภาคเหล็กนาโนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากร



รูปที่ 4.27 ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) (ก) ตัวกลางพลาสติกพียูเมือใช้เหล็กหล่อโรตเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียงสังเคราะห์ กำลังขยาย 17 เท่า (ข) ตัวกลางพลาสติกพียูเมือใช้เหล็กหล่อโรตเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียงสังเคราะห์ กำลังขยาย 5,000 เท่า (ค) ตัวกลางพลาสติกพียูเมือใช้เหล็กอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียงสังเคราะห์ 5,000 เท่า

4.5 การวิเคราะห์ทางด้านชีวภาพ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี 16S Metagenomic Miseq500 Prices

ผลการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ที่สกัดจากตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกพีอี โดยใช้วิธี 16S Metagenomic Miseq500 Prices ของทั้งสองถัง ซึ่งวิเคราะห์กลุ่มไฟลัม (Phylum) พบว่าอนุภาคเหล็กนาโนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากร โดยผลการวิเคราะห์กลุ่มไฟลัม (Phylum) พบว่าไฟลัมหลักที่พบมากที่สุด คือ Proteobacteria ในถังที่ใช้เหล็กคอลลอยด์ พบร้อยละ 40.1 และในถังที่ใช้เหล็กอนุภาคนาโนพบร้อยละ 36.5



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์กลุ่มไฟลัม (Phylum) ของประชากรจุลินทรีย์ที่สกัดจากตัวกลางพีวีเอเจล และตัวกลางพลาสติกพีอี

4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นแนวทางในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการจัดการน้ำเสีย

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นการพิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางแบบพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์กับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี นอกจากนี้จะพิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินการรวมถึงพิจารณาของระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่เทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเพื่อแนวทางในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ในการจัดการน้ำเสีย

4.3.1 การศึกษาความแตกต่างต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการบรรจุตัวกลางพีวีเอเจลที่ร้อยละ 10 20 และ 30 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียขาเข้า 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ความเข้มข้นของน้ำทิ้งเฉลี่ย เท่ากับ 387.2 ± 215.73 306.2 ± 169.96 และ 350.8 ± 220.04 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ โดยต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางพีวีเอเจลมีราคา 118 บาทต่อ 1 ลิตรของตัวกลางพีวีเอเจล เมื่อพิจารณาต้นทุนในรูปแบบของความสามารถในการบำบัดซีโอดีต่อค่าใช้จ่ายของตัวกลางแล้วพบว่า ที่ปริมาณการบรรจุตัวกลางร้อยละ 10 20 และ 30 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 13.5 26.2 และ 40.0 บาทต่อความสามารถในการบำบัดซีโอดี 1 กรัมต่อลิตร

ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของตัวกลางพีวีเอเจลและตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์ ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางเท่ากัน พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียขาเข้า 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรความเข้มข้นของน้ำทิ้งเฉลี่ยเท่ากับ 679.1 ± 493.2 และ 626.4 ± 457.46 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรตามลำดับ เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.6 ± 15.40 และ 80.2 ± 14.53 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าตัวกลางทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์มีราคา 7 บาทต่อ 1 ลิตรของตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์ เมื่อพิจารณาต้นทุนในรูปแบบของความสามารถในการบำบัดซีโอดีต่อค่าใช้จ่ายของตัวกลางแล้วพบว่า ระบบที่ใช้ตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 30.6 บาทต่อความสามารถในการบำบัดซีโอดี 1 กรัมต่อลิตร และระบบที่ใช้ตัวกลางพลาสติกฟ็อกซ์มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 4.34 บาทต่อความสามารถในการ

บำบัดซีโอดี 1 กรัมต่อลิตร การเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับตัวกลางที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางที่ใช้ในการทดลองที่ 4.1

การทดลอง	ปริมาณการบรรจุ			ชนิดของตัวกลาง	
	ร้อยละ 10	ร้อยละ 20	ร้อยละ 30	ตัวกลางพีวีเอเจล	ตัวกลางพลาสติกพีอี
ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (ร้อยละ)	86.39	89.13	87.63	78.62	80.25
ต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลาง (บาทต่อ 1 กรัมซีโอดีต่อลิตร)	13.5	26.2	40.0	30.6	4.34

จากการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด ในการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าตัวกลางพีวีเอเจลมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าตัวกลางพลาสติกพีอีประมาณ 7 เท่า และจากการทดลองเกี่ยวกับปริมาณการบรรจุตัวกลางยังพบว่าที่ปริมาณการบรรจุตัวกลางน้อยยังมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า ดังนั้นแนวทางการเลือกใช้ตัวกลางเมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ต้นทุนข้างต้นมีแนวโน้มของการเลือกใช้ตัวกลางพลาสติกพีอีและลดปริมาณการบรรจุตัวกลางพลาสติกพีอีลงได้อีก แต่อาจจำเป็นต้องทำการทดลองหาปริมาณบรรจุต่ำสุดที่ยังสามารถบำบัดซีโอดีได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อไป

4.3.2 การพิจารณาด้านทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินการของระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่เทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง

ระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่เป็นระบบหนึ่งที่น่านำมาใช้ทดแทนระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งด้วยข้อดีหลายประการ ได้แก่

1. ลดหน่วยตกตะกอนของระบบ ทำให้ต้นทุนคงที่ลดลง เนื่องจากลดพื้นที่ก่อสร้างและค่าใช้จ่ายสำหรับการก่อสร้าง
2. ระบบมีขนาดเล็กกว่าระบบแบบตะกอนเร่ง ส่งผลให้ต้นทุนค่าก่อสร้างซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ (ค่าก่อสร้าง ค่าวัสดุอุปกรณ์) ลดลง

3. มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบตะกอนเร่ง และสามารถทนต่อสภาวะสารอินทรีย์สูงได้ดี ซึ่งอาจส่งผลบางส่วนต่อทั้งต้นทุนคงที่ (ค่าก่อสร้าง ค่าวัสดุอุปกรณ์) และต้นทุนการดำเนินการ (ค่าไฟฟ้าและพลังงาน ค่าสารเคมี ค่าบุคลากร ค่าบำรุงรักษา)
4. ระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่มีตะกอนแขวนลอยในระบบเกิดขึ้นน้อยจึงไม่จำเป็นต้องมีระบบจัดการสลัดจ์เหมือนระบบตะกอนเร่ง และระบบนี้ไม่มีการเวียนตะกอนซึ่งต่างจากระบบตะกอนเร่ง ดังนั้นระบบนี้จึงไม่มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์สำหรับการเวียนตะกอน และการจัดการสลัดจ์ทั้งในส่วนของต้นทุนคงที่และต้นทุนการดำเนินการ
5. ระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่สามารถดำเนินการด้วยบุคลากรที่ไม่ต้องมีความเชี่ยวชาญมากเหมือนระบบตะกอนเร่ง ซึ่งส่งผลให้ลดต้นทุนดำเนินการเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการจัดจ้างบุคลากรได้

เมื่อวิเคราะห์พิจารณาต้นทุนของระบบบำบัดน้ำเสียในงานวิจัยนี้จัดการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์รูปแบบหนึ่งด้วยการประเมินอัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์ต่อต้นทุน ซึ่งจัดเป็นรูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายและนำไปต่อยอดได้ โดยทำการวิเคราะห์ต้นทุนคงที่และต้นทุนดำเนินการของระบบทั้ง 2 ชนิดร่วมกับการพิจารณาผลประโยชน์ที่ได้รับต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากใช้ระบบส่วนแรกจะทำการวิเคราะห์ต้นทุนของระบบตะกอนเร่งเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ โดยพิจารณาเป็นค่าใช้จ่าย 2 กลุ่ม ได้แก่ ต้นทุนคงที่และต้นทุนดำเนินการ

จะเห็นว่าต้นทุนคงที่และต้นทุนดำเนินการของระบบตะกอนเร่งจะมีค่าใช้จ่ายมากกว่าระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่อยู่หลายส่วน เช่น การสูญเสียพลังงานที่ใช้ในระบบตะกอนเร่งเมื่อเทียบกับระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ (Metcalf & Eddy, 2014) เช่น

- ถังตกตะกอนของระบบตะกอนเร่งสูญเสียพลังงานในการเดินระบบอยู่ที่ 0.003 – 0.004 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย ส่วนเครื่องสูบลอยตะกอนและเครื่องสูบลอยตะกอนทิ้งสูญเสียพลังงานในการเดินระบบอยู่ที่ 0.008 – 0.013 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย
- ส่วนจัดการตะกอนสูญเสียพลังงานในการเดินระบบอยู่ที่ 0.0003 – 0.0016 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย สำหรับการทำชั้นตะกอน, 0.13 – 0.32 กิโลวัตต์

ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย สำหรับถังหมักแบบใช้อากาศ, 0.093 – 0.16
 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย สำหรับถังหมักไร้อากาศ และ 0.0005 –
 0.0013 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย สำหรับเครื่องรีดตะกอนแบบ
 สายพาน

รายละเอียดข้างต้นเป็นเพียงตัวอย่างของค่าใช้จ่ายของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่มีแนวโน้ม
 ถูกกว่าระบบตะกอนเร่ง แต่การพิจารณาด้านทุนอาจยังไม่สามารถใช้เพื่อเป็นแนวทางในการ
 ประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ในการจัดการน้ำเสีย เนื่องจากการ
 พิจารณาตามหลักการประเมินอัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์ต่อต้นทุนจำเป็นต้องพิจารณา
 ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นของระบบบำบัดน้ำเสียรูปแบบนี้ประกอบการตัดสินใจด้วยเพื่อให้เกิดความ
 สอดคล้องกับระหว่างผลประโยชน์ที่ได้รับและต้นทุนที่เสียไป

ผลประโยชน์ที่ได้รับจากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบดเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับระบบตะกอนเร่ง
 ไม่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากทั้ง 2 ระบบสามารถบำบัดน้ำเสียให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ใช้งานได้ใน
 ลักษณะเดียวกัน เช่น

- สามารถบำบัดน้ำเสียได้เอง โดยเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียส่วนรวมกรณีโรงงาน
 ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรม
- สามารถนำน้ำทิ้งจากระบบมาปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ
 ต่างๆ เช่น กระบวนการหล่อเย็น สารรองน้ำสำหรับดับเพลิง และการใช้น้ำอื่นๆที่ไม่มีสาร
 สัมผัสโดยตรงกับผู้ใช้งาน
- ลดค่าใช้จ่าย (ค่าปรับ) ในกรณีที่น้ำทิ้งไม่ผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- เพิ่มความน่าเชื่อถือของโรงงาน/บริษัทในมุมมองด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมรวมถึงการ
 พัฒนาอุตสาหกรรมให้เข้าสู่หลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน

จากการประเมินด้วยเทคนิคอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน โดยภาพรวมพบว่าระบบ
 ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่มีผลประโยชน์ไม่แตกต่างจากระบบบำบัดน้ำเสียชนิดอื่น แต่มีความแตกต่างในแง่
 ของต้นทุน ทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนดำเนินการ ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้สูงเมื่อเทียบกับระบบบำบัด

ทั่วไป จึงอาจสรุปได้ว่าระบบนี้สามารถเป็นหนึ่งในตัวเลือกเพื่อประกอบการตัดสินใจและการศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบและก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย

Goswami และ Mazumder, 2016 พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ที่ดีกว่าระบบเอเอส ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้

1. การเพิ่มตัวกลางทางชีวภาพลงไปเพิ่มในระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความเข้มข้นของมวลชีวภาพรวมและอายุตะกอน

2. การเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เกาะติดกับการเจริญเติบโตสามารถทนต่อสารพิษที่มีอยู่ในน้ำเสียได้หลายชนิด อีกทั้งยังไม่พบปริมาณการกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ อย่างมีนัยสำคัญสำหรับทั้งในระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่และระบบเอเอส สำหรับความเข้มข้นของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ เริ่มต้น (75 ± 5) มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังสังเกตได้จากการศึกษาทดลองว่าการกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ มีความผันผวนตามเวลาของระบบทั้งสอง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ เป็น 150 ± 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ จะยังคงเหมือนเดิมทั้งในระบบเอเอสและระบบชีวภาพเบดเคลื่อนที่ ซึ่งสาเหตุหลักคือการปรับตัวให้เข้ากับแบคทีเรียที่มีไนโตรเจนไม่ดีในระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของตัวกลางและการเดินระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเบดเคลื่อนที่ โดยหาปริมาณของตัวกลางและชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ที่ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (ความเข้มข้นเป้าหมาย) ของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 10 20 และ 30

- ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 86.4 ± 7.60 89.1 ± 6.12 และ 87.6 ± 7.62 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าทั้ง 3 สภาวะที่ทำการเดินระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการทดลองต่อไปคือปริมาณบรรจุร้อยละ 20

- อัตราการบำบัดซีโอดีจำเพาะของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจล ร้อยละ 20 เท่ากับ 425.9 ± 69.79 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

- ทุกสภาวะที่ทำการเดินระบบมีปริมาณโปรตีนที่ใกล้เคียงกัน ในช่วง 28.64-31.61 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์ โดยถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจลร้อยละ 20 มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดที่ 31.61 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์

- จุลินทรีย์ที่พบส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเส้นใยและเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวภายนอกของพีวีเอเจลเท่านั้น

2. การศึกษาชนิดตัวกลางที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางพลาสติกพีอีและตัวกลางพีวีเอเจล โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวของตัวกลางเท่ากัน

- ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพลาสติกพีอีสูงกว่าถังที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจล โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ ร้อยละ 80.3 ± 14.53

- ที่ความเข้มข้นซีไอดี 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพลาสติกพีอี มีปริมาณโปรตีน 28.89 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสูงกว่าถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางพีวีเอเจล

3. การศึกษาผลของอนุภาคเหล็กนาโนต่อการผลิตไบโอฟิล์ม

- ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคลอไรด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.3 ± 16.28 และประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยถึงปฏิกรณ์ที่ใช้อนุภาคเหล็กนาโนเท่ากับร้อยละ 83.0 ± 10.60

- การใช้อนุภาคเหล็กนาโนส่งผลให้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนลดน้อยลงจาก 48.70 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์ เป็น 43.27 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมจุลินทรีย์

- ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เหล็กคลอไรด์สามารถบำบัดไนโตรเจนได้เพียงร้อยละ 33.9 และเมื่อใช้อนุภาคเหล็กนาโน พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 38.5 โดยไนโตรเจนที่หายไปบางส่วนเกิดจากการที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเซลล์

4. ข้อดี และข้อจำกัดของการนำไปใช้ประโยชน์

- สามารถนำค่าปริมาณบรรจุตัวกลางและค่าอัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวตัวกลางที่ได้จากการทดลองไปใช้เป็นแนวทางในการการออกแบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ แต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากในการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งย่อยสลายได้ง่ายและเป็นสารอินทรีย์ในรูปสารละลายเท่านั้น

- ตัวกลางพีวีเอเจลเมื่อใช้เป็นระยะเวลาานาน ตัวกลางจะมีลักษณะบวมและใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณการบรรจุที่อาจส่งผลต่อปริมาตรพื้นที่ส่วนบำบัดน้ำภายในถึงปฏิกรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากกลูโคสในการเดินระบบ ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงควรลองใช้น้ำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจริงมาทดลองเดินระบบ
2. การเติมอากาศอาจต้องพิจารณาเรื่องรูปแบบการเติมอากาศให้มีการเคลื่อนที่ของตัวกลางให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีก ลดพื้นที่อับของถังปฏิกรณ์ลง
3. การทดลองควรมีชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติมตัวกลางพลาสติกกลงไปในระบบ เพื่อให้เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน
4. เวลาพักน้ำเสีย 4 ชั่วโมงไม่เพียงพอต่อการบำบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน อาจต้องศึกษาเรื่องเวลาที่เหมาะสมต่อการบำบัดที่เคเอ็นเพิ่มเติม
5. การทดลองที่ใช้ตัวกลางพีวีเอเจลอาจทำศึกษาลักษณะของตัวกลางพีวีเอเจลด้วยเทคนิควิเคราะห์อื่นๆเพิ่มขึ้น เพราะจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า จุลินทรีย์เฉพาะบริเวณภายนอกตัวกลางเท่านั้น
6. การเลือกใช้ตัวกลางพีวีเอเจลเปรียบเทียบกับตัวกลางพลาสติกฟองที่มีพื้นที่ผิวเท่ากัน อาจมีการเปลี่ยนตัวแปรต้นเป็นการควบคุมปริมาณการบรรจุหรือทดสอบกับชนิดตัวกลางอื่นๆ ร่วมด้วย รวมทั้งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ตัวกลางพีวีเอเจลที่มีการใส่เชื้อจุลินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างของตัวกลางเปรียบเทียบกับตัวกลางพีวีเอเจลที่มีการเตรียมตัวอย่างเลี้ยงเชื้อในภายหลัง
7. การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อาจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบอื่นๆ ด้วยเพื่อความน่าเชื่อถือของงานวิจัย

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก-1 การวิเคราะห์ซีโอดี ด้วยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิด

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำเสียให้เหมาะสม จากการทดลองเลือกใช้ตัวอย่างน้ำเสีย 5 มิลลิลิตร ต่อการเติมโปแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร และกรดผสมซิลเวอร์ 7 มิลลิลิตร
2. ใส่ส่วนผสมดังกล่าว ลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเหมาะสม ปิดฝาให้แน่น
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็น
4. เติมเฟอร์โรอินนิตริเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเอฟเอเอส สีของสารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนจาก เหลือง เป็น เขียว เป็น ฟ้า เป็น ฟ้าตาลแดง ซึ่งแสดง ว่าถึงจุดยุติ แล้วจดปริมาณเอฟเอเอสที่ใช้ไตเตรท

การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{((A - B) * N * 8,000)}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

- โดย A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์ (มิลลิลิตร)
 B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)
 N = ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล

ก-2 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ด้วยวิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °C

การเตรียมกระดาษกรอง

อบกระดาษกรองใยแก้ว GF/C อบในที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักในหน่วยกรัม (A)

การกรองตัวอย่าง

1. วางกระดาษกรองลงบนกรวยกรองบุชเนอร์ซึ่งต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น
2. ตวงน้ำตัวอย่างเทลงกระดาษกรอง ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวง
3. นำกระดาษกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักหลังกรอง (B)

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = \frac{(B - A) * 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดย A = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนกรอง (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองหลังกรอง (กรัม)

ก-3 ค่าพีเอช (pH)

จุ่มอิเล็กโทรดลงในตัวอย่าง อ่านค่าพีเอชที่แสดงบนหน้าจอ บันทึกค่าพีเอชที่วัดได้ เมื่อจะวัดตัวอย่างต่อไปให้ฉีดล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่นและซับเบาๆให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู รายงานค่าพีเอชและอุณหภูมิขณะวัด

ก-4 ออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen)

จุ่ม Probe ลงไปในน้ำตัวอย่าง บันทึกค่าออกซิเจนละลายที่แสดงบนหน้าจอในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ก-5 ทีเคเอ็น

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกปริมาณตัวอย่างน้ำที่ตั้งแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 เติมน้ำละลายสำหรับย่อย 50 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้ว (Glass Bead) 4-5 เม็ด นำไปย่อยจนเกิดควันสีขาว ย่อยต่อ 30 นาที จนเป็นสีเขียวอ่อนใส ปิดเครื่องทิ้งให้เย็น

2. เติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไทโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตร นำไปเข้าสู่ชุดกลั่น รองรับส่วนที่กลั่น 200 มิลลิลิตร โดยปลายท่อจุ่มลงใต้ผิวของ

สารละลาย ถ้าตัวอย่างมีปริมาณที่เคเอ็น สารละลายกรดบอริกอินดิเคตต์จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว และ
กลั่นล้างประมาณ 1-2 นาที

3. นำส่วนที่กลั่นได้ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล จุดยุติจะ
เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นม่วงอ่อน

4. จดปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ที่ใช้ ในการวิเคราะห์
Reagent Blank ใช้ปริมาณสารเคมีเท่ากันและใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง

ตารางที่ 4-1 ตารางการเลือกปริมาณตัวอย่างน้ำ

ปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

การคำนวณ

$$\text{ที่เคเอ็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 14 \times 1,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ B คือ ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต Blank (มิลลิลิตร)

A คือ ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (นอร์มัล)

ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านชีวภาพ

ข-1 ลักษณะการเกาะติดของจุลินทรีย์ ด้วยวิธีส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจุลินทรีย์สำหรับตัวกลาง

- 1.1 ตัดตัวกลางบริเวณที่ต้องการดูให้มีขนาดไม่เกิน 5 ตร.มม. และหนาไม่เกิน 3 มม.
- 1.2 แช่ตัวอย่างในน้ำยา 2.5% glutaraldehyde ใน 0.1M phosphate buffer pH 7.2 นาน 2 ชม. หรือข้ามคืนในตู้เย็น
- 1.3 ล้างน้ำยาออกด้วย phosphate buffer 2 ครั้งแล้วตามด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10-15 นาที
- 1.4 Dehydrate ด้วย ethanol ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ 30% 50% 70% 95% และ 100% ขั้นตอนละ 10 นาที โดย 100% ที่ให้ทำซ้ำ 3 ครั้ง
- 1.5 นำไปทำให้แห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง critical point dryer (Leica model EM CPD300, Austria)
- 1.6 ติดตัวอย่างบนแท่นวาง (stub) ด้วยเทปกาวสองหน้าแล้วนำไปฉาบทอง (sputter coater, Balzers model SCD 040, Germany)

- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจุลินทรีย์ในของเหลวแบบใช้กระดาษกรอง

- 1.1 กรองตัวอย่างด้วยเมมเบรนชนิด polycarbonate เลือกขนาดรูเมมเบรนให้เหมาะสมกับตัวอย่าง
- 1.2 แช่ตัวอย่างในน้ำยา 2.5% glutaraldehyde ใน 0.1M phosphate buffer pH 7.2 นาน 1 ชม. หรือข้ามคืนในตู้เย็น
- 1.3 ล้างน้ำยาออกด้วย phosphate buffer 2 ครั้งแล้วตามด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 3-5 นาที
- 1.4 Dehydrate ด้วย ethanol ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ 30% 50% 70% 95% และ 100% ขั้นตอนละ 10 นาที โดย 100% ที่ให้ทำซ้ำ 3 ครั้ง

1.5 นำไปทำให้แห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง critical point dryer (Leica model EM CPD300, Austria)

1.6 ติดตัวอย่างบนแท่นวาง (stub) ด้วยเทปกาวสองหน้าแล้วนำไปฉาบทอง (sputter coater, Balzers model SCD 040, Germany)

ข-2 การสกัด EPS

-ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

1. ล้างเรซินโดยแช่ใน PBS 20 มล. กวนสารเป็นเวลา 1 ชม. นำไปกรองแล้วล้างน้ำหนัก
2. ใส่เม็ดตัวกลางและ PBS 30 มล. ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง
3. นำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส ความเร็ว 9,000 rpm. เป็นเวลา 15 นาที
4. ดูดสารละลายส่วนใสทิ้ง ใส่ DOWEX 3 ก.ต่อ PES 20 มล.
5. นำขวดลูกผสมที่ตั้งบนเครื่องกวนสารเป็นเวลา 4 ชม. กวนที่ความเร็ว 600 rpm อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
6. เทลงหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง นำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส ความเร็ว 9,000 rpm. เป็นเวลา 15 นาที
7. กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C 0.45 μm และเก็บสารละลายที่ อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปหาปริมาณความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรต และปริมาณโปรตีน ต่อไป

ข-3 การทดสอบหาปริมาณโปรตีน (ตาม Bradford ,1976)

การเตรียมสารละลาย (Coomassie blue)

ทำการชั่ง Coomassie blue G250 100 มิลลิกรัม นำไปละลายในเอทานอลความเข้มข้น 95 % ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนจะมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

ข-4 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน BSA (Bovine serum albumin)

เตรียมสารละลาย BSA ความเข้มข้น 1 % โดยการละลาย BSA 0.25 กรัม และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 25 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลาย BSA ความเข้มข้น 0.04 % ปิเปตสารละลาย BSA ความเข้มข้น 1 % มา 1 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตร

การทำกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารตั้งตารางที่ 4-8 แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ตารางที่ 4-2 แสดงการเตรียมสารที่ใช้เพื่อทำกราฟมาตรฐานในการทดสอบหาปริมาณโปรตีน

ปริมาณโปรตีน (ไมโครกรัม)	ปริมาตร BSA ความ เข้มข้น 0.04 % (ไมโครกรัม)	ปริมาตรน้ำกลั่น (ไมโครกรัม)	ปริมาตร สารละลาย Coomassie blue G250 (มิลลิลิตร)
0	0	200	10
10	25	175	10
20	50	150	10
30	75	125	10
40	100	100	10
50	125	75	10
60	150	50	10
70	175	25	10
80	200	0	10

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในสารละลายตัวอย่าง

ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 200 ไมโครลิตร เติมนลงในหลอดทดลอง เติมนสารละลาย Coomassie blue G250 10 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร นำมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

การทดสอบหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ตาม Dubois และคณะ ,1956)

วิธีการของกรดฟินอล - ซัลเฟอร์ เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดโดยการวัดความเข้มสีเพื่อหาความเข้มข้นคาร์โบไฮเดรตในสารละลายในน้ำ หลักการพื้นฐานคือเมื่อคาร์โบไฮเดรต ถูกทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถัน จะเกิดการผลิตอนุพันธ์ furfural เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อไประหว่างอนุพันธ์ furfural กับฟินอลจะทำให้เกิดสีที่ตรวจพบได้

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสารละลายตัวอย่าง

ผสมสารละลายคาร์โบไฮเดรต 2 มิลลิตรกับสารละลายฟินอล 5% 1 มิลลิตร หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิตร และปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 นาทีนำไปเข้าเครื่องเขย่าสารละลาย (vortex) 30 วินาที จากนั้นนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง 20 นาที เพื่อทำให้เกิดสี วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร



ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค-1 ค่าซีไอดีในช่วงการทดลองที่ 1.1 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีไอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	น้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง		
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีไอดี/ล.					
3 -ส.ค. 62	1		60.00	10.00	10.00
5 ส.ค. 62	3		45.00	30.00	30.00
7 ส.ค. 62	5		60.00	45.00	30.00
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีไอดี/ล.					
9 ส.ค. 62	7		42.39	28.26	28.26
11 ส.ค. 62	9		88.00	52.00	64.00
13 ส.ค. 62	11		64.0	44.0	48.0
น้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มก.ซีไอดี/ล.					
15 ส.ค. 62	13		44.00	40.00	76.00
17 ส.ค. 62	15				
19 ส.ค. 62	17		263.61	51.15	51.15
21 ส.ค. 62	19		402.58	123.87	147.10
23 ส.ค. 62	21				
25 ส.ค. 62	23		436.67	162.67	146.67
27 ส.ค. 62	25		73.50	81.60	93.47
29 ส.ค. 62	27		186.67	125.33	106.67
31 ส.ค. 62	29		270.00	176.00	82.67
2 -ก.ย.- 62	31		73.33	74.67	78.67
4 -ก.ย.- 62	33		59.02	141.64	165.25

วัน/เดือน/ปี	วันที่ใน การ ทดลอง	น้ำเสีย สังเคราะห์ฯ เข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง		
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
6 -ก.ย.- 62	35		186.89	89.18	73.44
8 -ก.ย.- 62	37		133.3	114.7	94.7
น้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มก.ซีไอดี/ล.					
10 -ก.ย.- 62	39	3093.33	470.00	88.00	118.67
12 -ก.ย.- 62	41	2683.87	132.26	105.81	138.06
14 -ก.ย.- 62	43	2544.26	231.15	318.69	129.84
16 -ก.ย.- 62	45	3698.36	444.26	228.2	110.16
18 -ก.ย.- 62	47	2890.32	200.00	299.35	170.32
20 -ก.ย.- 62	49	2909.09	242.44	126.95	134.89
22 -ก.ย.- 62	51	2697.7	335.01	208.94	496.03
24 -ก.ย.- 62	53	2478.06	230.17	203.28	211.35
26 -ก.ย.- 62	55	2684.57	658.24	90.35	567.89
28 -ก.ย.- 62	57	2764.98	326.4	569.6	409.6
30 -ก.ย.- 62	59	2816.18	1036.07	695.08	944.26
2 -ต.ค.- 62	61	2911.48	78.69	91.8	354.1
6 -ต.ค.- 62	65	3729.18	661.2	495.9	476.07
8 -ต.ค.- 62	67	2045.9	459.02	367.21	271.45
10 -ต.ค.- 62	69	2856.39	456.23	436.39	376.89
12 -ต.ค.- 62	71	3226.67	357.05	310.77	310.77
14 -ต.ค.- 62	73	3015.08	469.45	476.07	667.81
16 -ต.ค.- 62	75	2518.08	340.98	314.75	281.97
18 -ต.ค.- 62	77	3095.08	327.87	340.98	583.61
20 -ต.ค.- 62	79	2570.49	288.52	357.38	262.3

ตารางที่ ค-2 ค่าพีเอชในช่วงการทดลองที่ 1.1 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีโอดี/ล.				
2-ส.ค.-62	0	7.25	7.20	7.20
3-ส.ค.-62	1	8.08	8.18	8.21
4-ส.ค.-62	2	8.17	8.20	8.19
5-ส.ค.-62	3	7.94	7.95	8.07
6-ส.ค.-62	4	8.06	8.00	7.91
7-ส.ค.-62	5	7.74	8.02	7.91
8-ส.ค.-62	6	7.89	7.91	7.84
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.				
9-ส.ค.-62	7	7.75	7.85	8.07
10-ส.ค.-62	8	7.84	7.98	8.03
11-ส.ค.-62	9	7.94	8.01	8.11
12-ส.ค.-62	10	8.12	8.09	8.26
13-ส.ค.-62	11	7.43	7.83	7.77
14-ส.ค.-62	12	7.87	8.02	7.93
น้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.				
15-ส.ค.-62	13	8.20	8.07	8.05
16-ส.ค.-62	14	8.10	7.80	7.77
17-ส.ค.-62	15	7.76	7.99	7.87
18-ส.ค.-62	16	7.76	7.81	7.74

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
19-ส.ค.-62	17	7.95	7.98	8.02
20-ส.ค.-62	18			
21-ส.ค.-62	19	8.12	7.87	8.03
22-ส.ค.-62	20	7.86	7.98	8.11
23-ส.ค.-62	21			
24-ส.ค.-62	22			
25-ส.ค.-62	23	8.08	8.17	8.21
26-ส.ค.-62	24			
27-ส.ค.-62	25	8.02	7.90	8.41
28-ส.ค.-62	26	8.14	7.95	8.01
29-ส.ค.-62	27	7.88	7.77	7.74
30-ส.ค.-62	28	8.00	7.97	7.82
31-ส.ค.-62	29	7.78	7.75	7.63
1-ก.ย.-62	30	7.82	7.75	7.88
2-ก.ย.-62	31	7.98	7.65	7.65
3-ก.ย.-62	32	7.97	7.76	7.71
4-ก.ย.-62	33	8.06	7.89	7.90
5-ก.ย.-62	34	7.68	7.88	7.70
6-ก.ย.-62	35	7.63	7.46	7.78
7-ก.ย.-62	36	7.81	7.73	7.75
8-ก.ย.-62	37	7.71	7.85	7.77
9-ก.ย.-62	38	7.79	7.76	7.85

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
น้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.				
10-ก.ย.-62	39	7.98	8.02	8.12
11-ก.ย.-62	40	7.92	7.91	7.94
12-ก.ย.-62	41	8.00	7.87	7.89
13-ก.ย.-62	42	8.18	8.27	8.25
14-ก.ย.-62	43	8.26	8.30	7.90
15-ก.ย.-62	44	8.01	8.18	8.00
16-ก.ย.-62	45	8.34	8.38	8.53
17-ก.ย.-62	46	8.52	8.40	8.41
18-ก.ย.-62	47	8.17	8.27	8.42
19-ก.ย.-62	48	8.23	8.40	8.47
20-ก.ย.-62	49	8.00	8.09	8.21
21-ก.ย.-62	50	8.47	8.56	8.63
22-ก.ย.-62	51			
23-ก.ย.-62	52	8.27	8.13	8.21
24-ก.ย.-62	53	8.30	8.15	8.40
25-ก.ย.-62	54	7.94	8.07	7.96
26-ก.ย.-62	55	7.96	7.92	7.96
27-ก.ย.-62	56	8.13	8.00	8.06
28-ก.ย.-62	57	7.92	7.98	7.97
29-ก.ย.-62	58	7.84	7.92	7.71
30-ก.ย.-62	59	7.37	7.72	7.26

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
1-ต.ค.-62	60	7.91	7.97	7.86
3-ต.ค.-62	62	8.14	8.23	8.06
4-ต.ค.-62	63	7.85	8.04	7.68
5-ต.ค.-62	64			
6-ต.ค.-62	65	8.22	8.24	8.11
7-ต.ค.-62	66	7.67	7.86	7.79
8-ต.ค.-62	67			
9-ต.ค.-62	68	7.56	7.78	7.62
10-ต.ค.-62	69	7.76	7.86	7.82
11-ต.ค.-62	70			
12-ต.ค.-62	71	8.13	8.13	8.20
13-ต.ค.-62	72	7.82	7.94	7.90
14-ต.ค.-62	73	8.01	8.05	7.93
15-ต.ค.-62	74	8.19	8.06	8.25
16-ต.ค.-62	75	8.25	8.15	8.20
17-ต.ค.-62	76	7.93	7.92	8.35
18-ต.ค.-62	77	7.98	7.96	7.97
19-ต.ค.-62	78	8.04	8.09	8.03
20-ต.ค.-62	79	8.13	8.19	8.15

ตารางที่ ค-3 ค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงการทดลองที่ 1.1 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีโอดี/ล.				
3-ส.ค.-62	1	7.69	7.66	7.41
4-ส.ค.-62	2	7.22	7.30	7.88
5-ส.ค.-62	3	7.23	7.37	7.10
6-ส.ค.-62	4	6.65	7.14	7.12
7-ส.ค.-62	5	6.93	7.20	7.82
8-ส.ค.-62	6	6.41	7.28	7.33
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.				
9-ส.ค.-62	7			
10-ส.ค.-62	8	6.94	6.35	6.19
11-ส.ค.-62	9	6.72	6.44	6.29
12-ส.ค.-62	10	6.35	6.43	6.72
13-ส.ค.-62	11	5.56	6.38	6.40
14-ส.ค.-62	12	6.49	7.21	7.48
น้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.				
15-ส.ค.-62	13	6.92	6.58	6.85
16-ส.ค.-62	14	4.31	5.28	4.58
17-ส.ค.-62	15	4.58	4.79	3.29
18-ส.ค.-62	16	4.11	6.75	6.35
20-ส.ค.-62	18	5.93	5.68	6.11

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เมล็ดพื้เอเจล ร้อยละ 10	เมล็ดพื้เอเจล ร้อยละ 20	เมล็ดพื้เอเจล ร้อยละ 30
21-ส.ค.-62	19	5.53	6.43	4.66
22-ส.ค.-62	20	6.69	6.40	6.04
23-ส.ค.-62	21			
24-ส.ค.-62	22			
25-ส.ค.-62	23	5.33	3.25	3.25
26-ส.ค.-62	24			
27-ส.ค.-62	25	5.34	5.06	5.69
28-ส.ค.-62	26	6.69	5.77	5.42
29-ส.ค.-62	27	5.66	4.47	4.17
30-ส.ค.-62	28	5.06	4.80	3.78
31-ส.ค.-62	29	6.87	6.80	5.21
1-ก.ย.-62	30	6.28	5.28	3.69
2-ก.ย.-62	31	7.00	4.32	3.64
3-ก.ย.-62	32	5.42	3.32	3.15
4-ก.ย.-62	33	6.27	3.30	3.23
5-ก.ย.-62	34	6.04	5.07	4.10
6-ก.ย.-62	35	5.37	3.04	4.45
7-ก.ย.-62	36	6.37	3.58	5.02
8-ก.ย.-62	37	7.90	6.49	3.94
9-ก.ย.-62	38			

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
น้ำเสียดังเคราะห์ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.				
10-ก.ย.-62	39			
11-ก.ย.-62	40	7.92	2.46	2.97
12-ก.ย.-62	41	5.00	4.32	4.15
13-ก.ย.-62	42	5.57	4.81	3.44
14-ก.ย.-62	43	7.82	5.04	5.11
15-ก.ย.-62	44	4.77	5.04	5.12
16-ก.ย.-62	45	6.30	4.65	5.89
17-ก.ย.-62	46	6.70	5.96	5.51
18-ก.ย.-62	47	5.10	4.80	5.73
19-ก.ย.-62	48	4.80	4.62	6.74
20-ก.ย.-62	49	5.48	5.81	5.62
21-ก.ย.-62	50	6.46	6.81	4.62
22-ก.ย.-62	51	6.64	6.29	7.97
23-ก.ย.-62	52			
24-ก.ย.-62	53	7.05	7.19	6.10
25-ก.ย.-62	54	5.73	5.17	5.76
26-ก.ย.-62	55	5.60	4.95	5.13
27-ก.ย.-62	56	5.74	6.46	5.10
28-ก.ย.-62	57	5.66	5.08	4.82
29-ก.ย.-62	58	4.62	4.47	3.37
30-ก.ย.-62	59	5.85	5.29	4.35
1-ต.ค.-62	60			

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง		
		เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 10	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 30
3-ต.ค.-62	62			
4-ต.ค.-62	63			
5-ต.ค.-62	64			
6-ต.ค.-62	65			
7-ต.ค.-62	66			
8-ต.ค.-62	67			
9-ต.ค.-62	68			
10-ต.ค.-62	69			
11-ต.ค.-62	70			
12-ต.ค.-62	71			
13-ต.ค.-62	72			
14-ต.ค.-62	73			
15-ต.ค.-62	74			
16-ต.ค.-62	75			
17-ต.ค.-62	76	6.00	5.40	5.80
18-ต.ค.-62	77	5.60	5.20	5.10
19-ต.ค.-62	78	4.80	5.20	4.80
20-ต.ค.-62	79	5.30	5.30	5.00

ตารางที่ ค-4 ค่าซีไอดีในช่วงการทดลองที่ 1.2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีไอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	น้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง	
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	พลาสติกพีอี ร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีไอดี/ล.				
23 -ต.ค.- 62	1	498.36	26.26	20.98
25 -ต.ค.- 62	3	506.23	55.08	39.34
27 -ต.ค.- 62	5	537.70	70.82	39.34
29 -ต.ค.- 62	7	496.67	355.58	40.96
31 -ต.ค.- 62	9	501.79	140.81	43.52
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีไอดี/ล.				
2 -พ.ย.- 62	11	985.66	526.82	208.14
4 -พ.ย.- 62	13	985.66	481.33	140.81
6 -พ.ย.- 62	15	1040.72	461.82	125.75
8 -พ.ย.- 62	17	948.89	384.52	142.64
10 -พ.ย.- 62	19	884.61	96.13	74.42
12 -พ.ย.- 62	21	1054.33	372.12	210.87
14 -พ.ย.- 62	23	1001.69	516.02	459.65
16 -พ.ย.- 62	25	1014.70	346.91	372.92
18 -พ.ย.- 62	27	936.65	160.44	151.77
20 -พ.ย.- 62	29	1079.75	99.74	147.44

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	น้ำเสีย สังเคราะห์ฯ เข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง	
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	พลาสติกพีอี ร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.				
22 -พ.ย.- 62	31	1951.35	568.06	693.81
24 -พ.ย.- 62	33	2080	1120.00	1040.00
26 -พ.ย.- 62	35	1866.67	826.67	760.00
28 -พ.ย.- 62	37	2213.33	600.00	600.00
30 -พ.ย.- 62	39	2133.33	546.67	493.33
2 -ธ.ค.-62	41	1832.26	193.55	219.35
4 -ธ.ค.-62	43	1864.68	806.35	768.55
6 -ธ.ค.-62	45	1763.89	1057.92	965.36
8 -ธ.ค.-62	47	1839.48	1044.70	1071.15
10 -ธ.ค.-62	49	1789.09	1071.15	1084.37
12 -ธ.ค.-62	51	1987.61	1058.34	1174.50
14 -ธ.ค.-62	53	1910.17	1084.15	980.90
16 -ธ.ค.-62	55	2065.05	651.78	864.74
18 -ธ.ค.-62	57	2039.24	1135.48	1083.87
20 -ธ.ค.-62	59	2107.46	1066.74	1105.76
22 -ธ.ค.-62	61	1925.33	917.13	1053.73
24 -ธ.ค.-62	63	1873.29	1274.88	1522.25

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	น้ำเสียสังเคราะห์ ขาเข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง	
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	พลาสติกพีอี ร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.				
25 -ธ.ค.-62	64	3356.32	1574.09	676.47
27 -ธ.ค.-62	66	3148.39	1341.94	1264.52
29 -ธ.ค.-62	68	3354.84	1729.03	1083.87
31 -ธ.ค.-62	70	3096.77	2184.13	2488.89
2 -ม.ค.- 63	72	2993.55	507.94	507.94
4 -ม.ค.- 63	74	2724.15	253.97	660.32
6 -ม.ค.- 63	76	2996.83	507.94	304.76
8 -ม.ค.- 63	78	3251.61	370.27	423.17
10 -ม.ค.- 63	80	3067.98	846.34	264.48
12 -ม.ค.- 63	82	3045.16	412.90	464.52
14 -ม.ค.- 63	84	3096.17	825.81	567.74
16 -ม.ค.- 63	86	3064.41	433.90	461.02
18 -ม.ค.- 63	88	3018.09	364.25	312.22
20 -ม.ค.- 63	90	3070.12	312.22	312.22
22 -ม.ค.- 63	92	3045.16	464.54	567.74
24 -ม.ค.- 63	94	3148.39	412.90	490.32
26 -ม.ค.- 63	96	3122.16	260.18	260.18
28 -ม.ค.- 63	98	3304.28	299.21	357.75
30 -ม.ค.- 63	100	3200.21	572.40	624.43
1 -ก.พ.- 63	102	3382.34	312.22	546.38
3 -ก.พ.- 63	104	3590.48	312.22	416.29

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	น้ำเสียสังเคราะห์ ขาเข้า	น้ำทิ้งชุดการทดลอง	
			เม็ดพีวีเอเจล ร้อยละ 20	พลาสติกพีอี ร้อยละ 50
5 -ก.พ.- 63	106	3093.33	373.33	533.33
7 -ก.พ.- 63	108	3067.98	317.38	317.38
9 -ก.พ.- 63	110	3173.77	1639.78	1481.09
11 -ก.พ.- 63	112	3304.28	910.63	1496.03
13 -ก.พ.- 63	114	3094.43	317.38	412.59
15 -ก.พ.- 63	116	3173.77	206.30	245.97
17 -ก.พ.- 63	118	3173.77	595.08	420.52
19 -ก.พ.- 63	120	3279.56	1040.72	539.54
21 -ก.พ.- 63	122	3070.12	1060.23	728.50
23 -ก.พ.- 63	124	3147.54	1206.56	996.72
25 -ก.พ.- 63	126	3042.62	681.97	104.92
27 -ก.พ.- 63	128	3694.55	512.55	465.78
29 -ก.พ.- 63	130	3278.28	327.83	848.19
6 -มี.ค.- 63	136	3226.67	698.23	565.99
8 -มี.ค.- 63	138	3330.3	262.78	338.28

ตารางที่ ค-4 ค่าพีเอชในช่วงการทดลองที่ 1.2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีโอดี/ล.			
22 -ต.ค.- 62	0		
23 -ต.ค.- 62	1	7.90	8.01
24 -ต.ค.- 62	2		
25 -ต.ค.- 62	3		
26 -ต.ค.- 62	4		
27 -ต.ค.- 62	5	8.03	8.00
28 -ต.ค.- 62	6	7.82	7.88
29 -ต.ค.- 62	7	7.97	7.88
30 -ต.ค.- 62	8	7.84	7.79
31 -ต.ค.- 62	9	7.84	7.88
1 -พ.ย.- 62	10	6.95	8.03
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.			
2 -พ.ย.- 62	11	6.32	8.04
3 -พ.ย.- 62	12	7.44	8.12
4 -พ.ย.- 62	13	8.05	8.12
5 -พ.ย.- 62	14	8.15	8.14
6 -พ.ย.- 62	15	7.48	8.27
7 -พ.ย.- 62	16	8.07	7.97
8 -พ.ย.- 62	17		
9 -พ.ย.- 62	18		

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีอีร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
10 -พ.ย.- 62	19		
11 -พ.ย.- 62	20		
12 -พ.ย.- 62	21	7.74	7.84
13 -พ.ย.- 62	22	8.40	8.30
14 -พ.ย.- 62	23	8.04	8.17
15 -พ.ย.- 62	24	7.83	7.75
16 -พ.ย.- 62	25	8.09	8.13
17 -พ.ย.- 62	26	8.20	8.13
18 -พ.ย.- 62	27	8.07	8.16
19 -พ.ย.- 62	28		
20 -พ.ย.- 62	29		
21 -พ.ย.- 62	30	7.86	7.82
น้ำเสียดังเคราะห์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.			
22 -พ.ย.- 62	31	8.11	8.13
23 -พ.ย.- 62	32	7.68	7.54
24 -พ.ย.- 62	33	7.19	7.42
25 -พ.ย.- 62	34	7.98	8.04
26 -พ.ย.- 62	35	7.81	7.98
27 -พ.ย.- 62	36	7.99	8.01
28 -พ.ย.- 62	37	7.97	8.03
29 -พ.ย.- 62	38	7.98	8.00
30 -พ.ย.- 62	39		
1 -ธ.ค.- 62	40		
2 -ธ.ค.- 62	41		

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีอีร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
3 -ธ.ค.- 62	42	7.75	8.02
4 -ธ.ค.- 62	43	7.86	7.99
5 -ธ.ค.- 62	44		
6 -ธ.ค.- 62	45		
7 -ธ.ค.- 62	46		
8 -ธ.ค.- 62	47	7.60	7.97
9 -ธ.ค.- 62	48	7.63	7.70
10 -ธ.ค.- 62	49		
11 -ธ.ค.- 62	50		
12 -ธ.ค.- 62	51		
13 -ธ.ค.- 62	52		
14 -ธ.ค.- 62	53		
15 -ธ.ค.- 62	54		
16 -ธ.ค.- 62	55		
17 -ธ.ค.- 62	56		
18 -ธ.ค.- 62	57		
19 -ธ.ค.- 62	58		
20 -ธ.ค.- 62	59		
21 -ธ.ค.- 62	60		
22 -ธ.ค.- 62	61		
23 -ธ.ค.- 62	62		
24 -ธ.ค.- 62	63	8.61	8.60

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีอีร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.			
25 -ธ.ค.- 62	64	8.57	8.63
26 -ธ.ค.- 62	65	8.59	8.72
27 -ธ.ค.- 62	66	8.23	8.16
28 -ธ.ค.- 62	67	8.11	7.95
29 -ธ.ค.- 62	68	8.05	7.95
30 -ธ.ค.- 62	69	8.11	8.15
31 -ธ.ค.- 62	70	8.05	8.17
1 -ม.ค.- 63	71	7.93	8.27
2 -ม.ค.- 63	72	8.22	8.17
3 -ม.ค.- 63	73	7.95	8.08
4 -ม.ค.- 63	74	8.26	8.44
5 -ม.ค.- 63	75	8.30	8.41
6 -ม.ค.- 63	76	8.04	7.84
7 -ม.ค.- 63	77	8.30	8.29
8 -ม.ค.- 63	78	8.23	8.18
9 -ม.ค.- 63	79	8.13	8.21
10 -ม.ค.- 63	80	8.18	8.39
11 -ม.ค.- 63	81	8.12	5.78
12 -ม.ค.- 63	82	8.00	8.13
13 -ม.ค.- 63	83	8.01	8.14
14 -ม.ค.- 63	84	8.05	8.18
15 -ม.ค.- 63	85	8.05	7.98
16 -ม.ค.- 63	86	7.92	7.96

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีอีร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
17 -ม.ค.- 63	87	7.78	7.80
18 -ม.ค.- 63	88	8.16	8.24
19 -ม.ค.- 63	89	8.06	8.11
20 -ม.ค.- 63	90	7.71	7.78
21 -ม.ค.- 63	91	7.99	7.6
22 -ม.ค.- 63	92	8.03	7.87
23 -ม.ค.- 63	93	8.03	7.87
24 -ม.ค.- 63	94	8.07	7.88
25 -ม.ค.- 63	95	7.96	8.02
26 -ม.ค.- 63	96	7.95	7.85
27 -ม.ค.- 63	97		
28 -ม.ค.- 63	98		
29 -ม.ค.- 63	99		
30 -ม.ค.- 63	100	8.23	8.28
1 -ก.พ.- 63	101	7.72	7.89
2 -ก.พ.- 63	102	7.79	7.87
3 -ก.พ.- 63	103	7.79	7.9
4 -ก.พ.- 63	104	7.92	7.87
5 -ก.พ.- 63	105	7.92	7.95
6 -ก.พ.- 63	106	7.81	7.96
7 -ก.พ.- 63	107	7.8	7.87
8 -ก.พ.- 63	108	7.83	7.89
9 -ก.พ.- 63	109	7.86	7.88
10 -ก.พ.- 63	110	7.91	7.94

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีอีร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
11 -ก.พ.- 63	111	8	8.07
12 -ก.พ.- 63	112	7.97	7.94
13 -ก.พ.- 63	113	8.11	8.45
14 -ก.พ.- 63	114	7.81	7.94
15 -ก.พ.- 63	115	7.98	7.56
16 -ก.พ.- 63	116	7.84	7.81
17 -ก.พ.- 63	117	7.94	8.08
18 -ก.พ.- 63	118	8.05	8.02
19 -ก.พ.- 63	119	8.00	8.04
20 -ก.พ.- 63	120		
21 -ก.พ.- 63	121	7.58	7.66
22 -ก.พ.- 63	122	7.51	7.51
23 -ก.พ.- 63	123	7.49	7.50
24 -ก.พ.- 63	124	7.84	7.87
25 -ก.พ.- 63	125	7.99	8.05
26 -ก.พ.- 63	126	7.77	7.80
27 -ก.พ.- 63	127		
28 -ก.พ.- 63	128	7.77	7.35
29 -ก.พ.- 63	129	8.10	8.03
1 -มี.ค.- 63	130		
2 -มี.ค.- 63	131	7.86	7.84
3 -มี.ค.- 63	132	7.89	7.94
4 -มี.ค.- 63	133	7.89	7.91
5 -มี.ค.- 63	134	7.78	7.81

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
6 -มี.ค.- 63	135	8.09	8.16
7 -มี.ค.- 63	136		
8 -มี.ค.- 63	137	7.79	7.89

ตารางที่ ค-4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงการทดลองที่ 1.2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 500 1,000 2,000 และ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 500 มก.ซีโอดี/ล.			
22 -ต.ค.- 62	0		
23 -ต.ค.- 62	1	5.60	5.50
24 -ต.ค.- 62	2		
25 -ต.ค.- 62	3		
26 -ต.ค.- 62	4		
27 -ต.ค.- 62	5	5.50	5.70
28 -ต.ค.- 62	6		
29 -ต.ค.- 62	7		
30 -ต.ค.- 62	8	5.80	6.40
31 -ต.ค.- 62	9	5.10	5.20
1 -พ.ย.- 62	10	5.50	5.80

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.			
2 -พ.ย.- 62	11	5.60	5.30
3 -พ.ย.- 62	12	4.8	4.8
4 -พ.ย.- 62	13	4.9	5.3
5 -พ.ย.- 62	14	5.2	5.1
6 -พ.ย.- 62	15	4.8	4.9
7 -พ.ย.- 62	16	4.9	5.2
8 -พ.ย.- 62	17		
9 -พ.ย.- 62	18		
10 -พ.ย.- 62	19		
11 -พ.ย.- 62	20		
12 -พ.ย.- 62	21	4.50	5.40
13 -พ.ย.- 62	22	4.80	4.90
14 -พ.ย.- 62	23		
15 -พ.ย.- 62	24		
16 -พ.ย.- 62	25		
17 -พ.ย.- 62	26	5.10	5.40
18 -พ.ย.- 62	27		
19 -พ.ย.- 62	28		
20 -พ.ย.- 62	29		
21 -พ.ย.- 62	30	4.70	3.78

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
น้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล.			
22 -พ.ย.- 62	31	4.34	4.01
23 -พ.ย.- 62	32	4.28	4.14
24 -พ.ย.- 62	33	4.52	5.33
25 -พ.ย.- 62	34	4.19	
26 -พ.ย.- 62	35	5.01	
27 -พ.ย.- 62	36	4.66	
28 -พ.ย.- 62	37		
29 -พ.ย.- 62	38		
30 -พ.ย.- 62	39		
1 -ธ.ค.- 62	40		
2 -ธ.ค.- 62	41		
3 -ธ.ค.- 62	42		
4 -ธ.ค.- 62	43		
5 -ธ.ค.- 62	44		
6 -ธ.ค.- 62	45		
7 -ธ.ค.- 62	46		
8 -ธ.ค.- 62	47		
9 -ธ.ค.- 62	48		
10 -ธ.ค.- 62	49		
11 -ธ.ค.- 62	50		
12 -ธ.ค.- 62	51		
13 -ธ.ค.- 62	52		
14 -ธ.ค.- 62	53		

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
15 -ธ.ค.- 62	54		
16 -ธ.ค.- 62	55		
17 -ธ.ค.- 62	56		
18 -ธ.ค.- 62	57		
19 -ธ.ค.- 62	58		
20 -ธ.ค.- 62	59		
21 -ธ.ค.- 62	60		
22 -ธ.ค.- 62	61		
23 -ธ.ค.- 62	62		
24 -ธ.ค.- 62	63		
น้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มก.ซีโอดี/ล.			
25 -ธ.ค.- 62	64		
26 -ธ.ค.- 62	65		
27 -ธ.ค.- 62	66		
28 -ธ.ค.- 62	67		
29 -ธ.ค.- 62	68		
30 -ธ.ค.- 62	69		
31 -ธ.ค.- 62	70	6.35	6.40
1 -ม.ค.- 63	71	6.50	6.24
2 -ม.ค.- 63	72	6.50	6.30
3 -ม.ค.- 63	73		
4 -ม.ค.- 63	74		
5 -ม.ค.- 63	75	4.98	5.91
6 -ม.ค.- 63	76	5.04	5.60

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
7 -ม.ค.- 63	77	4.04	5.81
8 -ม.ค.- 63	78		
9 -ม.ค.- 63	79		
10 -ม.ค.- 63	80		
11 -ม.ค.- 63	81		
12 -ม.ค.- 63	82		
13 -ม.ค.- 63	83		
14 -ม.ค.- 63	84		
15 -ม.ค.- 63	85		
16 -ม.ค.- 63	86		
17 -ม.ค.- 63	87		
18 -ม.ค.- 63	88		
19 -ม.ค.- 63	89		
20 -ม.ค.- 63	90		
21 -ม.ค.- 63	91		
22 -ม.ค.- 63	92		
23 -ม.ค.- 63	93	4.86	4.46
24 -ม.ค.- 63	94	4.93	4.46
25 -ม.ค.- 63	95	4.30	4.68
26 -ม.ค.- 63	96	4.44	4.89
27 -ม.ค.- 63	97	3.00	3.76
28 -ม.ค.- 63	98	4.99	3.85
29 -ม.ค.- 63	99	4.58	4.03
30 -ม.ค.- 63	100	4.63	3.65

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
1 -ก.พ.- 63	101	2.57	3.36
2 -ก.พ.- 63	102	3.31	3.51
3 -ก.พ.- 63	103	3.08	3.6
4 -ก.พ.- 63	104	2.92	2.58
5 -ก.พ.- 63	105	3.51	2.62
6 -ก.พ.- 63	106	3.52	3.23
7 -ก.พ.- 63	107	3.26	3.48
8 -ก.พ.- 63	108	3.23	3.51
9 -ก.พ.- 63	109	2.82	3.27
10 -ก.พ.- 63	110	3.91	4.28
11 -ก.พ.- 63	111	3.8	4.34
12 -ก.พ.- 63	112	3.77	4.6
13 -ก.พ.- 63	113	3.15	5.57
14 -ก.พ.- 63	114	2.74	5.9
15 -ก.พ.- 63	115	3.54	5.88
16 -ก.พ.- 63	116	3.78	5.57
17 -ก.พ.- 63	117	3.21	5.55
18 -ก.พ.- 63	118	4.28	5.58
19 -ก.พ.- 63	119	4.31	5.53
20 -ก.พ.- 63	120	4.42	4.61
21 -ก.พ.- 63	121	4.5	4.44
22 -ก.พ.- 63	122	4.12	4.52
23 -ก.พ.- 63	123	3.32	4.477
24 -ก.พ.- 63	124	3.13	4.36

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	ชุดการทดลอง	
		พีวีเอร้อยละ 20	พีอีร้อยละ 50
25 -ก.พ.- 63	125	2.83	4.27
26 -ก.พ.- 63	126	2.92	4.13
27 -ก.พ.- 63	127	2.89	4.19
28 -ก.พ.- 63	128	2.97	3.98
29 -ก.พ.- 63	129	2.78	3.92
1 -มี.ค.- 63	130	3.38	4.11
2 -มี.ค.- 63	131	2.54	4.52
3 -มี.ค.- 63	132	3.17	3.62
4 -มี.ค.- 63	133	3.22	4.45
5 -มี.ค.- 63	134	3.1	4.42
6 -มี.ค.- 63	135	3.04	4.4
7 -มี.ค.- 63	136	3.12	4.28
8 -มี.ค.- 63	137	2.77	2.8

ตารางที่ ค-4 ปริมาณซีโอดีในช่วงการทดลองที่ 2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้า 3,000 มก.ซีโอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	การทดลอง			
		น้ำเสียเข้า R1	น้ำทิ้ง R1	น้ำเสียเข้า R2	น้ำทิ้ง R2
15 -พ.ค.-63	1	2478.06	309.76	2478.06	387.2
16 -พ.ค.-63	2	2168.31	232.32	2168.31	232.32
17 -พ.ค.-63	3				
18 -พ.ค.-63	4				
19 -พ.ค.-63	5	2129.59	154.88	2129.59	154.88
20 -พ.ค.-63	6	2323.19	1626.23	2323.19	1316.47
21 -พ.ค.-63	7				
22 -พ.ค.-63	8	2478.06	193.6	2478.06	77.44
23 -พ.ค.-63	9				
24 -พ.ค.-63	10	2478.06	232.06	2478.06	580.8
25 -พ.ค.-63	11				
26 -พ.ค.-63	12				
27 -พ.ค.-63	13	3050.85	338.98	2847.46	338.98
28 -พ.ค.-63	14	2983.05	440.68	3050.85	542.37
29 -พ.ค.-63	15	2856.39	449.62	2935.74	819.87
30 -พ.ค.-63	16	1983.61	211.58	1930.71	264.48
31 -พ.ค.-63	17	3041.56	449.62	2935.74	211.58
1 -มิ.ย.-63	18	2803.5	283.03	2882.84	476.07
2 -มิ.ย.-63	19	2692.74	203.23	2641.94	431.85
3 -มิ.ย.-63	20	2794.35	127.02	2692.74	355.65
4 -มิ.ย.-63	21	2794.35	127.02	2692.74	355.65
5 -มิ.ย.-63	22	2809.94	208.14	2731.89	312.22
6 -มิ.ย.-63	23	2940.03	884.61	2809.94	702.49
8 -มิ.ย.-63	25	3010.53	547.37	3010.53	451.58

วัน/เดือน/ปี	วันที่ใน การ ทดลอง	การทดลอง			
		น้ำเสียเข้า R1	น้ำทิ้ง R1	น้ำเสียเข้า R2	น้ำทิ้ง R2
9 -มิ.ย.-63	26	2935.74	396.72	3015.08	343.83
10 -มิ.ย.-63	27	2591.91	290.93	2692.19	396.72
11 -มิ.ย.-63	28	2838.71	180.675	2890.32	258.06
12 -มิ.ย.-63	29	2967.74	1393.55	2916.13	1045.16
13 -มิ.ย.-63	30	2980.65	1316.13	2890.32	619.35
14 -มิ.ย.-63	31	2916.13	1341.94	2980.65	490.32
15 -มิ.ย.-63	32				
16 -มิ.ย.-63	33	2995.39	1126.47	2841.78	614.44



ตารางที่ ค-4 ค่าพีเอชในช่วงการทดลองที่ 2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้า 3,000 มก.ซีไอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	PH	
		R1	R2
14 -พ.ค.-63	0	8.10	8.04
15 -พ.ค.-63	1	8.04	8.09
16 -พ.ค.-63	2	7.90	7.88
17 -พ.ค.-63	3		
18 -พ.ค.-63	4	7.95	7.86
19 -พ.ค.-63	5	8.02	7.89
20 -พ.ค.-63	6	7.14	7.33
21 -พ.ค.-63	7	7.97	8.09
22 -พ.ค.-63	8	8.05	7.99
23 -พ.ค.-63	9	7.84	7.85
24 -พ.ค.-63	10	7.75	7.79
25 -พ.ค.-63	11		
26 -พ.ค.-63	12	8.14	8.07
27 -พ.ค.-63	13	7.23	7.58
28 -พ.ค.-63	14	7.80	7.79
29 -พ.ค.-63	15	7.80	8.18
30 -พ.ค.-63	16	8.05	7.99
31 -พ.ค.-63	17	7.98	8.09
1 -มิ.ย.-63	18	7.86	7.65
2 -มิ.ย.-63	19	7.95	7.69
3 -มิ.ย.-63	20	7.90	7.92
4 -มิ.ย.-63	21	7.91	8.02

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	PH	
		R1	R2
5 -มิ.ย.-63	22	7.96	7.95
6 -มิ.ย.-63	23	7.62	7.73
7 -มิ.ย.-63	24	7.65	7.71
8 -มิ.ย.-63	25	7.62	7.85
9 -มิ.ย.-63	26	7.61	7.97
10 -มิ.ย.-63	27	7.73	7.88
11 -มิ.ย.-63	28	7.95	7.92
12 -มิ.ย.-63	29	6.97	7.53
13 -มิ.ย.-63	30	6.98	7.57
14 -มิ.ย.-63	31	6.78	7.79
15 -มิ.ย.-63	32	8.12	8.05
16 -มิ.ย.-63	33	7.00	7.77

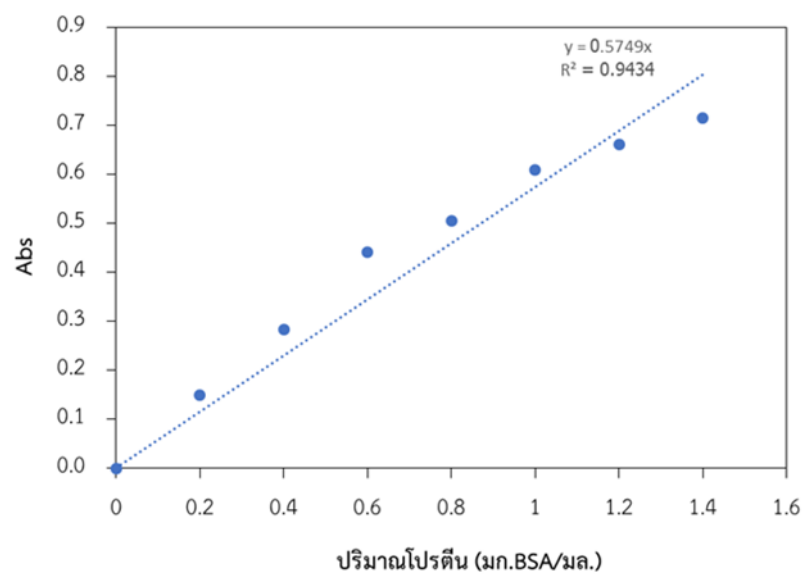
ตารางที่ ค-4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงการทดลองที่ 2 ที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้า 3,,000 มก. ซีไอดี/ล.

วัน/เดือน/ปี	วันที่ในการทดลอง	DO	
		R1	R2
14 -พ.ค.-63	0	3.21	3.40
15 -พ.ค.-63	1	3.90	4.22
16 -พ.ค.-63	2	4.22	4.72
17 -พ.ค.-63	3		
18 -พ.ค.-63	4	4.53	5.06

19 -พ.ค.-63	5	4.12	4.09
20 -พ.ค.-63	6	5.85	5.57
21 -พ.ค.-63	7	3.58	3.82
22 -พ.ค.-63	8	3.60	4.04
23 -พ.ค.-63	9	4.69	4.64
24 -พ.ค.-63	10	4.72	3.71
25 -พ.ค.-63	11		
26 -พ.ค.-63	12	5.81	6.11
27 -พ.ค.-63	13	3.17	2.89
28 -พ.ค.-63	14	4.19	3.30
29 -พ.ค.-63	15	3.92	3.62
30 -พ.ค.-63	16	3.20	4.72
31 -พ.ค.-63	17	3.16	3.06
1 -มิ.ย.-63	18	3.55	3.38
2 -มิ.ย.-63	19	3.66	3.79
3 -มิ.ย.-63	20	3.80	4.09
4 -มิ.ย.-63	21	4.31	5.66
5 -มิ.ย.-63	22	3.87	4.10
6 -มิ.ย.-63	23	4.17	3.71
7 -มิ.ย.-63	24	4.04	3.21
8 -มิ.ย.-63	25	4.42	4.60
9 -มิ.ย.-63	26	3.13	4.92
10 -มิ.ย.-63	27	3.28	4.10
11 -มิ.ย.-63	28	4.32	4.41
12 -มิ.ย.-63	29	7.21	5.92

13 -มิ.ย.-63	30	6.78	5.81
14 -มิ.ย.-63	31	5.34	4.46
15 -มิ.ย.-63	32	7.23	6.67
16 -มิ.ย.-63	33	2.82	4.72

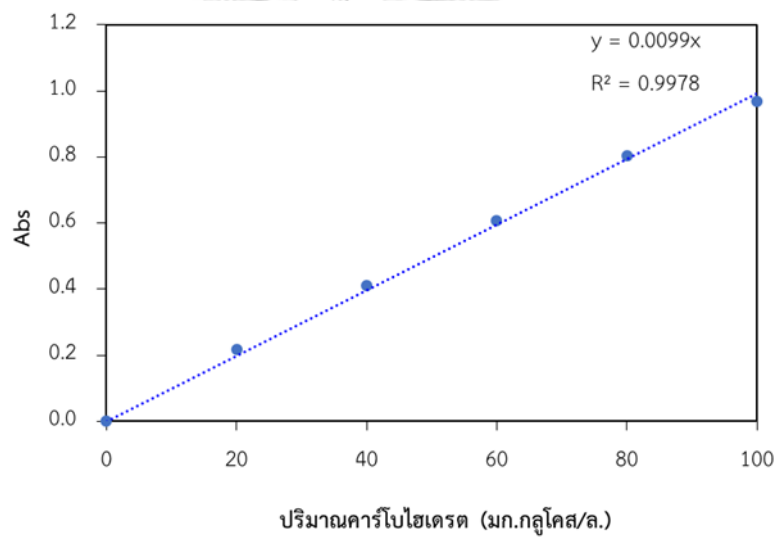
ปริมาณโปรตีน (มก./มล.)	Abs
0	0.,000
0.2	0.151
0.4	0.285
0.6	0.442
0.8	0.506
1	0.610
1.2	0.661
1.4	0.715



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานปริมาณโปรตีน

ตัวอย่าง		Abs			Avg	โปรตีน (มก. BSA/มล.)		โปรตีน (มก. BSA/ล.)
ตัวกลางพีวีเอเจล	ร้อยละ 10	0.02	0.03	0.02	0.0240	0.120	0.209	208.73
	ร้อยละ 20	0.02	0.03	0.03	0.0253	0.127	0.220	220.33
	ร้อยละ 30	0.02	0.02	0.02	0.0230	0.115	0.200	200.03
ตัวกลางพีวีเอเจล	500	0.03	0.02	0.03	0.0250	0.125	0.217	217.43
	1000	0.02	0.03	0.02	0.0227	0.113	0.197	197.14
	2000	0.03	0.02	0.02	0.0230	0.115	0.200	200.03
	3000	0.02	0.03	0.02	0.0240	0.120	0.209	208.73
ตัวกลางพลาสติกพีอี	500	0.03	0.02	0.02	0.0237	0.118	0.206	205.83
	1000	0.03	0.03	0.03	0.0283	0.142	0.246	246.42
	2000	0.04	0.04	0.04	0.0383	0.192	0.333	333.39
	3000	0.06	0.07	0.07	0.0663	0.332	0.577	576.91
เหล็กคลอไรด์		0.07	0.07	0.07	0.0717	0.358	0.623	623.30
หีกกอนูภาคนาโน		0.08	0.08	0.08	0.0770	0.385	0.670	669.68

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (มก./ล.)	Abs
0	0.,000
20	0.216
40	0.412
60	0.608
80	0.804
100	0.967



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานปริมาณคาร์โบไฮเดรต

ตัวอย่าง		Abs			Avg	คาร์โบไฮเดรต (มก.กลูโคส/ล.)	
ตัวกลางพีวีเอเจล	ร้อยละ 10	0.105	0.079	0.096	0.093	9.43	9.43
	ร้อยละ 20	0.137	0.104	0.129	0.123	12.46	12.46
	ร้อยละ 30		0.235	0.264	0.250	25.20	25.20
ตัวกลางพีวีเอเจล	500	0.031	0.036	0.045	0.037	3.77	3.77
	1000	0.175	0.153	0.153	0.160	16.20	16.20
	2000	0.052	0.05	0.045	0.049	4.95	4.95
	3000	0.346	0.315	0.318	0.326	32.96	32.96
ตัวกลางพลาสติกพีอี	500	0.129	0.131	0.127	0.129	13.03	13.03
	1000	0.26	0.226	0.242	0.243	24.51	122.56
	2000	0.407	0.398	0.401	0.402	40.61	40.61
	3000	0.399	0.387	0.386	0.391	39.46	197.31
เหล็กคอลลอยด์		0.445	0.534	0.484	0.488	49.26	246.30
เหล็กอนุภาคนาโน		0.468	0.45	0.367	0.428	43.27	216.33

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ทางสถิติของชุดการทดลอง

ง-1 การวิเคราะห์ ANOVA ของชุดการทดลองที่ 1.1

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	20	1727.869507	86.39347535	57.77508091
Column 2	20	1782.680564	89.13402818	37.42508644
Column 3	20	1752.564281	87.62821407	58.03055081

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	75.35123772	2	37.67561886	0.737625314	0.482757	3.158843
Within Groups	2911.383645	57	51.07690605			
Total	2986.734883	59				

ง-2 การวิเคราะห์ t-test ของชุดการทดลองที่ 1.2

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	Variable 1	Variable 2
Mean	16.339575	22.178496
Variance	89.501135	136.28337
Observations	5	5
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-0.8689015	
P(T<=t) one-tail	0.2051051	
t Critical one-tail	1.859548	
P(T<=t) two-tail	0.4102102	
t Critical two-tail	2.3060041	

ง-3 การวิเคราะห์ t-test ของชุดการทดลองที่ 2

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	Variable 1	Variable 2
Mean	33.87950972	38.48513789
Variance	86.36644533	69.43601352
Observations	10	10
Hypothesized Mean Difference	0	
df	18	
t Stat	-1.166814236	
P(T<=t) one-tail	0.129255851	
t Critical one-tail	1.734063607	
P(T<=t) two-tail	0.258511702	
t Critical two-tail	2.10092204	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- Abzazou, T., Araujo, R. M., Auset, M., and Salvadó, H. (2016). Tracking and quantification of nitrifying bacteria in biofilm and mixed liquor of a partial nitrification MBBR pilot plant using fluorescence in situ hybridization. *Science of The Total Environment*, 541, 1115-1123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.007>
- Aygun, A., Nas, B., and Berktaş, A. (2008). *Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor* (Vol. 25).
- Barwal, A., and Chaudhary, R. (2015). Impact of carrier filling ratio on oxygen uptake & transfer rate, volumetric oxygen transfer coefficient and energy saving potential in a lab-scale MBBR. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 202-208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.10.008>
- Bassin, J. P., Dias, I. N., Cao, S. M. S., Senra, E., Laranjeira, Y., and Dezotti, M. (2016). Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: Assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 131-141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.007>
- Bolyen, E., Rideout, J. R., Dillon, M. R., Bokulich, N. A., Abnet, C. C., Al-Ghalith, G. A., Alexander, H., Alm, E. J., Arumugam, M., Asnicar, F., Bai, Y., Bisanz, J. E., Bittinger, K., Brejnrod, A., Brislawn, C. J., Brown, C. T., Callahan, B. J., Caraballo-Rodriguez, A. M., Chase, J., Cope, E. K., Da Silva, R., Diener, C., Dorrestein, P. C., Douglas, G. M., Durall, D. M., Duvall, C., Edwards, C. F., Ernst, M., Estaki, M., Fouquier, J., Gauglitz, J. M., Gibbons, S. M., Gibson, D. L., Gonzalez, A., Gorlick, K., Guo, J., Hillmann, B., Holmes, S., Holste, H., Huttenhower, C., Huttley, G. A., Janssen, S., Jarmusch, A. K., Jiang, L., Kaehler, B. D., Kang, K. B., Keefe, C. R., Keim, P., Kelley, S. T., Knights, D., Koester, I., Kosciulek, T., Kreps, J., Langille, M. G. I., Lee, J., Ley, R., Liu, Y. X., Loftfield, E., Lozupone, C., Maher, M., Marotz, C., Martin, B. D., McDonald, D., McIver, L. J., Melnik, A. V., Metcalf, J. L., Morgan, S. C., Morton, J. T., Naimey, A. T., Navas-Molina, J. A., Nothias, L. F., Orchanian, S. B., Pearson, T., Peoples, S. L., Petras, D., Preuss, M. L., Pruesse, E., Rasmussen, L. B., Rivers, A.,

- Robeson, M. S., 2nd, Rosenthal, P., Segata, N., Shaffer, M., Shiffer, A., Sinha, R., Song, S. J., Spear, J. R., Swafford, A. D., Thompson, L. R., Torres, P. J., Trinh, P., Tripathi, A., Turnbaugh, P. J., Ul-Hasan, S., van der Hooft, J. J. J., Vargas, F., Vazquez-Baeza, Y., Vogtmann, E., von Hippel, M., Walters, W., Wan, Y., Wang, M., Warren, J., Weber, K. C., Williamson, C. H. D., Willis, A. D., Xu, Z. Z., Zaneveld, J. R., Zhang, Y., Zhu, Q., Knight, R., and Caporaso, J. G. (2019). Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nat Biotechnol*, 37(8), 852-857. doi:10.1038/s41587-019-0209-9
- Calderón, K., Martín-Pascual, J., Poyatos, J. M., Rodelas, B., González-Martínez, A., and González-López, J. (2012). Comparative analysis of the bacterial diversity in a lab-scale moving bed biofilm reactor (MBBR) applied to treat urban wastewater under different operational conditions. *Bioresource Technology*, 121, 119-126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.078>
- Cheng, W., Liu, H., Wang, M., and Wang, M. (2014). The effect of bubble plume on oxygen transfer for moving bed biofilm reactor. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(4), 664-667. doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60073-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60073-1)
- Chu, L., and Wang, J. (2011). Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio. *Chemosphere*, 83(1), 63-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.12.077>
- Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Wang, X. C., Zhang, Q., and Chen, R. (2016). New functional biocarriers for enhancing the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. *Bioresource Technology*, 208, 87-93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.057>
- Feng, Q., Wang, Y., Wang, T., Zheng, H., Chu, L., Zhang, C., Chen, H., Kong, X., and Xing, X.-H. (2012). Effects of packing rates of cubic-shaped polyurethane foam carriers on the microbial community and the removal of organics and nitrogen in moving bed biofilm reactors. *Bioresource Technology*, 117, 201-207. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.076>
- Geed, S. R., Kureel, M. K., Giri, B. S., Singh, R. S., and Rai, B. N. (2017). Performance evaluation of Malathion biodegradation in batch and continuous packed bed

- bioreactor (PBBR). *Bioresour Technol*, 227, 56-65. doi:10.1016/j.biortech.2016.12.020
- Gu, Q., Sun, T., Wu, G., Li, M., and Qiu, W. (2014). Influence of carrier filling ratio on the performance of moving bed biofilm reactor in treating coking wastewater. *Bioresource Technology*, 166, 72-78.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.026>
- Han, H., Cui, M., Wei, L., Yang, H., and Shen, J. (2011). Enhancement effect of hematite nanoparticles on fermentative hydrogen production. *Bioresource Technology*, 102(17), 7903-7909. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.089>
- Hayrapetyan, H., Muller, L., Tempelaars, M., Abee, T., and Nierop Groot, M. (2015). Comparative analysis of biofilm formation by *Bacillus cereus* reference strains and undomesticated food isolates and the effect of free iron. *International Journal of Food Microbiology*, 200, 72-79.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.02.005>
- Li, S.-r., Cheng, W., Wang, M., and Chen, C. (2011). The flow patterns of bubble plume in an MBBR. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23(4), 510-515.
doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60143-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60143-6)
- Mohanraj, S., Kodhaiyolii, S., Rengasamy, M., and Pugalenthi, V. (2014). Phytosynthesized iron oxide nanoparticles and ferrous iron on fermentative hydrogen production using *Enterobacter cloacae*: Evaluation and comparison of the effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23), 11920-11929.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.027>
- Ranmadugala, D., Ebrahiminezhad, A., Manley-Harris, M., Ghasemi, Y., and Berenjian, A. (2017). The effect of iron oxide nanoparticles on *Bacillus subtilis* biofilm, growth and viability. *Process Biochemistry*, 62, 231-240.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.07.003>
- Safwat, S. M. (2018). Performance of moving bed biofilm reactor using effective microorganisms. *Journal of Cleaner Production*, 185, 723-731.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.041>
- Salama, Y., Ph, C., Sylla, A., Mountadar, M. m., Rihani, M., and Assobhei, O. (2016). *Treatment of domestic wastewater by anaerobic denitrification: Influence of the type of support media on the production of extracellular polymer*

substances (Vol. 15).

- Sehar, S., and Naz, I. (2016). Role of the Biofilms in Wastewater Treatment. In D. Dhanasekaran & N. Thajuddin (Eds.), *Microbial Biofilms - Importance and Applications* (pp. Ch. 07). Rijeka: InTech.
- Sonwani, R. K., Swain, G., Giri, B. S., Singh, R. S., and Rai, B. N. (2019). A novel comparative study of modified carriers in moving bed biofilm reactor for the treatment of wastewater: Process optimization and kinetic study. *Bioresour Technol*, 281, 335-342. doi:10.1016/j.biortech.2019.02.121
- Vyrides, I., Drakou, E. M., Ioannou, S., Michael, F., Gatidou, G., and Stasinakis, A. S. (2018). Biodegradation of bilge water: Batch test under anaerobic and aerobic conditions and performance of three pilot aerobic Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs) at different filling fractions. *J Environ Manage*, 217, 356-362. doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.086
- Yang, Y., Guo, J., and Hu, Z. (2013). Impact of nano zero valent iron (NZVI) on methanogenic activity and population dynamics in anaerobic digestion. *Water Research*, 47(17), 6790-6800. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.012>
- Zhang, X., Chen, X., Zhang, C., Wen, H., Guo, W., and Ngo, H. H. (2016). Effect of filling fraction on the performance of sponge-based moving bed biofilm reactor. *Bioresour Technol*, 219, 762-767. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.031>



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวเพ็ญพินิต โพธิ์สวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 พฤศจิกายน 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ที่อยู่ปัจจุบัน	46 หมู่ 13 แขวงหนองจอก เขตหนองจอก กทม. 10530



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY