

ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิเจนชนิดเบดเคลื่อนที่
เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Performance and kinetic of nitrate removal in anoxic moving bed bioreactor using
bioplastic beads as organic carbon source



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอนีออกซิเจนชนิดเบดเคลื่อนที่เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน
โดย	น.ส.มัลลิกา พัวพวง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พัชรียา รุ่งกิจวัฒนานุกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พัชรียา รุ่งกิจวัฒนานุกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิลาสินี อยู่ชัชวาล)

มัลลิกา พัวพวง : ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน. (Performance and kinetic of nitrate removal in anoxic moving bed bioreactor using bioplastic beads as organic carbon source) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พัชรียา รุ่งกิจวัฒนานกุล

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเม็ดพลาสติกชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ PLA, PHBV และ PBS แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง การทดลองช่วงแรกศึกษาสมบัติทางกายภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ พบว่าพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีสมบัติความชอบน้ำ ขณะที่ PLA และ PHBV ไม่ชอบน้ำ ผลการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพพบว่า PBS ตรวจพบสารอินทรีย์คาร์บอนละลายในน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออน เพิ่มขึ้นสูงกว่า PLA และ PHBV ตามลำดับ เมื่อทดสอบการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ พบว่าที่ค่าพีเอชในช่วงที่มากกว่า 4 พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิดจะแสดงประจุเป็นลบ จึงไม่พบการดูดซับหรือดูดติดผิวของไนเตรทบนตัวกลาง การทดลองช่วงที่สองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่เมื่อทำการเดินระบบแบบที่ละเท พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่ PLA กำจัดไนเตรทได้เพียงร้อยละ 48 เมื่อทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์การกำจัดไนเตรท พบว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือของการทดลองแบบที่ละเทเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะเวลา 12 และ 15 ชม. ตามลำดับ เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน การทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทที่สภาวะคงตัวเท่ากับร้อยละ 12.87 ± 4.92 , 8.11 ± 5.31 , 12.33 ± 8.37 และ 84.83 ± 4.58 มีระยะเวลาพักน้ำ 12, 16, 20 และ 24 ชม. ตามลำดับ โดยจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากมีปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบอย่างจำกัด ทำให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้ช้าลง ขณะที่เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทร้อยละ 99.47 ± 0.52 , 99.34 ± 1.83 , 100 และ 98.91 ± 0.95 ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 8, 4 และ 2 ชม. ตามลำดับ เนื่องจากในระบบมีสารอินทรีย์คาร์บอนเพียงพอต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070467621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Denitrification, Nitrate removal efficiency, Biodegradable polymer, Moving bed reactor, Solid carbon sources

Mallika Phuaphuang : Performance and kinetic of nitrate removal in anoxic moving bed bioreactor using bioplastic beads as organic carbon source. Advisor: Assoc. Prof. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D. Co-advisor: Phatchariya Rungkitwatananukul, Ph.D.

This research investigated the usage of three kinds of bioplastic beads which were Polylactic acid (PLA), Polybutylene succinate (PBS) and Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) as organic carbon sources and media in anoxic moving bed bioreactor (anoxic MBBR). The purposes of this research can be divided in to three parts. First was to study the physical characteristics of bioplastic beads. The study suggested that PBS was hydrophilic while PLA and PHBV were hydrophobic. The solubility results showed the level of dissolved organic carbon in tap water and deionized water of PBS was higher than the ones in PHBV and PLA. The Nitrate adsorption of three kinds of bioplastic beads showed that , with pH higher 4, the surface area was a negative charge. It did not appear any nitrate adsorption on the surface area of bioplastic. The second experiment investigated the nitrate removal efficiency with anoxic MBBR batch operation. The result showed that the nitrate removal efficiency of PHBV and PBS were more than 90%, in contrast to PLA of bioplastic at 48% .The kinetics of the denitrification process with PHBV and PHB as organic carbon sources were zero order because the nitrate concentration decreased to 0 mg/L at 12 and 15 hrs. The last experiment was to continue the operation in anoxic MBBR. It indicated that the nitrate removal efficiency of PHBV at steady-state conditions were $12.87 \pm 4.92\%$, $8.11 \pm 5.31\%$, $12.33 \pm 8.37\%$, and $84.83 \pm 4.58\%$, at 12, 16, 20, and 24 hrs., respectively. The denitrification kinetics was the first order as the limitation of organic carbon led to a longer period of denitrification process. While using PBS as an organic carbon source showed that $99.47 \pm 0.52\%$, $99.34 \pm 1.83\%$, 100% , and $98.91 \pm 0.95\%$ of the nitrate removal's efficiencies at HRT were 12, 8, 4, and 2 hrs., respectively as the organic carbon sources were sufficient to completely denitrification process.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.พัชรียา รุ่งกิจพัฒนานุกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว ที่กรุณาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาสินี อยู่ซัชवाल กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ถูกต้องและสมบูรณ์ขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้มอบความรู้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อตัวผู้วิจัย และทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการติดตั้งอุปกรณ์และเดินระบบสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่วราลี วิศาลโกะคะ พี่พัชราภรณ์ เทียงทอง พี่เพ็ญพนิต โพธิ์สวัสดิ์ พี่ยุทธกิจ ชูสุทธิ พี่ประถมาภรณ์ หอมยก ขนิษฐา หาญวงษ์ ธิติวุฒิ มลิวัลย์ ธนพงศ์ อุปถัมภานนท์ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษาและกำลังใจในตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนการศึกษา ช่วยผลักดันและเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มัลลิกา พัวพวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle).....	4
2.2 ปัญหาของไนโตรเจนในน้ำเสียต่อสิ่งแวดล้อม.....	5
2.3 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ.....	6
2.3.1 จากธรรมชาติ.....	6
2.3.2 จากกิจกรรมของมนุษย์.....	7
2.4 การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย.....	8
2.4.1 การกำจัดด้วยวิธีทางฟิสิกส์-เคมี.....	8
2.4.2 การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	8
2.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification process).....	9

2.5.1 การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันทางชีวภาพ	10
2.5.2 จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	11
2.5.3 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	12
2.6 สารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	14
2.6.1 สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวหรือสารละลาย	15
2.6.2 สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็ง.....	15
2.6.3 ข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้อินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวและของแข็ง	17
2.7 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).....	18
2.7.1 Polylactic acid (PLA)	20
2.7.2 Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)	21
2.7.3 Polybutylene succinate (PBS).....	24
2.7.4 เทคนิคการวิเคราะห์พลาสติกชีวภาพ.....	25
2.7.5 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้พลาสติกชีวภาพเป็นสารอินทรีย์สำหรับการกำจัดไนเตรท. 26	
2.8 ระบบแอน็อกซิเจนชนิดเบดเคลื่อนที่ (Anoxic moving bed system).....	30
2.8.1 ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ (Moving bed bioreactor)	30
2.8.2 การเลือกตัวกลางสำหรับถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่.....	31
2.8.3 ระยะเวลากักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) และกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในถัง ปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่	32
2.9 จลนพลศาสตร์ของการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	33
2.9.1 รูปแบบสมการจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.....	34
2.9.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์ คาร์บอน.....	36
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	41

3.1	แผนการวิจัย	41
3.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีในตรีฟอง	44
3.2.1	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	44
3.2.2	การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีในตรีฟอง.....	45
3.3	เม็ดพลาสติกชีวภาพ.....	45
3.4	ถังปฏิกรณ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	46
3.4.1	ถังปฏิกรณ์ชนิดที่ละเท.....	46
3.4.2	ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่.....	47
3.4.3	อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์	47
3.5	รายละเอียดวิธีการทดลอง.....	48
3.5.1	การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีในตรีฟอง.....	48
3.5.2	การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาลักษณะของเม็ดพลาสติกชีวภาพ สมบัติการละลายน้ำ และทดสอบการดูดติดของไนเตรทบนผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ	49
3.5.3	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่52	52
3.5.4	การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาการกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	55
3.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ทำการวิเคราะห์	59
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	60
4.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพ.....	61
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ	61
4.1.2	ศึกษาการละลายและดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ	65
4.2	การเริ่มต้นเดินระบบและการเดินระบบการทดลองแบบที่ละเท.....	69
4.2.1	การเริ่มต้นเดินระบบ.....	69

4.2.2 ประสิทธิภาพกำจัดไนเตรทของการเดินระบบแบบที่ละเท	71
4.2.3 อัตราการกำจัดไนเตรทและจลนพลศาสตร์ของการเดินระบบแบบที่ละเท	74
4.3 การเดินระบบถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง	78
4.3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ	79
4.3.2 จลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน	83
4.3.3 อัตราการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน	90
4.3.4 การศึกษาเม็ดพลาสติกชีวภาพจากถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	96
4.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเดินระบบเบดเคลื่อนที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการทดลอง	101
5.1.1 สมบัติทางกายภาพ การละลายน้ำ และการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ	101
5.1.2 ประสิทธิภาพ จลนพลศาสตร์ และอัตราการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แอнокชิกชนิดเบดเคลื่อนที่ เพื่อเดินระบบการทดลองแบบที่ละเท	101
5.1.3 ประสิทธิภาพ จลนพลศาสตร์ และอัตราการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์แอнокชิกชนิดเบดเคลื่อนที่เพื่อเดินระบบแบบต่อเนื่อง	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
ภาคผนวก ก รายงานการคำนวณ	103
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	105
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐาน	106
ภาคผนวก ง ผลการทดลอง	108
บรรณานุกรม	129



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มาจากสารมลพิษไนโตรเจนรูปต่างๆ	5
ตารางที่ 2.2 จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก	11
ตารางที่ 2.3 จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงในกลุ่มออโตโทรฟิก.....	12
ตารางที่ 2.4 สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ สำหรับการกำจัดไนเตรทในน้ำเสีย.....	14
ตารางที่ 2.5 ประเภทของอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็งจากธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น.....	16
ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้อินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวและของแข็ง	18
ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของ PLA.....	21
ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของ PHBV	23
ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของ PBS.....	25
ตารางที่ 2.10 เทคนิควิเคราะห์และติดตามการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพโดยจุลินทรีย์.....	26
ตารางที่ 2.11 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ..	26
ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน	27
ตารางที่ 2.13 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ..	29
ตารางที่ 2.14 สัดส่วนปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพที่สมมูลต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม	30
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทั่วไปและสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 2	52
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3	58
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านการบำบัด.....	59
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพร้อยละ 10 ก่อนเริ่มเดินระบบในแต่ละการทดลอง.....	65
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้สารอินทรีย์คาร์บอนต่างๆ ใน กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	76
ตารางที่ 4.3 จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS....	78

ตารางที่ 4.4 สภาวะการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV 84

ตารางที่ 4.5 สภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS 91

ตารางที่ 4.6 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเดินระบบเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแบบที่ละเท และแบบต่อเนื่อง..... 100



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	การเปลี่ยนแปลงสารในวัฏจักรไนโตรเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์	4
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาออกซิเดชันของการเปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนเตรท	5
รูปที่ 2.3	การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน.....	9
รูปที่ 2.4	ปฏิกิริยาการเกิดดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน	17
รูปที่ 2.5	การจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพ	19
รูปที่ 2.6	การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพโดยจุลินทรีย์	20
รูปที่ 2.7	โครงสร้างทางเคมีของ PLA	20
รูปที่ 2.8	โครงสร้างทางเคมีของ PHBV.....	22
รูปที่ 2.9	ขั้นตอนการเตรียมโมโนเมอร์เพื่อนำไปผลิตเป็น PBS	24
รูปที่ 2.10	โครงสร้างทางเคมีของ PBS	24
รูปที่ 2.11	รูปแบบของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่.....	31
รูปที่ 2.12	ตัวอย่างตัวกลางประเภทต่างๆ ที่ใช้ในระบบบำบัดชนิดเบดเคลื่อนที่	31
รูปที่ 2.13	กราฟสมการโมโนด.....	35
รูปที่ 2.14	กราฟสมการอันดับศูนย์.....	35
รูปที่ 2.15	กราฟสมการอันดับหนึ่ง	36
รูปที่ 2.16	ผลของปริมาณออกซิเจนละลายต่อการกำจัดไนเตรท ในถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์ ...	37
รูปที่ 2.17	ผลของสัดส่วน COD : NO ₃ ⁻ - N ในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนเตรท.....	37
รูปที่ 3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.2	ภาพถ่ายเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย	45
รูปที่ 3.3	แบบ (drawing) แสดงขนาดและการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่	47
รูปที่ 3.4	การทดสอบการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำปราศจากไอออนและน้ำประปา. 50	

รูปที่ 3.5	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1.2.....	50
รูปที่ 3.6	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1.3.....	51
รูปที่ 3.7	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2.1.....	53
รูปที่ 3.8	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2.2.....	54
รูปที่ 3.9	แผนภาพการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	55
รูปที่ 3.10	การเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่.....	56
รูปที่ 3.11	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 3.....	57
รูปที่ 4.1	ค่าคุณสมบัติที่แตกต่างกันของหยดน้ำบนผิววัสดุ.....	61
รูปที่ 4.2	ค่าคุณสมบัติของหยดน้ำบนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด.....	62
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	63
รูปที่ 4.4	การวิเคราะห์ประจุที่ผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด.....	64
รูปที่ 4.5	การทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด	65
รูปที่ 4.6	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ในน้ำปราศจากไอออน	66
รูปที่ 4.7	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดในน้ำประปา	67
รูปที่ 4.8	การดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด.....	68
รูปที่ 4.9	พารามิเตอร์ต่างๆ จากการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์	70
รูปที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไนเตรท เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน	72
รูปที่ 4.11	จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS.....	75
รูปที่ 4.12	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายหรือดีไอซี ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ ของการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน	77
รูปที่ 4.13	ค่าพีเอชระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกัน เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน	80
รูปที่ 4.14	ค่าสภาพต่างระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่	81

รูปที่ 4.15	ออกซิเจนละลายระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แลพ PBS.....	83
รูปที่ 4.16	ปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนรูปต่างๆ ในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่	86
รูปที่ 4.17	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV	87
รูปที่ 4.18	จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน	89
รูปที่ 4.19	ความเข้มข้นซีไอดีเฉลี่ยที่ระยะเวลากักน้ำต่างๆ เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV.....	90
รูปที่ 4.20	ผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนและสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS ..	93
รูปที่ 4.21	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS.....	94
รูปที่ 4.22	อัตราการบรรทุกไนเตรทในแต่ละระยะเวลากักน้ำเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS	95
รูปที่ 4.23	ความเข้มข้นซีไอดีในแต่ละระยะเวลากักน้ำ เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS.....	96
รูปที่ 4.24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่างๆ จากถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ภายหลังการเดินระบบ.....	97
รูปที่ 4.25	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่างๆ แสดงเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS จากถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ภายหลังการเดินระบบ	98
รูปที่ 4.26	ลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกชีวภาพก่อนและหลังเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ไนเตรทเป็นสารมลพิษทางน้ำซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในน้ำเสียที่มีปริมาณไนเตรทมากเกินไปหากไม่ได้รับการกำจัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสีเขียว (Algae bloom) ในแหล่งน้ำ และการเกิดโรค Methemoglobinemia หรือโรคเด็กตัวเขียว Blue baby syndrome ในเด็ก เป็นต้น ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทจะอาศัยกระบวนการกำจัดทางชีวภาพหรือที่เรียกว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification process)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศ โดยจุลินทรีย์จะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งให้อิเล็กตรอน โดยทั่วไปการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเพื่อให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปสารละลาย เช่น กลูโคส เมทานอล เอทานอล และอะซิเตท หากมีปริมาณมากเกินไปเมื่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชันสิ้นสุดแล้วยังคงเหลือกลายเป็นค่าซีโอดีหรือบีโอดีในน้ำที่มีความจำเป็นต้องทำการกำจัดต่อไป (Calderer และคณะ, 2010) เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนรูปอื่น เพื่อกำจัดไนเตรทผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นได้ทั้งแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและใช้เป็นตัวกลางในระบบเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและสร้างฟิล์มชีวภาพได้ในขณะเดียวกัน จึงเป็นการช่วยกักเก็บมวลชีวภาพไว้ภายในระบบ ทั้งนี้มีรายงานว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพประเภทต่างๆ ได้แก่ Polycaprolactone (PCL), Polylactic acid (PLA), Polyhydroxybutyrate (PHB), Poly (3 -hydroxybutyrate-co-3 -hydroxyvalerate) (PHBV), Polyvinyl alcohol (PVA) และ Polybutylene succinate (PBS) สามารถใช้เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนให้แก่จุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิง สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ดี (Wu และคณะ, 2013) เนื่องจากจุลินทรีย์จะค่อยๆ ปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพให้มีขนาดเล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ ส่วนที่ละลายน้ำจะถูกใช้เป็นแหล่งของอิเล็กตรอนสำหรับจุลินทรีย์ (Wang and Chu, 2016) นอกจากนี้การใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพยังช่วยลดการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่มากเกินไปในระบบอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเป็นการศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพในถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่ (Packed bed reactor) จึงมีความน่าสนใจที่จะทดลองนำ

เม็ดพลาสติกชีวภาพบรรจุเป็นตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นระบบที่มีสมรรถนะสูงในการบำบัดน้ำเสีย สามารถกักเก็บชีวมวลไว้ในระบบได้มาก และเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียและสารอาหารได้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA, PBS และ PHBV เป็นตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเบดเคลื่อนที่ และเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยทำการทดลองเดินระบบทั้งแบบทีละเท (Batch reactor) และแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดดังกล่าวกับการกำจัดไนเตรททางชีวภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA, PBS และ PHBV เป็นตัวกลางและแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนในการกำจัดไนเตรทด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ (PLA, PHBV หรือ PBS) เป็นตัวกลาง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ ทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 20 องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดขอบเขตงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้โซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท และมีการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยมีค่าความเข้มข้นของไนเตรทคงที่เท่ากับ 50 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ตลอดการวิจัย

1.3.2 เม็ดพลาสติกชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ PLA, PBS และ PHBV มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.24, 1.26 และ 1.25 ตามลำดับ โดยไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และสามารถย่อยสลายได้

1.3.3 หัวเชื้อที่ใช้ในการเดินระบบเป็นหัวเชื้อไร้อากาศจากถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบี (UASB) ของบริษัท รอยัล ฟู้ด จำกัด โดยนำมาปั่นให้เป็นตะกอนเหลวขึ้น

1.3.4 การศึกษาการละลายน้ำและการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ จะทำการทดลองในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ที่วางบนเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) เพื่อจำลองสภาวะการเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่

1.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน ทำการเดินระบบแบบที่ละและแบบต่อเนื่อง ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ (Anoxic moving bed reactor)

1.3.6 ศึกษาระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เหมาะสมเมื่อทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1.3.7 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงตาม Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (AWWA, 2005)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีหรือบีโอดีที่เหลือในน้ำทิ้ง และช่วยกักเก็บชีวมวลไม่ให้หลุดจากระบบ

1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสีย

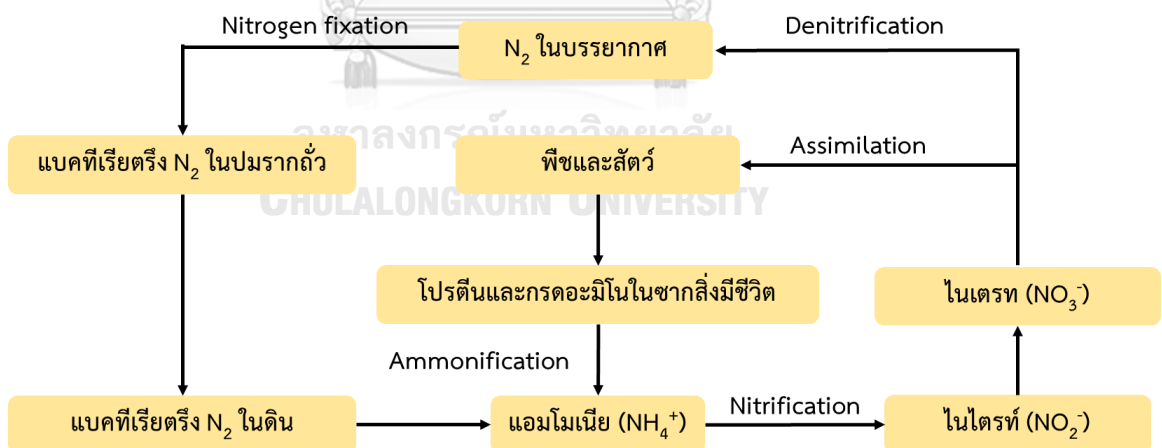
1.4.3 ทราบถึงจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุตัวกลางในการกำจัดไนเตรทเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่กักน้ำ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle)

ไนโตรเจนในอากาศเป็นแหล่งเริ่มต้นของวัฏจักรธาตุไนโตรเจน โดยในอากาศมีก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 78 จากปริมาตรอากาศทั้งหมด และไนโตรเจนยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของดีเอ็นเอ อาร์เอ็นเอ และโปรตีนของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด สิ่งมีชีวิตมีความต้องการไนโตรเจนในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต โดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อมอาจพบไนโตรเจนได้ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ขึ้นกับเลขออกซิเดชันที่เปลี่ยนแปลงไป (Ni และคณะ, 2016) และไนโตรเจนยังอาจเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของสารประกอบอื่นๆ หากวัฏจักรมีสารประกอบไนโตรเจนบางชนิดมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้วัฏจักรเกิดความไม่สมดุล อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ นอกจากนี้วัฏจักรไนโตรเจนจะเปลี่ยนรูปจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของธาตุไนโตรเจน และสารประกอบไนโตรเจนตามสภาพแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนด้วยกระบวนการทางเคมีและการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทั้งในสิ่งมีชีวิต อากาศ ดิน หิน และน้ำ จากระบบหนึ่งไปสู่ระบบหนึ่งหมุนเวียนเป็นวัฏจักร ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสารในวัฏจักรไนโตรเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์

(ที่มา : ดัดแปลงจาก U.S. Environmental Protection Agency)

2.2 ปัญหาของไนโตรเจนในน้ำเสียต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะยังคงมีไนโตรเจนหลงเหลืออยู่ ซึ่งเมื่อปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบของไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตในน้ำ

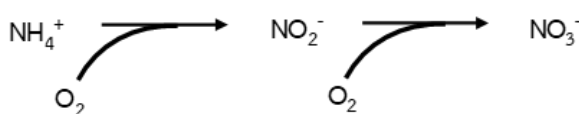
ตารางที่ 2.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มาจากสารมลพิษไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ

สารมลพิษไนโตรเจน	ปัญหาที่เกิดขึ้น
NH_4^+ (แอมโมเนียม)	การเจริญเติบโตของพืชน้ำมากเกินไป ออกซิเจนละลายมีค่าลดลง และมีสารพิษเกิดขึ้น คือก๊าซแอมโมเนีย
NO_2^- (ไนไตรท์)	การเจริญเติบโตของพืชน้ำมากเกินไป ออกซิเจนละลายมีค่าลดลง มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ
NO_3^- (ไนเตรท)	ออกซิเจนละลายมีค่าลดลง การเกิดยูโทรฟิเคชัน และก่อให้เกิดโรค Blue baby syndrome

ที่มา : Gerardi (2002)

- ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าลดลง

การปล่อยน้ำเสียที่มีแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท เป็นองค์ประกอบลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าลดลง การลดลงของค่าออกซิเจนละลายขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ แอมโมเนียมในน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์ และไนไตรท์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นแหล่งน้ำจึงมีไนเตรทปนเปื้อนอยู่ โดยทั่วไปปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารแต่ละตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่าออกซิเจนละลาย ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท ยังเป็นธาตุอาหารกลุ่มหลัก กล่าวคือเป็นสารอาหารที่พืชน้ำใช้ในการเจริญเติบโตโดยเฉพาะสาหร่าย เมื่อพืชได้รับสารอาหารที่เพียงพอทำให้พืชและสาหร่ายเติบโตอย่างรวดเร็ว เมื่อพืชตายส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์นำไปใช้ในการย่อยสลายซากพืชในแหล่งน้ำ



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของการเปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนเตรท

- ความเป็นพิษ

สารประกอบไนโตรเจนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะปลา แอมโมเนียมและไนไตรท์มีความเป็นพิษมาก ซึ่งไนไตรท์มีความเป็นพิษมากที่สุดในทุกสามชนิด ถึงแม้ว่าแอมโมเนียมจะสามารถใช้ป็นสารอาหารให้กับสิ่งมีชีวิตในน้ำได้แต่แอมโมเนียมสามารถเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นแอมโมเนียเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเป็นสารพิษที่ส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

- การเกิดยูโทรฟิเคชัน

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเกิดจากการที่แหล่งน้ำขาดออกซิเจน สาเหตุหนึ่งมาจากแหล่งน้ำได้รับปริมาณไนเตรทที่มากเกินไปจากกิจกรรมของมนุษย์ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เป็นต้น ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่าย ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเริ่มต้นลำดับต่ำสุดของห่วงโซ่อาหาร ไนโตรเจนที่เป็นธาตุอาหารจะไปกระตุ้นให้พืชสีเขียวในลำน้ำมีการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้นและเจริญเติบโตแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง สิ่งมีชีวิตจึงตายลงเนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ นอกจากนี้ภาวะการเกิดยูโทรฟิเคชันยังเป็นสาเหตุที่ทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง

- ก่อให้เกิดโรค Blue baby syndrome

โรคเด็กตัวเขียว หรือ Methemoglobinemia เป็นโรคที่เกี่ยวกับการได้รับสัมผัสจากการบริโภคน้ำดื่มที่มีไนเตรทปนเปื้อน ซึ่งมักเกิดในเด็กทารกอายุต่ำกว่า 4 เดือน หรือคนที่บริโภคน้ำที่มีไนเตรทปนเปื้อนเป็นประจำ โดยไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ และไนไตรท์นี้จะไปดูดซับและรวมตัวกับฮีโมโกลบินและเปลี่ยนเป็นเมทิโมโกลบิน ส่งผลให้การลำเลียงออกซิเจนไปใช้ในร่างกายลดลง และไปขัดขวางการทำงานของฮีโมโกลบินในเลือด ส่งผลทำให้เป็นลมหมดสติ ตัวเขียว และอาจเสียชีวิตได้

2.3 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

2.3.1 จากธรรมชาติ

ไนเตรทในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีนในพืช สัตว์ ของเสียในสัตว์ แบคทีเรียบางชนิดที่อยู่ตามปมรากพืชตระกูลถั่วจะทำให้ไนใต้ดินมีไนเตรท

สูงเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถสร้างไนเตรทได้ แบคทีเรียกลุ่มดังกล่าว ได้แก่ Free-living bacteria และ Symbiotic bacteria (Gerardi, 2002)

2.3.2 จากกิจกรรมของมนุษย์

- ปุ๋ย

ปุ๋ยจากการสังเคราะห์เป็นแหล่งของไนเตรทในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สารประกอบไนเตรทของแอมโมเนีย โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม รวมทั้งยูเรีย ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในเกษตรกรรม และในปัจจุบันความต้องการผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้นทำให้มีการใช้ปุ๋ยในปริมาณมากขึ้น เมื่อใช้ปุ๋ยเพิ่มมากขึ้นในขณะที่พืชไม่สามารถใช้ไนโตรเจนเหล่านั้นได้จนหมด ทำให้บางส่วนที่ยังเหลืออยู่สะสมในดินและไหลไปกับน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อม

- ของเสียจากสัตว์

ไนโตรเจนในของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มาจากมูลสัตว์ซึ่งมีแอมโมเนียเป็นองค์ประกอบ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอากาศ แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทโดยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟอิง ซึ่งเรียกระบวนการนี้ว่า ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

- ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมมากขึ้น อุตสาหกรรมแต่ละชนิดมีลักษณะน้ำเสียที่ต่างกันออกไป น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีไนเตรทเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ โรงงานผลิตสุรา - เบียร์ โรงฆ่าสัตว์ โรงงานอาหารกระป๋อง และโรงงานผลิตอาหารทะเล น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีปริมาณไนเตรทสูง เนื่องจากน้ำเสียมีองค์ประกอบของไนโตรเจนปริมาณมาก เมื่อถูกออกซิไดซ์ทำให้สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย ทำให้น้ำเสียมีแอมโมเนียสูงขึ้นและเมื่อเข้าสู่กระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีไนเตรทหลุดออกมาด้วย ไนเตรทที่หลุดออกมาถ้ามีปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันดังที่กล่าวไป

2.4 การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย

2.4.1 การกำจัดด้วยวิธีทางฟิสิกส์-เคมี

การกำจัดไนโตรเจนทางฟิสิกส์และเคมีเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำที่มีไนเตรทปริมาณน้อย วิธีการที่ใช้ในการกำจัด ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) เป็นต้น

ทั้งนี้ข้อจำกัดของการกำจัดด้วยวิธีทางฟิสิกส์-เคมี คือ ต้นทุนสูงทั้งในเรื่องของการกำจัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินระบบ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีความซับซ้อน และผู้ดูแลระบบต้องมีความชำนาญและเข้าใจเป็นอย่างดี

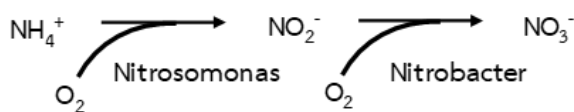
2.4.2 การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียมาทำการย่อยสลายเปลี่ยนแปลงสภาพของสารอินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรท ไนไตรท์ ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) กระบวนการทางชีวภาพนี้สามารถเกิดได้ทั้งแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ

การกำจัดไนโตรเจนแบบใช้อากาศ

- ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

กระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นการออกซิไดซ์แอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำให้เป็นไนไตรท์และไนเตรท โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียประเภทออโตโทรฟ (Autotroph) ในขั้นตอนไนไตรท์เตชัน (Nitritation) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนย่อย ขั้นตอนแรกคือการทำงานโดยแบคทีเรียกลุ่ม Ammonium Oxidizing Bacteria (AOB) เช่น *Nitrosomonas europaea* และ *Nitrosomonas oligocarbogenes* มีหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และในขั้นตอนที่สองโดยแบคทีเรียกลุ่ม Nitrite Oxidizing Bacteria (NOB) เช่น ไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacter agilis และ *Nitrobacter winogradski*) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์เป็นไนเตรท ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาระบบจะอยู่ในสภาวะมีอากาศและได้พลังงานออกมา แสดงดังรูปที่ 2.3 แบคทีเรียจะใช้พลังงานนี้ไปดึงเอาคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนคาร์บอเนตมาเป็นแหล่งคาร์บอน (Carbon source) นอกจากนี้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันยังมีการปล่อย H^+ ออกมาทำให้ระบบมีสภาพต่างเพียงพอกหากไม่พอจะส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบมีค่าลดลงส่งผลให้ระบบล้มเหลวในการทำงาน



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยานิไตรฟิเคชัน

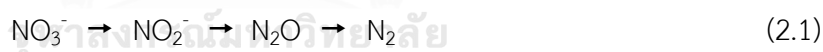
การกำจัดไนโตรเจนแบบไม่ใช้อากาศ

- ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน คือเป็นการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ โดยมีไนเตรท เป็นสารรับอิเล็กตรอน และจุลินทรีย์ใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอกในการสร้างเซลล์ จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในกระบวนการนี้ คือ ดีไนตริฟิอิงแบคทีเรีย (Denitrification bacteria ; Denitrifier) จุลินทรีย์จะรีดิวซ์ไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification process)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นการรีดิวซ์ไนเตรทให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน แสดงดังสมการที่ 2.1 โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Facultative anaerobe ใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระในสภาวะแอน็อกซิก (Anoxic) ซึ่งเป็นสภาวะกึ่งไร้อากาศ



การหายใจแบบไร้อากาศหรือในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จะมีการใช้สารโมเลกุลอื่นในการรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์ทดแทน การใช้โมเลกุลอื่นที่ไม่ใช่ออกซิเจนอิสระขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียและชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ สารโมเลกุลอื่นๆ ที่สามารถย่อยสลายอินทรีย์ได้ เช่น ไนไตรท์และไนเตรท โดยจุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์โพลีทรูปของไนโตรเจน ตัวอย่างการย่อยสลายอินทรีย์ (เมทานอล) โดยใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะแอน็อกซิก แสดงดังสมการที่ 2.2



2.5.1 การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันทางชีวภาพ

กระบวนการในการกำจัดไนเตรทผ่านปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1.) ปฏิกิริยาไนเตรทรีดักชัน (Nitrate reduction)

ปฏิกิริยาไนเตรทรีดักชันเป็นการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 โดยมีเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทส (Nitrate reductase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไนไตรท์ที่เกิดขึ้นหากมีมากเกินไปจะไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์



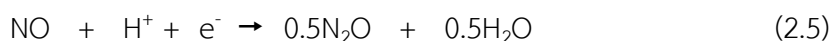
2.) ปฏิกิริยาไนไตรท์รีดักชัน (Nitrite reduction)

ปฏิกิริยาไนไตรท์รีดักชันเป็นการรีดิวซ์ไนไตรท์ให้กลายเป็นก๊าซไนตริกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 โดยมีเอนไซม์ไนไตรท์รีดักเทส (Nitrite reductase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งก๊าซไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบหากไม่เปลี่ยนเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์จะทำให้ระบบเสียหาย เนื่องจากก๊าซไนตริกออกไซด์เป็นก๊าซพิษ ซึ่งเป็นก๊าซที่ยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์



3.) ปฏิกิริยาไนตริกออกไซด์รีดักชัน (Nitric oxide reduction)

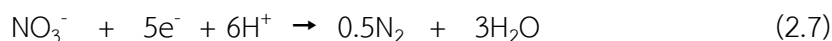
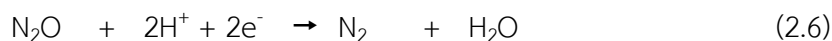
ปฏิกิริยาไนตริกออกไซด์เป็นการเปลี่ยนก๊าซไนตริกออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 โดยมีเอนไซม์ไนตริกออกไซด์รีดักเทส (Nitric oxide reductase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



4.) ปฏิกิริยาไนตรัสรีดักชัน (Nitrous reduction)

ปฏิกิริยาไนตรัสรีดักชันเป็นการเปลี่ยนก๊าซไนตรัสออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.6 โดยมีเอนไซม์ไนตรัส

ออกไซด์รีดักเทส (Nitrous oxide reductase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวมของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.7



จะเห็นได้ว่าไนเตรท 1 โมเลกุล สามารถรับอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด 5 อิเล็กตรอน ดังนั้นปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ในระบบต้องมีสารอินทรีย์คาร์บอนทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนแก่จุลินทรีย์ในระบบได้อย่างเพียงพอ

2.5.2 จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งขึ้นกับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มนั้นๆ ดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรียจัดเป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่มีบทบาทในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน จัดเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative anaerobic bacteria แบ่งย่อยออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรีย และกลุ่มออโตโทรฟแบคทีเรีย

1.) แบคทีเรียดีไนตริฟิเคชันในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic denitrifying bacteria)

ดีไนตริฟิเคชันเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรีย คือจุลินทรีย์ที่ใช้แหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (เช่น กลูโคส เมทานอล เป็นต้น) ในการสร้างพลังงานและการดำรงชีวิต ชนิดของจุลินทรีย์ขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ ลักษณะและข้อจำกัดการเดินระบบ เป็นต้น ตัวอย่างสายพันธุ์แบคทีเรียที่พบแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 จุลินทรีย์ดีไนตริฟิเคชันในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก

<i>Acinetobacter</i>	<i>Chromobacterium</i>	<i>Hyphomicrobium</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Acetobacter</i>	<i>Denitrobacillus</i>	<i>Kingella</i>	<i>Rhizobium</i>
<i>Achromobacter</i>	<i>Enterobacter</i>	<i>Methanonas</i>	<i>Rhodopseudomonas</i>
<i>Arthrobacter</i>	<i>Escherichia</i>	<i>Moraxella</i>	<i>Spirillum</i>
<i>Agrobacterium</i>	<i>Flavobacterium</i>	<i>Neisseria</i>	<i>Thiobacillus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Gluconobacter</i>	<i>Paracoccus</i>	<i>Xanthomonas</i>
<i>Corynebacterium</i>	<i>Holobacterium</i>	<i>Propionibacterium</i>	

ที่มา : Ni และคณะ (2016)

2.) แบคทีเรียดีไนตริไฟอิงในกลุ่มออโตโทรฟิก (Autotrophic denitrifying bacteria)

ดีไนตริไฟอิงออโตโทรฟแบคทีเรีย คือจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างอาหารเองได้และใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอนินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน จุลินทรีย์กลุ่มนี้ยังสามารถใช้ไฮโดรเจน (H_2) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งอาจอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยตัวอย่างสายพันธุ์แบคทีเรียที่พบแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงในกลุ่มออโตโทรฟิก

<i>Pseudomonas</i>	<i>Rhodocyclus</i>	<i>Shewanella</i>	<i>Acidovorax</i>
<i>Ochrobactrum</i>	<i>Acinetobacter</i>	<i>Aeromonas</i>	<i>Alcaligenes</i>

ที่มา : Ni และคณะ (2016)

โดยทั่วไปดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้แหล่งคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน หากระบบมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ จุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเตรท กล่าวได้ว่าดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสามารถใช้เหล็กเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเตรทได้อีกด้วย

2.5.3 สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ปัจจัยหรือสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องทำให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ อัตราส่วนซีไอต่อไนเตรท และโออาร์พี มีรายละเอียดดังนี้

- ค่าพีเอช

ค่าพีเอชที่จะทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ดีจะอยู่ระหว่าง 6.8-8.5 หากค่าพีเอชไม่ได้อยู่ในช่วงดังกล่าวจะส่งผลให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันช้าลง นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสของเม็ดพลาสติกชีวภาพเมื่อใช้เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน โดยทั่วไปในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้แหล่งอินทรีย์คาร์บอนเป็นสารละลายค่าพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงสามารถผลิตค่าสภาพต่างหรืออัลคาไลน์ออกมาทำให้น้ำมีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนกลับพบว่าค่าพีเอชจะลดลงเนื่องจากกระบวนการย่อยเม็ดพลาสติกชีวภาพทำให้ได้สารที่มีความเป็นกรดออกมา

พีเอชจึงมีค่าลดลง ทั้งนี้สารที่มีความเป็นกรดที่หลุดออกมาได้แก่ อะซิติก บิวทิริก โพรไพโอนิก และ ไอโซบิวทิริก เป็นต้น (Shen และคณะ, 2013)

- ค่าอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมระบบและส่งผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากช่วยกระตุ้นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20-35 °ซ อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีในขั้นตอนการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพ โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ทั้งในขั้นตอนไฮโดรไลซิสของเม็ดพลาสติกชีวภาพและไนเตรทรีดักชัน จากการศึกษาของ Shen และคณะ (2013) ที่ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PCL และแบ่งเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทลดลงจากร้อยละ 92.5 ที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นร้อยละ 68.7 ที่อุณหภูมิ 15 °ซ จะเห็นได้ว่าหากอุณหภูมิลดลงประสิทธิภาพการกำจัดก็จะลดลงตามไปด้วย และจากการศึกษาของ Xu และคณะ (2019) ที่ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และ PHBV เป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 10, 15, 20 และ 30 °ซ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเท่ากับร้อยละ 20, 38, 59 และ 97 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30 °ซ ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงที่สุด

- อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรท

ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรท (COD/NO₃) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ตามทฤษฎีแล้วค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 5-10 ซึ่งค่าอัตราส่วนดังกล่าวจะขึ้นกับลักษณะของน้ำเสีย ลักษณะของแหล่งคาร์บอน และกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ โดยส่วนใหญ่กลุ่มประชากรจุลินทรีย์หลักที่พบจะเป็นเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรีย ซึ่งใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอกในการสร้างเซลล์และพลังงาน สำหรับแหล่งคาร์บอนจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ ตามทฤษฎีมีการรายงานว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHB และ PCL มีค่า yield co-efficiency เท่ากับ 0.45 และอัตราส่วนของ PHB และ PCL ต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม เท่ากับ 3.03 และ 1.36 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เมทานอลและเอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีค่าเท่ากับ 2.47 และ 2.02 กรัม ตามลำดับ (Mateju และคณะ 1992)

- โออาร์พี (Oxidation reduction potential, ORP)

ค่าโออาร์พีเป็นค่าที่บอกความสามารถในการรับและการให้อิเล็กตรอนของสารละลาย และบ่งบอกถึงสถานะการมีหรือไม่มีอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย ค่าโออาร์พีมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mv) โดยหากค่าโออาร์พีเป็นบวกแสดงว่าระบบนั้นอยู่ในสภาวะมีอากาศ ให้อิเล็กตรอนได้ดี ถ้าหากค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบที่อยู่ระหว่าง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ขึ้นไปแสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะไร้อากาศ มีการให้อิเล็กตรอนได้ดี นอกจากนี้ค่าโออาร์พียังสามารถยืนยันสภาวะแอน็อกซิกหรือกึ่งไร้อากาศได้อีกด้วย ในสภาวะแอน็อกซิกจุลินทรีย์จะสามารถใช้ในเตรทและไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระ ค่าโออาร์พีที่อ่านได้จะอยู่ในช่วง -50 ถึง -150 มิลลิโวลต์

2.6 สารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยารีดอกซ์หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการให้และรับอิเล็กตรอน ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการกำจัดไนเตรทที่เกิดในสภาวะไร้อากาศ โดยมีไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจากสารอินทรีย์แล้วลดรูปเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งส่วนใหญ่ในระบบมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการกำจัดไนเตรท เพื่อกระตุ้นให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ จึงต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเพื่อเป็นแหล่งของสารให้อิเล็กตรอนในการกำจัดไนเตรท ในปัจจุบันมีการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ ทั้งในรูปของสารละลายและของแข็งสำหรับการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งรูปของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.4 สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ สำหรับการกำจัดไนเตรทในน้ำเสีย

ประเภทของสารอินทรีย์คาร์บอน	
สารละลาย	ของแข็ง
<ul style="list-style-type: none"> - เมทานอล เอทานอล อะซิติก และกลูโคส - สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย 	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุเหลือใช้ทางเกษตรกรรม เช่น แขนข้าวโพด ฟางข้าว เป็นต้น - โพลีเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA, PHB, PHBV, PBS และ PCL

2.6.1 สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวหรือสารละลาย

สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวหรือสารละลายที่นิยมใช้เป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอน ได้แก่ เมทานอล เอทานอล กลูโคส และอะซิเตท เป็นต้น ซึ่งเป็นสารให้อิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุด ในการกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากเป็นรูปที่จุลินทรีย์สามารถใช้ได้โดยง่าย โดยสารเหล่านี้สามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ทันที ดังนั้นกระบวนการกำจัดไนเตรทจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่ข้อเสียของการใช้สารอินทรีย์ในรูปนี้คือมีราคาสูง และมักมีปริมาณสารอินทรีย์หลงเหลือจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันปริมาณมาก ทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบ ยังคงมีค่าซีโอดีคังเหลืออยู่สูง

จากการทดลองของ Bill และคณะ (2009) ในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ (MBBR) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทด้วยกระบวนการชีวภาพ เมื่อใช้แหล่งอินทรีย์คาร์บอนที่ต่างกัน ได้แก่ เมทานอล เอทานอล กลีเซอรอล และซัลไฟด์ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 12 °C พบว่าระบบที่มีการใช้เอทานอล และกลีเซอรอลสามารถกำจัดไนเตรทได้ดีกว่า เมทานอล มีอัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 2.2 และ 1.9 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ และเมทานอลมีอัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 0.49 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ ในขณะที่ซัลไฟด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าสารที่กล่าวมาข้างต้น และมีอัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 3.6 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ นอกจากนี้เอทานอลและกลีเซอรอลยังส่งผลถึงการยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพและปริมาณของชีวมวลภายในระบบอีกด้วย

จากการศึกษาของ Srinandan และคณะ (2012) พบว่าเมื่อใช้อะซิเตทเป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนในระบบที่มีการสร้างฟิล์มชีวภาพ อะซิเตทมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเกือบหมดร้อยละ 100 และไม่มีการสะสมของไนไตรท์ ในขณะที่กลูโคสและเมทานอลสามารถกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 90 และ 72 ตามลำดับ โดยมีการสะสมของไนไตรท์และแอมโมเนียในระบบ สารทั้งสองที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยสนับสนุนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มแอมโมนิไฟอิงแบคทีเรีย ส่งผลขัดขวางให้การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีประสิทธิภาพต่ำลง

2.6.2 สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็ง

สารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในสถานะของแข็งสามารถนำมาใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ โดยส่วนใหญ่มักเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือสารสังเคราะห์จากธรรมชาติดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.5 ได้แก่ เศษไม้ ฟางข้าว กระดาษหนังสือพิมพ์ และเม็ดพลาสติก

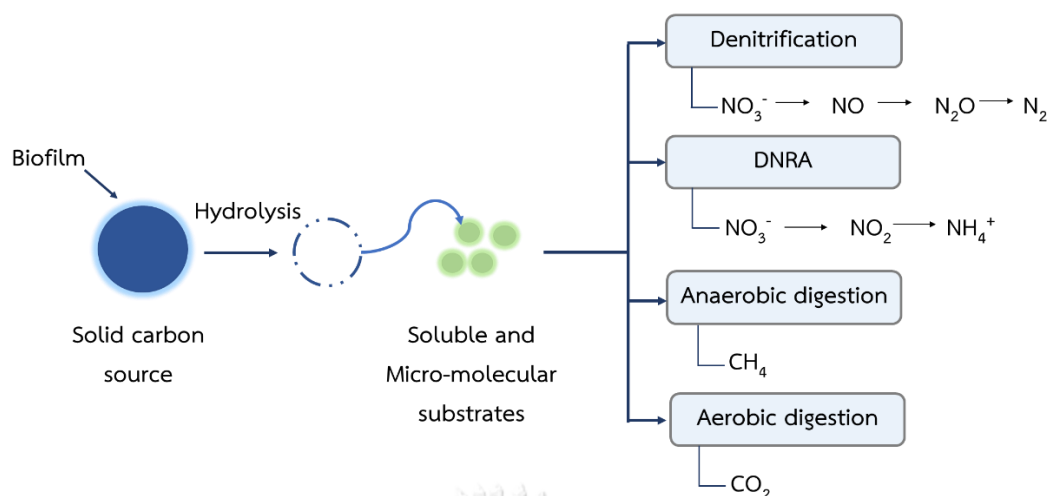
ชีวภาพ เป็นต้น สารอินทรีย์คาร์บอนหรือวัสดุชีวภาพเหล่านี้มักถูกเรียกว่า solid carbon source มีสมบัติละลายน้ำได้เล็กน้อยและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ 2.5 ประเภทของอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็งจากธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น

	Solid carbon source	
	วัสดุจากธรรมชาติ	โพลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้
ตัวอย่างที่ใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน	เศษไม้ แกลบ สาหร่าย กระจดาช หนังสือพิมพ์ ใบไม้ ฟางข้าว แกนข้าวโพด ใบสน เปลือกต้นไม้	PHAs (PHB, PHBV), PCL, PBS และ PLA
ข้อดี	ราคาถูก และหาได้ทั่วไป	อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชัน ดีมาก และมี DOC หลุดออกมาน้อย
ข้อเสีย	มี DOC หลุดออกมาเยอะ และน้ำมีสี เกิดขึ้น อัตราการเกิด ปฏิกิริยา ดีในตรีฟิเคชันต่ำ	ราคาสูง

ที่มา : Wang Chu (2016)

เม็ดพลาสติกชีวภาพมีสมบัติในการเอื้อต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพ การย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพอาศัยกลไกการย่อยโดยใช้เอนไซม์ เช่น เอนไซม์ไลเปส หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ รา เป็นต้น ในการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน จะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ กระบวนการ Depolymerization เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของโพลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออกได้เป็นโมโนเมอร์ และ โอลิโกเมอร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถย่อยได้ง่ายขึ้น และเมื่อสารเหล่านี้อยู่ในสภาวะมีอากาศจะถูกย่อยซึ่งจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะไร้อากาศจะได้ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กระบวนการที่สองคือ Mineralization เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นอนินทรีย์ เช่นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนมากมักถูกย่อยโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงเพื่อรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นไนโตรท์ ไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และสุดท้ายกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนตามลำดับ (Wang and Chu, 2016) นอกจากนี้ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอาจพบการเกิดปฏิกิริยา Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) ควบคู่ไปด้วย โดยจากการศึกษาของ Gibert และคณะ (2008) พบว่า DNRA เป็นปัจจัยรองที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนเตรท และเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 4-10 ของการกำจัดไนเตรท รูปที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการเกิดดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Wang Chu (2016))

ในปัจจุบันมีการศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพหลายชนิดในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรท ตัวอย่าง เม็ดพลาสติกชีวภาพที่นิยม ได้แก่ Polycaprolactone (PCL), Polylactic acid (PLA), Polyhydroxybutyrate (PHB), Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) และ Polybutylene succinate (PBS) เป็นต้น (Wu และคณะ, 2013) เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพเหล่านี้มีสมบัติของการเป็นวัสดุยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพ (Biofilm carrier) ได้ดีและเป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์อีกด้วย ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.3 ข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้อินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวและของแข็ง

สารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีทั้งในรูปของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้อินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลวและของแข็ง

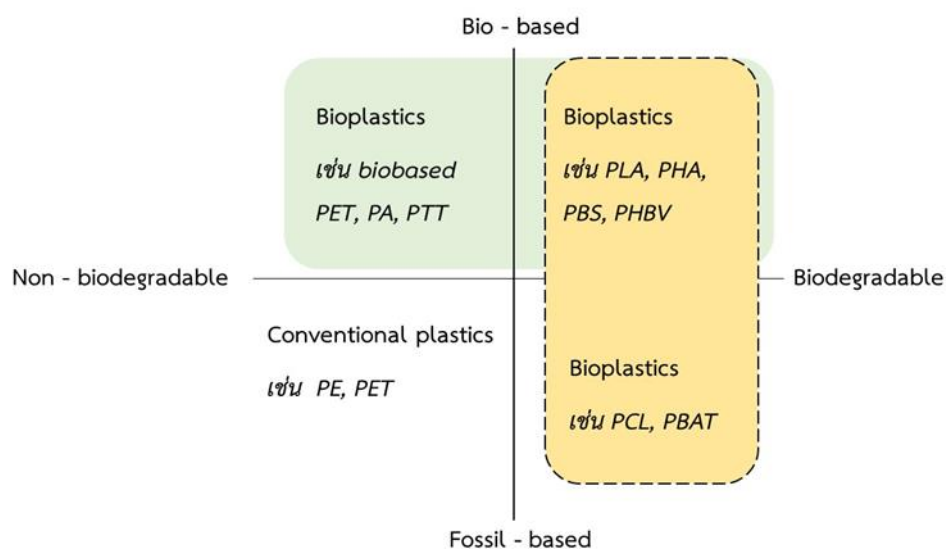
ประเภทอินทรีย์คาร์บอน	อินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลว	อินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็ง
ข้อดี	- จุลินทรีย์สามารถใช้ได้ทันที	- ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งมีค่าต่ำ เนื่องจากไม่ละลายน้ำ - เอื้อต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพ
ข้อเสีย	- ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งมีค่าสูงทำให้น้ำทิ้งมี คุณภาพต่ำลง - สารบางชนิดเช่น เมทานอล เอทานอล มีข้อจำกัดในการเก็บรักษา และการขนส่ง เนื่องจากจัดอยู่ในกลุ่มสารอันตราย	- ราคาสูง

2.7 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

พลาสติกชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากปิโตรเลียม (Fossil based) แหล่งที่มาของวัตถุดิบได้มาจากถ่านหิน น้ำมันดิบ เป็นต้น ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ในขณะที่พลาสติกชีวภาพจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ (Bio-based) สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกขึ้นมาทดแทนใหม่ได้ โดยส่วนใหญ่มาจากการเกษตร เช่น แป้งและน้ำตาล ได้มาจากข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย มันเทศ เป็นต้น พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งมีข้อจำกัดในเรื่องของความชื้น หากโดนความชื้นจะส่งผลให้พลาสติกชีวภาพมีการพองตัว ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาล น้ำตาลถูกเปลี่ยนให้เป็นโมโนเมอร์ เช่น Succinic acid, Lactic acid, 1,4 Butanediol จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีจนได้สารชีวภาพที่มีโครงสร้างต่อกันเป็นสายยาวหรือที่เรียกว่าโพลีเมอร์ เช่น Polylactic acid (PLA), Polybutylene succinate (PBS) เป็นต้น (ศศิพงค์ สุนทรเต็ม, 2555) การจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพแสดงดังรูปที่ 2.5 มีรายละเอียดดังนี้

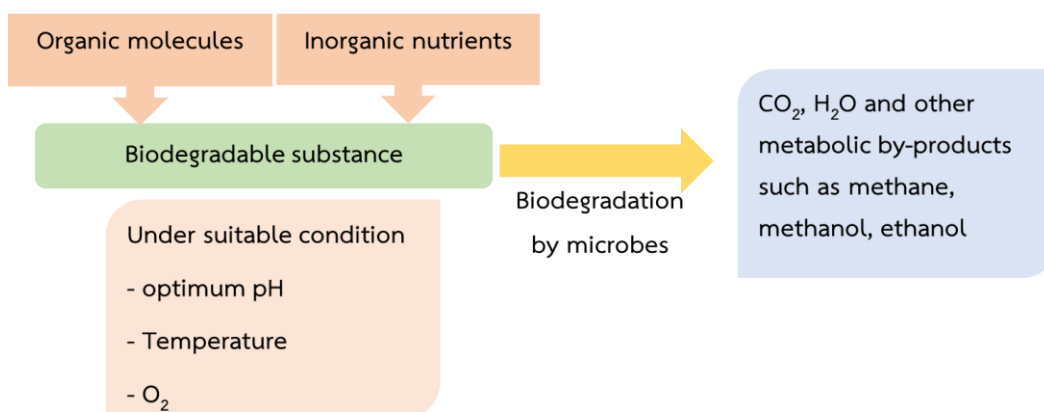
- กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มของพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ แต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ได้แก่ PET, PA และ PTT
- กลุ่มที่ 2 คือกลุ่มของพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ PLA, PHA, PBS และ PHBV
- กลุ่มที่ 3 คือกลุ่มของพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากสารกลุ่มปิโตรเลียม แต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ได้แก่ PP และ PET

- กลุ่มที่ 4 คือกลุ่มของพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากสารกลุ่มปิโตรเลียม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ PBAT และ PCL



รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพ
(ที่มา : Ashter (2016))

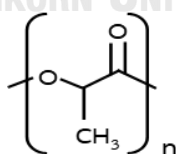
กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นการย่อยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการแตกตัวของพันธะ โดยการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลติก (Hydrolytic degradation) หรืออาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย รา ยีสต์ และเอนไซม์ ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน เป็นต้น จากนั้นจะทำการขนส่งสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากการย่อยสลายเข้าสู่ภายในเซลล์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายทางชีวภาพคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ และชีวมวล กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพโดยจุลินทรีย์
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ashter (2016))

2.7.1 Polylactic acid (PLA)

PLA มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกโพลีเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการนำพืชมาบดหรือโมให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) ผ่านกระบวนการทางเคมีได้ Lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) กลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นโพลิเมอร์ โครงสร้างทางเคมีของ PLA แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ PLA

- สมบัติทางกายภาพและเคมีของ PLA

- สมบัติทางกายภาพ มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.24 มีลักษณะโปร่งใส มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณร้อยละ 37 และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) อยู่ระหว่าง 60-65 °ซ มีสมบัติการขวางกั้น (Barrier properties)

ได้ดี และสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) ได้ มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว ประมาณ 130-160 °ซ ดังตารางที่ 2.7

- สมบัติทางเคมี พลาสติกชีวภาพ PLA มีสมบัติละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่ม Chlorinated หรือ Fluorinated organic, Dioxane และ Acetone เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของ PLA

สมบัติ	หน่วย	ค่าจำเพาะ
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm ³	1.24
Modulus of Elasticity	MPa	524
Elongation	%	6
Melting temperature	°C	130-160
Glass transition temperature	°C	55-60

ที่มา : Rudnik (2019)

- ข้อดีและข้อเสียของ PLA

- ข้อดี

1. วัตถุดิบมาจากผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนได้
2. สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ
3. มีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในระดับสูงพอสมควร (130-160 °ซ)

- ข้อเสีย

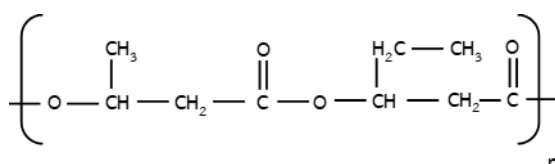
1. มีลักษณะแข็งและเปราะบาง
2. ไม่ทนความร้อน
3. ราคาแพงเมื่อเทียบกับราคาเม็ดพลาสติกทั่วไป

2.7.2 Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)

ในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้และมีปริมาณความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงพลาสติกชีวภาพที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม และการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เช่น Polyhydroxyalkanoates (PHAs) จัดเป็นพลาสติกชีวภาพที่อยู่ใน

กลุ่มของโพลีเอสเทอร์ สังเคราะห์มาจากแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะสะสม PHA ไว้ภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนและพลังงาน และเซลล์จะถูกกระตุ้นเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่สมดุลหรืออาหารไม่เพียงพอ ในปี ค.ศ. 1925 นาย Lemoigne นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสเป็นคนแรกที่ค้นพบ PHA ในแบคทีเรีย *Bacillus megaterium* ในรูปของ PHB (Polyhydroxybutyrate) (Chee และคณะ, 2010) PHB มีสมบัติทางกายภาพคล้ายกับโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากปิโตรเลียม เช่น PP นอกจากนี้ยังไม่มีความเป็นพิษและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในปัจจุบัน PHA มีมากกว่า 150 ชนิด ซึ่งโดยทั่วไป PHA จะอยู่ในรูปของ PHB (Polyhydroxybutyrate) และ PHO (Polyhydroxyoctanoate) สามารถที่จะนำ PHA แต่ละชนิดมารวมกันเพื่อพัฒนาสมบัติของพลาสติกชีวภาพให้มีความหลากหลายและสามารถใช้ได้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จึงสามารถจำแนก PHA ได้จากขนาดความยาวของโมโนเมอร์ โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ โมโนเมอร์สายสั้น (Short Chain Length, SCL) ประกอบด้วยคาร์บอน C3-C5 เช่น PHB กลุ่มที่สองคือโมโนเมอร์สายกลาง (Medium Chain Length, MCL) ประกอบด้วยคาร์บอน ตั้งแต่ C5 - C14 เช่น 3-hydroxybutyrate (3HB), 3-hydroxyvalerate (3HV), Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) เป็นต้น และกลุ่มสุดท้ายคือโมโนเมอร์สายยาว (Long Chain Length, LCL) ประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ C14 ขึ้นไป เช่น Poly-3-hydroxyoctadecanoate P(3HHD) (Raza และคณะ, 2018) โดยในบรรดาพลาสติกชีวภาพที่กล่าวมาทั้งหมดนี้พลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นที่นิยมและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งรายละเอียดของ PHBV มีดังต่อไปนี้

PHBV หรือ PHB เป็นพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากการนำ 3-hydroxybutyrate (3HB) และ 3-hydroxyvalerate (3HV) มาต่อเป็นอะลิฟาติกโพลีเอสเทอร์ มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.8 PHBV ไม่มีความเป็นพิษ และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละ 100)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ PHBV

- สมบัติทางกายภาพและเคมีของ PHBV

- สมบัติทางกายภาพ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.25 มีความเป็นผลึกสูง สามารถทนต่อรังสียูวี แอลกอฮอล์ ไขมันและน้ำมันได้ อย่างไรก็ตาม PHBV มีลักษณะแข็งแต่เปราะง่าย และมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับ PHB

- สมบัติทางเคมี PHBV มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายกลุ่ม Chlorinated มีความหนืดสูงเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของ PHBV

สมบัติ	หน่วย	ค่าจำเพาะ
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm ³	1.25
Modulus of Elasticity	GPa	2.38
Elongation	%	1.4
Melting temperature	°C	153
Glass transition temperature	°C	-1

ที่มา : Rudnik (2019)

- การย่อยสลายทางชีวภาพของ PHBV

การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตหรือจุลินทรีย์ พลาสติกชีวภาพจะต้องมีสมบัติที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในกระบวนการเมตาบอริซึมได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ พีเอช ความชื้น ออกซิเจน แสง น้ำหนักโมเลกุล และกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำหนักโมเลกุลเป็นปัจจัยที่สำคัญสามารถบอกถึงความยาวของโพลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นถ้าพลาสติกชีวภาพมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดได้เร็วขึ้น และที่น้ำหนักโมเลกุล 105 กิโลดาลตันขึ้นไปจะไม่เหมาะต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV สามารถย่อยได้ทั้งในดิน น้ำ และปุ๋ย จากการศึกษาอื่นๆ พบว่าการย่อยสลายของ PHBV ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลและการย่อยสลายเกิดขึ้นบนพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพเท่านั้น (Shabina และคณะ 2015) อย่างไรก็ตามมีการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายทางชีวภาพระหว่าง PHBV และ PHB พบว่า PHBV สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่า PHB ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 °ซ (Braga และคณะ 2018)

- ข้อดีและข้อเสียของ PHBV

- ข้อดี

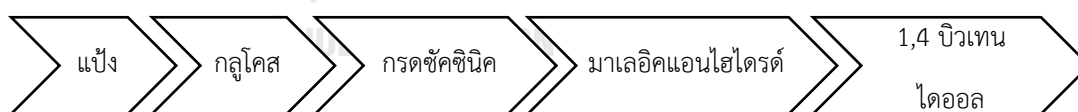
1. เป็นทรัพยากรที่สามารถทดแทนได้ เนื่องจากเกิดขึ้นจากกระบวนการหมักตาบอริซิมของจุลินทรีย์
2. สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

- ข้อเสีย

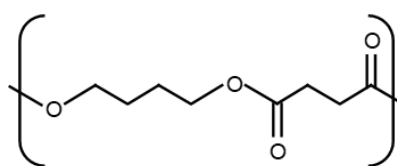
1. มีความเปราะบาง
2. ต้นทุนในการผลิตสูง

2.7.3 Polybutylene succinate (PBS)

PBS มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกโพลีเอสเตอร์และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในระยะแรกสังเคราะห์ขึ้นจากกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เมื่อเวลาผ่านไปได้มีการพัฒนาโดยสังเคราะห์จากวัตถุดิบทางธรรมชาติ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาลให้เป็นกรดซัคซินิก กรดซัคซินิกที่ได้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์ 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังรูปที่ 2.9 จากนั้นสารโมโนเมอร์ทั้งสอง ได้แก่ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเตรียมโมโนเมอร์เพื่อนำไปผลิตเป็น PBS



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ PBS

- สมบัติทางกายภาพและเคมีของ PBS

- สมบัติทางกายภาพ มีความถ่วงจำเพาะ 1.26 มีความเป็นผลึกสูงและสามารถทนความร้อนได้ถึง 200 °ซ และสามารถย่อยสลายได้ดีกว่า PLA มีคุณสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับโพลีเอทิลีนและมีความแข็งแรงมากกว่า PLA จึงนิยมใช้ผสมกันเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและลดความเปราะของพลาสติก PBS มีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 110 °ซ

- สมบัติทางเคมี PBS มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในตัวทำละลายกลุ่ม Chlorinated

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของ PBS

สมบัติ	หน่วย	ค่าจำเพาะ
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm ³	1.26
Modulus of Elasticity	MPa	550
Elongation	%	450
Melting temperature	°C	110
Glass transition temperature	°C	-24

ที่มา : Adamopoulou (2012)

- ข้อดีและข้อเสียของ PBS

- ข้อดี

1. สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ
2. ช่วยลดต้นทุนการผลิตพลาสติก
3. วัตถุดิบที่นำมาใช้สามารถทดแทนได้

- ข้อเสีย

1. ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง

2.7.4 เทคนิคการวิเคราะห์พลาสติกชีวภาพ

สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของพลาสติกชีวภาพ สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 เทคนิควิเคราะห์และติดตามการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพโดยจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์	ที่มา
ทางเคมี		
- Molecular weight (MW) Distribution	- Liquid chromatography - Gel permeation chromatography	Chu Wang (2013)
- Total organic compound (TOC)	- TOC analyzer	
- กลุ่มฟังก์ชันของพลาสติกหลังการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์	- FT-IR spectrometer	
- Composition C H N	- CHN analysis	
ทางกายภาพ		
- Bioplastic surface	- SEM	Xu และคณะ (2011)
- Mass loss rate (MLR)	- Weight measurement	

2.7.5 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้พลาสติกชีวภาพเป็นสารอินทรีย์สำหรับการกำจัดไนเตรท

ลักษณะของน้ำเสียและชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่ต่างชนิดกันจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรท (COD:NO₃⁻) ที่เหมาะสมต่อการกำจัดไนเตรทแตกต่างกัน ทั้งนี้เม็ดพลาสติกชีวภาพสามารถใช้เป็นแหล่งของสารให้อิเล็กตรอนเพื่อกำจัดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมการสมดุลมวลรวมของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.11 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

PLA	R _d	$0.1C_3H_4O_2 + 0.4H_2O \rightarrow 0.3CO_2 + H^+ + e^-$	3.9
	R _a	$(1/5)NO_3^- + (6/5)H^+ + e^- \rightarrow (1/10)N_2 + (3/5)H_2O$	3.10
	R _c	$(5/28)CO_2 + (1/28)NO_3^- + (29/28)H^+ + e^- \rightarrow (1/28)C_5H_7O_2N + (11/28)H_2O$	3.11
	f _e R _a	$0.114NO_3^- + 0.684H^+ + 0.57e^- \rightarrow 0.057N_2 + 0.342H_2O$	3.12
	f _s R _c	$0.077CO_2 + 0.015NO_3^- + 0.445H^+ + 0.43e^- \rightarrow 0.015C_5H_7O_2N + 0.169H_2O$	3.13
สมดุลมวลรวม		$0.1C_3H_4O_2 + 0.129NO_3^- + 0.129H^+ \rightarrow 0.057N_2 + 0.015C_5H_7O_2N + 0.222CO_2 + 0.111H_2O$	3.14

จากสมการสมดุลมวลรวมตั้งสมการที่ 3.14 สามารถคำนวณปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม ได้ดังนี้

คำนวณมวลของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA

$$0.1 = \frac{m_{\text{PLA}}}{MW_{\text{PLA}}}$$

$$0.1 = \frac{m_{\text{PLA}}}{72}$$

$$m_{\text{PLA}} = 7.2$$

คำนวณปริมาณไนเตรท

$$0.129 = \frac{g\text{NO}_3^-}{MW_{\text{NO}_3^-}}$$

$$0.129 = \frac{g\text{NO}_3^-}{62}$$

$$g\text{NO}_3^- = 7.998$$

นั่นคือการกำจัดไนเตรท 7.998 กรัม จะใช้ PLA 7.2 กรัม ดังนั้นการกำจัดไนเตรท 1 กรัม จะใช้ PLA 0.9 กรัม (เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพียงอย่างเดียว)

ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

PHBV	R_d	$0.055\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2 + 0.333\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.222\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^-$	3.15
3HB			
3HV	R_d	$0.041\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2 + 0.333\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.208\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^-$	3.16
	R_a	$(1/5)\text{NO}_3^- + (6/5)\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow (1/10)\text{N}_2 + (3/5)\text{H}_2\text{O}$	3.17
	R_c	$(5/28)\text{CO}_2 + (1/28)\text{NO}_3^- + (29/28)\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow (1/28)\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + (11/28)\text{H}_2\text{O}$	3.18
	$f_e R_a$	$0.114\text{NO}_3^- + 0.684\text{H}^+ + 0.57\text{e}^- \rightarrow 0.057\text{N}_2 + 0.342\text{H}_2\text{O}$	3.19
	$f_3 R_c$	$0.077\text{CO}_2 + 0.015\text{NO}_3^- + 0.445\text{H}^+ + 0.43\text{e}^- \rightarrow 0.015\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 0.169\text{H}_2\text{O}$	3.20
สมดุลมวลรวม 3HB		$0.055\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2 + 0.129\text{NO}_3^- + 0.129\text{H}^+ \rightarrow 0.057\text{N}_2 + 0.015\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 0.145\text{CO}_2 + 0.178\text{H}_2\text{O}$	3.21
สมดุลมวลรวม 3HV		$0.041\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2 + 0.129\text{NO}_3^- + 0.129\text{H}^+ \rightarrow 0.057\text{N}_2 + 0.015\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 0.131\text{CO}_2 + 0.178\text{H}_2\text{O}$	3.22

จากสมการสมดุลมวลรวมดังสมการที่ 3.21 และ 3.22 สามารถคำนวณปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม ได้ดังนี้

คำนวณมวลของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV

$$0.55 = \frac{m_{3HB}}{MW_{3HB}}$$

$$0.55 = \frac{m_{3HB}}{86}$$

$$m_{3HB} = 4.73$$

$$0.041 = \frac{m_{3HV}}{MW_{3HV}}$$

$$0.041 = \frac{m_{3HV}}{100}$$

$$m_{3HV} = 4.1$$

คำนวณปริมาณไนเตรท

$$0.129 = \frac{gNO_3^-}{MW_{NO_3^-}}$$

$$0.129 = \frac{gNO_3^-}{62}$$

$$gNO_3^- = 7.998$$

การกำจัดไนเตรท 7.998 กรัม จะใช้ 3HB 4.73 กรัม ดังนั้นการกำจัดไนเตรท 1 กรัม จะใช้ 3HB 0.59 กรัม

การกำจัดไนเตรท 7.998 กรัม จะใช้ 3HV 4.1 กรัม ดังนั้นการกำจัดไนเตรท 1 กรัม จะใช้ 3HV 0.51 กรัม

แต่เนื่องจากพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ประกอบด้วย 3HB 99% และ 3HV 1% (Xu และ คณะ, 2018) พลาสติกชีวภาพ PHBV 1 เม็ด หนักประมาณ 0.02 กรัม จากการคำนวณมี 3HB ประมาณ 0.0198 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดไนเตรทได้ 0.03 กรัม และ 3HV มีปริมาณน้อยมากจึงไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 2.13 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

PBS	Rd	$0.027\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}_4 + 0.333\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.222\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^-$	3.23
	Ra	$(1/5)\text{NO}_3^- + (6/5)\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow (1/10)\text{N}_2 + (3/5)\text{H}_2\text{O}$	3.24
	Rc	$(5/28)\text{CO}_2 + (1/28)\text{NO}_3^- + (29/28)\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow (1/28)\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + (11/28)\text{H}_2\text{O}$	3.25
	feRa	$0.114\text{NO}_3^- + 0.684\text{H}^+ + 0.57\text{e}^- \rightarrow 0.057\text{N}_2 + 0.342\text{H}_2\text{O}$	3.26
	fsRc	$0.077\text{CO}_2 + 0.015\text{NO}_3^- + 0.445\text{H}^+ + 0.43\text{e}^- \rightarrow 0.015\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 0.169\text{H}_2\text{O}$	3.27
สมมูลมวล		$0.027\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}_4 + 0.129\text{NO}_3^- + 0.129\text{H}^+ \rightarrow 0.057\text{N}_2 + 0.015\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} +$	3.28
รวม		$0.145\text{CO}_2 + 0.178\text{H}_2\text{O}$	

จากสมการสมมูลมวลรวมตั้งสมการที่ 3.28 สามารถคำนวณปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพ ชนิด PBS ต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม ได้ดังนี้

คำนวณมวลของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS

$$0.027 = \frac{m_{\text{PBS}}}{\text{MW}_{\text{PBS}}}$$

$$0.027 = \frac{m_{\text{PBS}}}{172}$$

$$m_{\text{PBS}} = 4.644$$

คำนวณปริมาณไนเตรท

$$0.129 = \frac{g\text{NO}_3^-}{\text{MW}_{\text{NO}_3^-}}$$

$$0.129 = \frac{g\text{NO}_3^-}{62}$$

$$g\text{NO}_3^- = 7.998$$

นั่นคือการกำจัดไนเตรท 7.998 กรัม จะใช้ PBS 4.644 กรัม ดังนั้นการกำจัดไนเตรท 1 กรัม จะใช้ PBS 0.58 กรัม (เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพียงอย่างเดียว)

จากการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้แหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนแต่ละชนิดข้างต้น ได้ผลดังสรุปในตารางที่ 2.14 ซึ่งเมื่อพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมจากสมการ

จะเห็นได้ว่าหากใช้ชนิดของคาร์บอนอินทรีย์ที่แตกต่างกันสัดส่วนปริมาณสารอินทรีย์ที่ใช้เพื่อการกำจัดไนเตรทก็จะแตกต่างกัน จึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่ต่างกันอีกด้วย

ตารางที่ 2.14 สัดส่วนปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพที่สมมูลต่อการกำจัดไนเตรท 1 กรัม

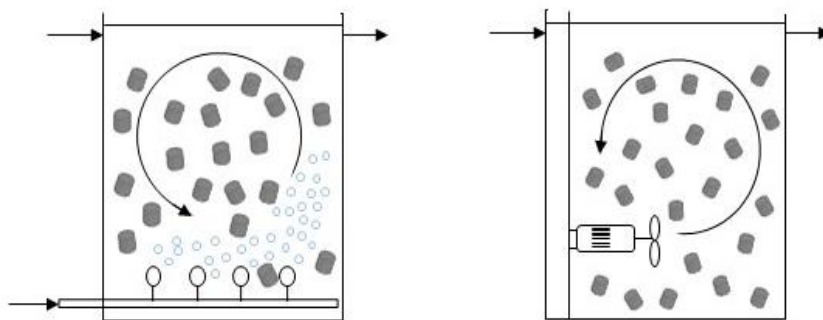
เม็ดพลาสติกชีวภาพ	ไนเตรท (กรัม/ลิตร)	น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพ (กรัม)
PLA	1	0.9
PHBV	1	0.59
PBS	1	0.58

2.8 ระบบแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ (Anoxic moving bed system)

ระบบแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ที่เป็นรูปแบบการบำบัดที่ใช้กำจัดไนเตรทออกจากน้ำเสียตัวกลางที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ถูกทำให้ขยับและเคลื่อนที่ตลอดเวลาเพื่อสัมผัสกับน้ำเสียระหว่างการเดินทางในระบบบำบัด โดยต้องควบคุมให้ภายในถังปฏิกรณ์มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายในระบบต่ำ เพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเตรท ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการกำจัดไนเตรทถูกยับยั้งและเกิดขึ้นช้าลง

2.8.1 ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ (Moving bed bioreactor)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1990 ที่ประเทศนอร์เวย์ ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกพัฒนามาจากถังปฏิกรณ์ 2 รูปแบบที่สำคัญ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์แอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge reactor) และถังกรองชีวภาพ (Biofilter reactor) โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่ที่แตกต่างกับสองรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น คือ ไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์กลับเข้ามาในระบบ ไม่ต้องมีการควบคุมค่า F/M ratio และ MLSS นอกจากนี้จุดเด่นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่คือมีการบรรจุวัสดุตัวกลาง (Media) เพื่อเป็นพื้นผิวให้เกิดการเกาะติดของจุลชีพ (Attachment surface) ทำให้ตะกอนหลุดออกจากระบบน้อยลง และยังประหยัดพลังงานอีกด้วย ทั้งนี้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่ที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้ทั้งสภาวะเติมอากาศ แอน็อกซิก และแบบไม่ใช้อากาศ แสดงดังรูปที่ 2.11



ก) แบบเติมอากาศ

ข) แบบแอน็อกซิกและแบบไม่ใช้อากาศ

รูปที่ 2.11 รูปแบบของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศตัวกลางจะขยับตัวและเคลื่อนที่ตลอดเวลาเมื่อมีการเติมอากาศ โดยตัวกลางจะเคลื่อนไปตามฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระบบ ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอน็อกซิกและแบบไม่ใช้อากาศจะใช้อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการกวนผสมหรือการเวียนน้ำแทน ซึ่งจะทำให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ภายในถัง การบรรจุตัวกลางลงในถังปฏิกรณ์เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะของจุลินทรีย์และยังช่วยให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียได้มากขึ้น

2.8.2 การเลือกตัวกลางสำหรับถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

ในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวกลางสำหรับใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียชนิดเบดเคลื่อนที่หลายชนิด ตัวกลางที่นิยมใช้ เช่น ตัวกลางที่ผลิตจาก HDPE ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.95 กรัม/ลบ.ซม. มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-10 มม. ลักษณะของตัวกลางมีหลากหลายรูปร่าง ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ตัวกลางที่เลือกใช้จะต้องไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะ และสร้างฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางได้ นอกจากนี้การเลือกตัวกลางนั้นยังขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่ต้องการบำบัดอีกด้วย โดยรูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของตัวกลางประเภทต่างๆ ที่ใช้ในระบบบำบัดชนิดเบดเคลื่อนที่



ก) HDPE



ข) HDPE



ค) PVA gel

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างตัวกลางประเภทต่างๆ ที่ใช้ในระบบบำบัดชนิดเบดเคลื่อนที่

2.8.3 ระยะเวลาที่น้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) และกระบวนการดีไนโตรฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

ระยะเวลาที่น้ำ คือ ระยะเวลาที่น้ำถูกกักเก็บไว้ในถังปฏิกรณ์ และเกิดกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ นอกจากนี้ระยะเวลาที่น้ำยังนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบบำบัด เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างสูงสุด

จากการศึกษาของ Yuan และคณะ (2015) เมื่อใช้ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรท โดยทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวกลางที่แตกต่างกัน ได้แก่ Polyethylene, Polypropylene, Polyurethane foam และ Haydite carriers โดยน้ำเสียมีลักษณะดังนี้ พีเอช ในช่วง 7.2-8.0 อุณหภูมิเท่ากับ 24-26 °C ระยะเวลาที่น้ำ (HRT) 12 ชม. เติมน้ำตาลเป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอน 25.5 มก./ล. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6-15.4 มก./ล. และปริมาณไนเตรทมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-12.6 มก./ล. เมื่อเติมตัวกลางในระบบพบว่าตัวกลาง Polyethylene มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดและอัตราการกำจัดไนเตรทเท่ากับร้อยละ 44.9±19.1 และ 83.4±13.0 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นๆ โดยปริมาณต่ำสุดของไนโตรเจนทั้งหมดและไนเตรทในน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดแล้วมีค่าเท่ากับ 1.6 และ 0.1 มก./ล. ตามลำดับ

จากการศึกษาของ Chu Wang (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ คือ PCL เป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางเพื่อให้เกิดการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพในการกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย เติมน้ำตาลที่สภาวะอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรททั้งหมดเท่ากับร้อยละ 74.6 ที่ระยะเวลาที่น้ำเท่ากับ 18.5 ชม. และปริมาณดีไอซีมีค่าน้อยกว่า 2.3 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่มีค่าประมาณร้อยละ 86 นอกจากนี้ยังควบคุมพีเอชในระบบให้เท่ากับ 7.5±0.2 เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและอินทรีย์คาร์บอนในระบบ ภายใต้สภาวะที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ

จากการศึกษาของ Yuan และคณะ (2015) ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรทที่คงอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานบำบัดน้ำเสียหยงเฟิง เมืองปักกิ่ง ประเทศจีน ทำการเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่ (MBBR) โดยเปรียบเทียบตัวกลาง 4 ชนิด ได้แก่ polyethylene, polypropylene, polyurethane foam, และ haydite ในการเดินระบบนี้พารามิเตอร์ที่ควบคุมได้แก่ พีเอชมีค่า 7.2-8 อุณหภูมิ 24-26 °C และระยะเวลาที่น้ำเท่ากับ 12 ชม. และน้ำทิ้งจากโรงงานมีปริมาณไนเตรทเท่ากับ 0.2-12.6 มก./ล.

พบว่าระบบบำบัดแบบเบดเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง สามารถกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งได้ถึงร้อยละ $83.4 \pm 13.0\%$

วนิดา ห่อคำ (2554) ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่บรรจุเม็ดยางเป็นตัวกลาง เปรียบเทียบอัตราส่วนของซีโอดีต่อไนเตรทที่แตกต่างกันได้แก่ 2:1, 5:1, 10:1 และ 15:1 โดยควบคุมความเข้มข้นของไนเตรทน้ำเข้าระบบเท่ากับ 100 มก./ล. และมีระยะเวลาพักน้ำเท่ากับ 8 ชม. พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทร้อยละ 95 96 96 และ 96 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 78, 78, 73, และ 75 ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทที่ 2:1 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากใช้สารอินทรีย์คาร์บอนต่ำสุด และมีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูง

2.9 จลนพลศาสตร์ของการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ขึ้นกับการทำงานของจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มฟาซิลเททีฟแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ ดังนั้นถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบจุลินทรีย์จะเลือกใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ถ้าไม่มีออกซิเจนในระบบจุลินทรีย์จะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทน เมื่อจุลินทรีย์ใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่าสภาวะแอน็อกซิก และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการหายใจสภาวะแบบมีอากาศหรือแอโรบิกต่อมวลสารอาหารที่เท่ากัน พบว่ามีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากการหายใจในสภาวะแอน็อกซิก ดังนั้นจึงต้องระวังไม่ให้มีออกซิเจนมารบกวนในระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์จะใช้ ออกซิเจนในการสันดาปอาหารก่อน ส่งผลให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดช้าลงหรือไม่เกิดขึ้นเลย

จลนพลศาสตร์ของการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันคล้ายกับการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนและออกซิไดซ์แอมโมเนียในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบและทำนายประสิทธิภาพของระบบได้ โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

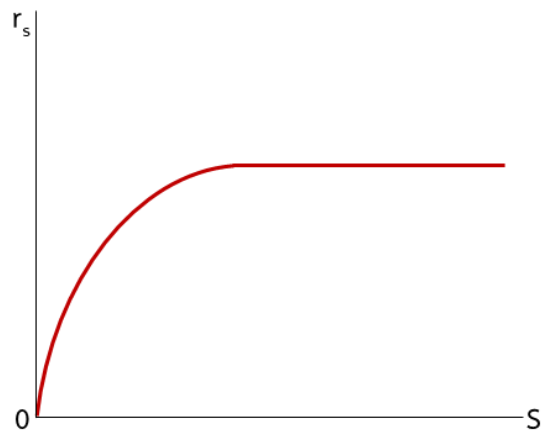
2.9.1 รูปแบบสมการจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

- สมการโมนอด (Monod equation)

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะมีสับสเตรทอยู่สองชนิด คือไนเตรทและอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนมีแหล่งที่มาจกภายนอก เช่น เมธานอล เอทานอล หรือใช้น้ำเสียมาเป็นแหล่งคาร์บอน มาเติมในระบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการจำกัดของสับสเตรท ซึ่งสารเหล่านี้จำเป็นต่อจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก เป็นจุลินทรีย์ที่พบเป็นปกติทั่วไป มีบทบาทในการย่อยสลายสารคาร์บอนอินทรีย์ภายใต้สภาวะแอน็อกซิก และยังทำหน้าที่เป็นจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟิอิงในการเปลี่ยนรูปไนเตรทเป็นก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นจึงได้สมการโมนอดรวมของดีไนตริฟิเคชัน ดังนี้

$$r_{su} = \left[\frac{\mu_{H,max} \cdot S_s}{Y_H (K_s + S_s)} \right] \left[\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right] \eta X_H \quad (3.29)$$

เมื่อ	r_{su}	=	อัตราการกำจัดไนเตรท (ก./ลบ.ม.-วัน)
	Y_H	=	ยิลด์ของเฮเทอโรโทรปที่เป็นดีไนตริฟิอิงแบคทีเรีย (ก.ชีวมวล/ก.ซีไอดี)
	$\mu_{H,max}$	=	อัตราการโตจำเพาะของดีไนตริฟิอิง (ก.ชีวมวลที่ผลิตได้/วัน/ก.ของดีไนตริฟิอิง, วัน ⁻¹)
	S_s	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอน เช่น ซีไอดี หรือ บีไอดี (ก.ซีไอดี/ลบ.ม.)
	K_s	=	ปริมาณสารอาหารที่ทำให้จุลินทรีย์โตเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการโต (ก.ซีไอดี/ลบ.ม.)
	S_{NO}	=	ความเข้มข้นไนเตรท (ก./ลบ.ม.)
	K_{NO}	=	ความเข้มข้นของสับสเตรทไนเตรทที่อัตราการโตจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการโตจำเพาะสูงสุด (ก./ลบ.ม.)
	η	=	สัดส่วนของการย่อยสลายอาหารเมื่อไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน
	X_H	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์เฮเทอโรโทรป (ก./ลบ.ม.)



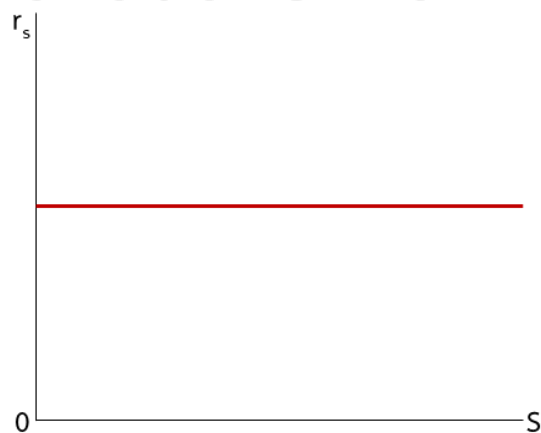
รูปที่ 2.13 กราฟสมการโมนอด

- สมการอันดับศูนย์ (Zero order equation)

สมการอันดับศูนย์ คือ ปฏิกิริยาที่มีอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่ ไม่แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารใดๆ ลักษณะของกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่เป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ดังรูปที่ 2.14 และตั้งสมการที่ 3.30

$$r_0 = k_0 S_0 \quad (3.30)$$

โดย r_0 = อัตราการบำบัดจำเพาะ (มก./ล.-วัน)
 k_0 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์
 S_0 = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาออก (มก./ล.)



รูปที่ 2.14 กราฟสมการอันดับศูนย์

- สมการอันดับหนึ่ง (First order equation)

สมการอันดับหนึ่ง คือ คือ ปฏิกริยาที่มีอัตราการบำบัดจำเพาะแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ลักษณะของกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และสมการที่ 3.31

$$r_1 = -k_1 S_1 \quad (3.31)$$

โดย r_1 = อัตราการบำบัดจำเพาะ (มก./ล.-วัน)
 k_1 = ค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (วัน⁻¹)
 S_1 = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาออก (มก./ล.)



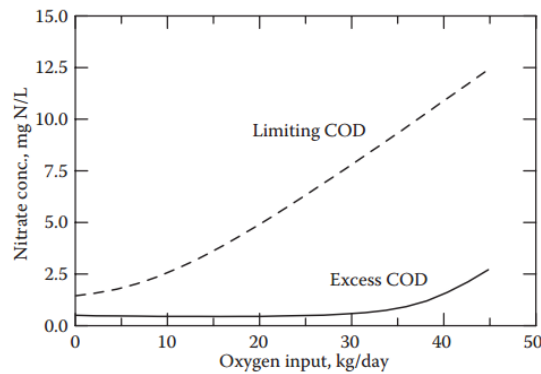
รูปที่ 2.15 กราฟสมการอันดับหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9.2 อัตราการเกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน

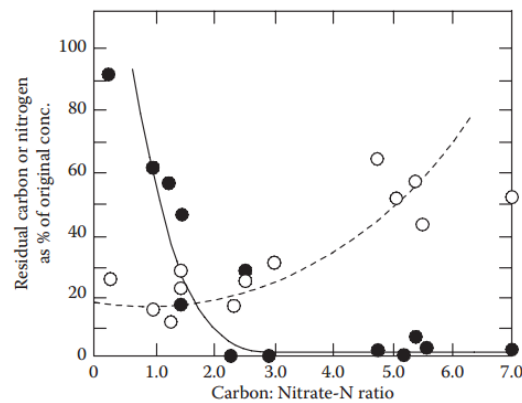
ปริมาณออกซิเจนละลายเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน จากรูปที่ 2.16 แสดงอัตราของออกซิเจนละลายในระบบโดยมีค่าที่แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ถังปฏิกริยามีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนมากเกินไป ปริมาณออกซิเจนละลายในถังปฏิกริยาไม่ส่งผลต่อการกำจัดไนเตรท เนื่องจากปริมาณออกซิเจนถูกใช้ไปในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทำให้ปริมาณของออกซิเจนละลายในถังปฏิกริยามีลดลง ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนจึงมากเกินไปที่จะนำไปใช้ในการกำจัดไนเตรท ในขณะที่ถังปฏิกริยามีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนอย่างจำกัด มีปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่าปริมาณของสารอินทรีย์ที่จะนำไปใช้ในการกำจัดไนเตรท จึงทำให้ถังปฏิกริยาสามารถ

กำจัดไนเตรทได้ต่ำ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมการเดินระบบ



รูปที่ 2.16 ผลของปริมาณออกซิเจนละลายต่อการกำจัดไนเตรท ในถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนและไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{COD}:\text{NO}_3^- - \text{N}$) ของน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์ที่สัดส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนเตรทต่างๆ จะสังเกตได้ว่าที่สัดส่วนที่ต่ำกว่าหนึ่งปริมาณความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือในถังปฏิกรณ์ค่อนข้างมากและมีปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนต่ำ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มสัดส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนเตรทพบว่าที่สัดส่วนระหว่าง 1-2 ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนและไนเตรทมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน และที่สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือลดลง ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนที่คงเหลือมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องนำสารอินทรีย์คาร์บอนที่คงเหลือจากถังปฏิกรณ์แอน็อกซิกไปกำจัดต่อในถังเติมอากาศต่อไป



รูปที่ 2.17 ผลของสัดส่วน $\text{COD}:\text{NO}_3^- - \text{N}$ ในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนเตรท

- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอัตราการการเกิดปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชัน

Wu และคณะ (2012) ศึกษาอัตราการการเกิดปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชันโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV/PLA เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน โดยทำการทดลองในถังปฏิกิริยาชนิดที่ละเท โดยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทและดีไอซีมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา เมื่อปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชันดำเนินไป 9 ชม. ปริมาณไนเตรทในระบบมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ขณะที่ปริมาณความเข้มข้นดีไอซีคงเหลือภายหลัง 9 ชม. เพิ่มขึ้นในช่วง 0-5.63 มก./ล. กล่าวได้ว่าเมื่อไนเตรทในระบบถูกใช้หมดไปอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้สารอินทรีย์คงเหลือในระบบเพิ่มมากขึ้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Xu และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ ได้แก่ PLA, PCL และ PLA/PHBV เป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีในตรีฟิเคชัน โดยทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มล. พบว่า PLA/PHBV ย่อยสลายได้ง่ายและเร็วกว่า PLA และ PCL ตามลำดับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชันเฉลี่ยของ PLA/PHBV และ PCL เท่ากับ 6.63 และ 6.34 มก./ล./ชม. ตามลำดับ โดยกำหนดให้ระยะเวลาที่น้ำคั่งที่ 7 ชม. นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาปริมาณซีไอดีที่เกิดขึ้นจากเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิดนี้ เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน พบว่า PLA, PCL และ PLA/PHBV มีค่าซีไอดีเท่ากับ 0, 40 และ 118 มก./ล. นั่นคือไม่พบปริมาณซีไอดีจากการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA จึงกล่าวได้ว่า PLA ไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีในตรีฟิเคชัน

Wu และคณะ (2013) ศึกษาการนำโพลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) มาใช้เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและการเกิดฟิล์มชีวภาพในกระบวนการดีในตรีฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่ (Packed bed bioreactor) ผลจากการทดลองพบว่าในสภาวะคงตัวสามารถกำจัดไนเตรทได้ถึงร้อยละ 95% เมื่อใช้ PBS เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน และเมื่อวิเคราะห์รูปร่างของตัวกลางด้วยเทคนิค ESEM และ FTIR ก่อนและหลังการทดลอง และพบว่าลักษณะของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เมื่อนำการวิเคราะห์กลุ่มจุลินทรีย์ พบว่าจุลินทรีย์กลุ่มเด่น คือ *Betaproteobacteria* ส่วนดีเอ็นเอที่ที่สามารถย่อยสลาย PBS ได้คือ *Comamonadaceae* คิดเป็นร้อยละ 13.02 ของประชากรจุลินทรีย์ทั้งหมด นั่นคือ PBS จัดเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่อดีในตรีฟิเคชันแบบคทีเรีย

งานวิจัยของ Shen และคณะ (2013) ศึกษาการใช้ Starch/Polycaprolactone (SPCL) ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางในการเกิดฟิล์มชีวภาพในระบบ Packed-bed reactor พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ 0.64 ± 0.06 กก.-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 1 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทที่อุณหภูมิ 15 °ซ มีค่าเท่ากับร้อยละ 55.06 โดยในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบปริมาณดีไอซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับ 61.30 มก./ล. เนื่องจากเกิดการย่อยสลายบนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพจากนั้นมีค่าลดลงเนื่องจากการปรับลดระยะเวลาที่เก็บน้ำมีค่าต่ำลง ทั้งนี้ปริมาณดีไอซีที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์บนผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเพิ่มขึ้น การสะสมของปริมาณดีไอซีจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายมีปริมาณมากเกินไปสำหรับจุลินทรีย์ในการสร้างเซลล์และการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เมื่อทำการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์บนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ ตรวจพบจุลินทรีย์ 6 สายพันธุ์หลัก ได้แก่ *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Spirochaetes* และ *Actinobacteria* โดยมีปริมาณรวมคิดเป็นร้อยละ 99.71

Xu และคณะ (2018) ศึกษาการใช้โพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไนเตรทสูง โดยใช้ 3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate (PHBV) เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน ทำการทดลองในระดับปฏิบัติการโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่ (Packed bed bioreactor) ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำในช่วง 2 ถึง 7.25 ชม. และความเข้มข้นไนเตรทในน้ำเข้าระบบในช่วง 16.55 ถึง 100 มก.-ไนโตรเจน/ล. ผลการทดลองพบว่า PHBV สามารถเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ สามารถกำจัดไนเตรทที่มีความเข้มข้น 100 มก./ล. ได้หมดภายในระยะเวลาที่เก็บน้ำ 7.25 ชม. โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเท่ากับร้อยละ 99

องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพสามารถใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ เมื่อทำการเดินระบบในถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่ โดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพหลากหลายมีความชนิดแตกต่างกันและต้องควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาที่เก็บน้ำ อุณหภูมิ ค่าพีเอช เพื่อให้ระบบกำจัดไนเตรทอย่างมีประสิทธิภาพ สรุปได้ดังนี้

1. เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็งสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงเทียบเท่าการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปสารละลาย
2. เม็ดพลาสติกชีวภาพไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยังเอื้อต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพ ทำให้ช่วยกักเก็บและรักษามวลจุลินทรีย์ไม่ให้หลุดออกจากระบบ
3. ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไนเตรทผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วงระหว่าง 2- 7 ชม.
4. ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเดินระบบอยู่ระหว่าง 7.2 – 7.5
5. อัตราดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การกำจัดไนเตรทมีประสิทธิภาพกว่าการเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำ
6. จุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงสามารถย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพได้ ซึ่งสายพันธุ์จุลินทรีย์จะมีความจำเพาะและแตกต่างกันตามชนิดของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆข้างต้นเป็นข้อมูลจากการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรท งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะทดลองทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการรองรับอัตราสารอินทรีย์ได้สูง โดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนแทนการเติมสารอินทรีย์ในรูปสารละลาย เช่น เมทานอลหรืออะซิติก เพื่อลดปริมาณซีโอติคเกลือของน้ำทิ้ง และเป็นตัวกลางช่วยกักเก็บชีวมวลไว้ในระบบ นอกจากนี้การเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่ยังเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียได้ดี ส่งผลให้การกำจัดไนเตรทเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท และติดตามอัตราการใช้ในเตรททางชีวภาพ ด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่ โดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ Polylactic acid (PLA), Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) และ Polybutylene succinate (PBS) เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางให้จุลินทรีย์ ยึดเกาะเพื่อเจริญเติบโต ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของ ไนเตรท แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง โดยแผนผังภาพรวมของการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1

การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ สมบัติการละลายน้ำ และทดสอบการดูดซับไนเตรทบนผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ เม็ดพลาสติกชีวภาพ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบสมบัติการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำ ปราศจากไอออน (DI) และน้ำประปา และส่วนที่สามเป็นการศึกษาการดูดซับไนเตรทของเม็ด พลาสติกชีวภาพ โดยทำการทดลองแบบทีละเทในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 2 ลิตร ภายใต้สภาวะจำลอง ของการเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่ โดยวางถังปฏิกรณ์บนเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) และติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท ทีโอซี และพีเอช เมื่อเวลาผ่านไป

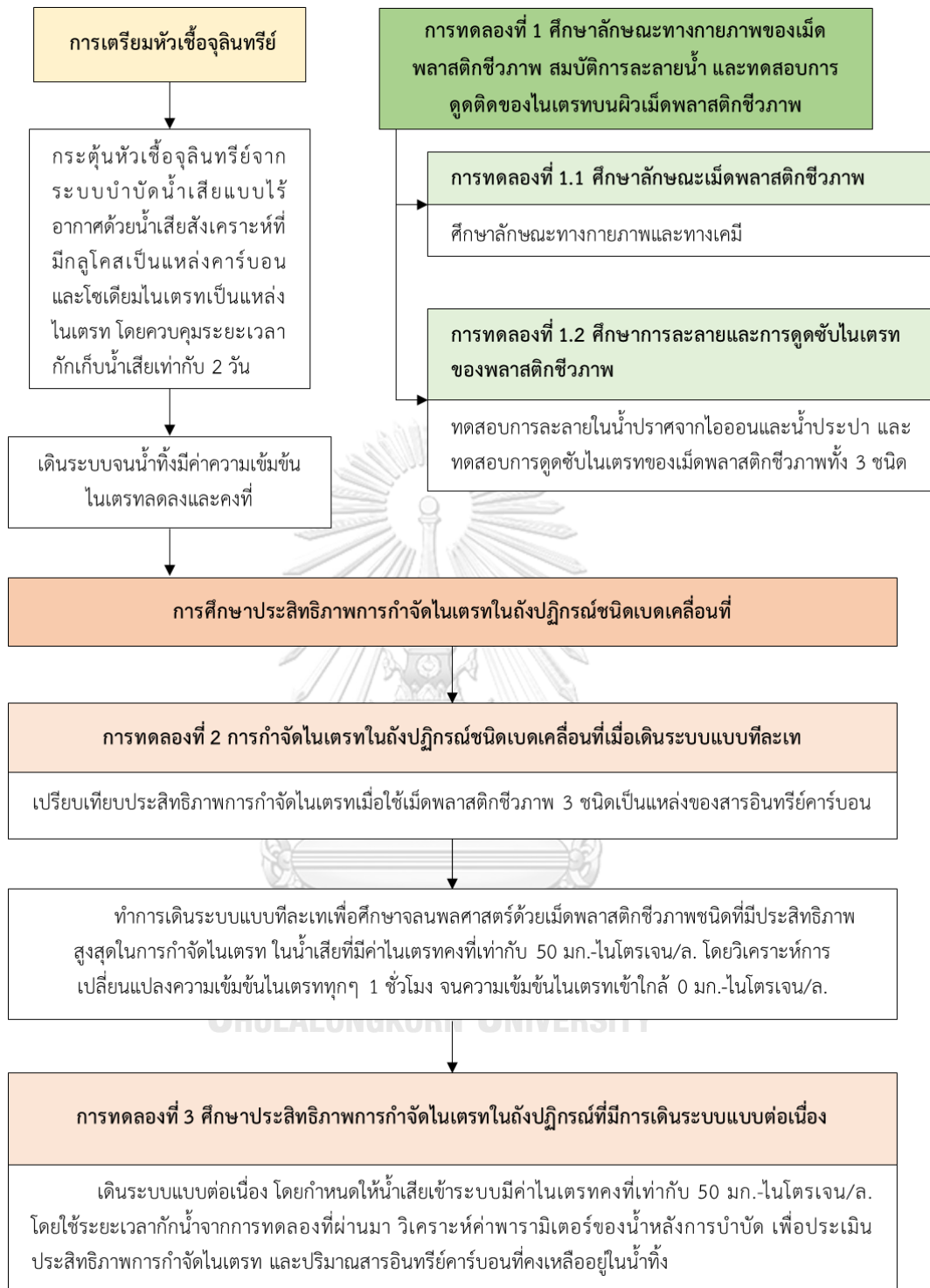
การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ เป็นตัวกลางและเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบ แบบทีละเท

การทดลองนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้เม็ด พลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA PHBV และ PBS เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในการกำจัดไนเตรท เมื่อบรรจุเป็นตัวกลางในระบบบำบัดชนิดเบดเคลื่อนที่ ทำการเดินระบบแบบทีละเท และติดตามการ เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาเดินระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว ตลอดจน ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกชีวภาพในการกำจัดไนเตรท

การทดลองที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน

เลือกเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไนเตรทจากการทดลองช่วงที่ 2 มาบรรจุเป็นตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยกำหนดให้น้ำเสียเข้าระบบมีค่าไนเตรทคงที่เท่ากับ 50 มก-ไนโตรเจน./ล. ภายใต้ระยะเวลาที่นำจากการทดลองที่ผ่านมา ทำการเดินระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อติดตามและประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบ





รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนโตรไฟอิง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นโดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน และโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท มีการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์อย่างครบถ้วน (ตารางที่ 3.1) และกำหนดให้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทเท่ากับ 5:1 โดยควบคุมความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียคงที่เท่ากับ 250 มก./ล. และไนเตรทเท่ากับ 50 มก./ล. ขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองในช่วงที่ 2 และ 3 จะไม่มีการเติมกลูโคส เนื่องจากต้องการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อการเตรียมน้ำเสีย 1 ลิตร)

	องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ	หน่วย
ธาตุอาหารหลัก	กลูโคส	0.2	ก.
	NaNO ₃	0.3	ก.
	NaHCO ₃	0.75	ก.
	K ₂ HPO ₄	0.4	ก.
	MgCl ₂ ·7H ₂ O	0.4	ก.
	CaCl ₂ ·2H ₂ O	2.5	ก.
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.5	ก.
	FeCl ₂ ·4H ₂ O	2	ก.
ธาตุอาหารเสริม	สารละลาย A*	0.1	มล.
	- H ₃ BO ₃	0.5	มก.
	- ZnCl ₂	0.5	มก.
	- CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.5	มก.
	- NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.5	มก.
	- (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₄ ·4H ₂ O	0.5	มก.
	- MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.5	มก.

ที่มา : ดัดแปลงจาก (พัชรียา รุ่งกิจวัฒนานุกูล, 2553)

*สารละลาย A เป็นสารละลายผสมของธาตุอาหารชนิดต่างๆ 6 ชนิดข้างต้น โดยเตรียมเป็น Stock solution ที่ความเข้มข้น 10,000 เท่า

3.2.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนโตรฟิเคชัน

บรรจุตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงาน รอยัล ฟู้ด จำกัด ประมาณร้อยละ 20 ของถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร 10 ลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท และเติมสารอาหารที่จำเป็น กำหนดให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 2 วัน เพื่อกระตุ้นหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีไนเตรท เติมน้ำระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทคงที่ ซึ่งยืนยันให้มั่นใจว่าภายในระบบมีจุลินทรีย์กลุ่มดีไนโตรฟิเคชันที่พร้อมใช้งานแล้ว

3.3 เม็ดพลาสติกชีวภาพ

เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Polylactic acid (PLA), Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) และ Polybutylene succinate (PBS) โดยรายละเอียดและลักษณะสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทั่วไปและสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ชนิดของเม็ดพลาสติกชีวภาพ		
	PLA	PHBV	PBS
ข้อมูลทั่วไป			
- เลขทางการค้า	4043D	Y1000P	FZ91PM
- ยี่ห้อ	Naturework	ENMET	Bio PBS
- แหล่งที่มา	PTT Global Chemical	Ningbo Tianan Biologic Material Co.,Ltd.	PTT MCC Biochem Company Limited
ทางกายภาพ			
- รูปร่าง	ทรงกลม	ทรงกระบอก	ทรงรี
- ขนาด (มม.)	3 × 4	3 × 3	3 × 4
- น้ำหนัก 1 ชั้น (กรัม)	0.04±0.002	0.02±0.003	0.015±0.001
- ความหนาแน่น (กรัม/ซม ³)	1.24	1.25	1.26
- พื้นที่ผิวต่อปริมาตร (ตร.ม./ล.)	0.48	0.66	0.76

หมายเหตุ : ค่าน้ำหนักและพื้นที่ผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

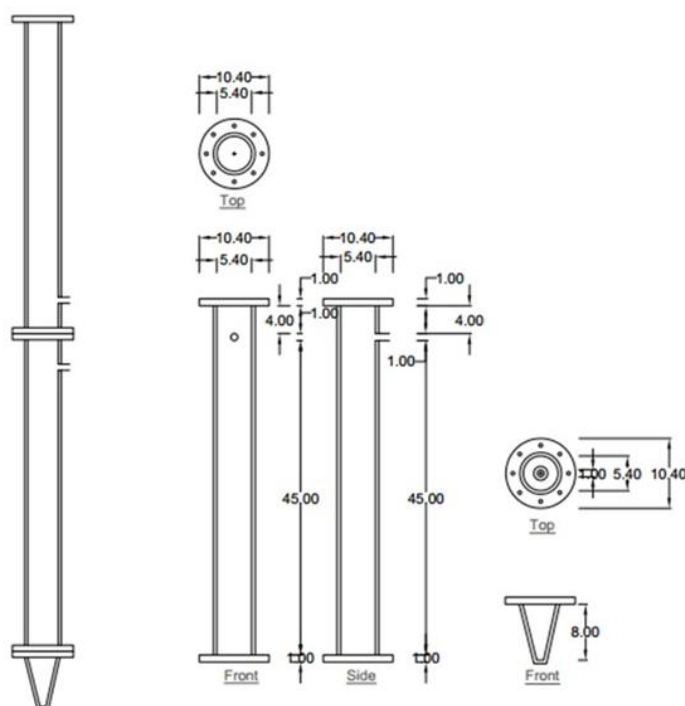
3.4 ถึงปฏิกรณ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 ถึงปฏิกรณ์ชนิดที่ละเท

- ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้นหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีโนไฟอิงเป็นถึงน้ำพลาสติกปริมาตร 10 ลิตร มีฝาปิดเพื่อควบคุมให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ
- ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำและการดูดซับไนเตรท เป็นบีกเกอร์ปริมาตร 2 ลิตร ปิดด้วยฝาพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ
- ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ เป็นขวดรูปชมพู่ปริมาตร 2 ลิตรมีฝาปิดทำด้วยจุกยาง โดยเจาะรูที่ฝาจำนวน 2 รูเพื่อเป็นช่องระบายก๊าซ และใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.4.2 ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

ถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ทำจากท่ออะคริลิกใส รูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.054 เมตร สูง 0.98 เมตร ปริมาตรรวม 2 ลิตร โดยแปลนของถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบ (drawing) แสดงขนาดและการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอนีออกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่

3.4.3 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์

- เครื่องแก้วและเครื่องมือวิเคราะห์

1. ปีกเกอร์
2. บิวเรต
3. ปิเปต
4. โกลดูดความชื้น
5. ปากคีบ
6. กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
7. ชุดกรองใช้กรวยกรองแบบบุชเนอร์

8. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 103 – 105 °ซ
9. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 150 °ซ
10. เครื่องวัดพีเอช
11. เครื่องวัดออกซิเจนละลาย
12. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
13. เครื่อง UV spectrophotometer
14. เครื่องวิเคราะห์ Total organic compound (TOC)

- สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟูริก
2. สารละลายเฟอร์โรอินอติเคเตอร์
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 นอร์มอล
4. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มอล
5. โซเดียมไนเตรท
6. โปแตสเซียมไนเตรท
7. โซเดียมไบคาร์บอเนต
8. แมกนีเซียมคลอไรด์
9. ไดโทแทสเซียมฟอสเฟต

3.5 รายละเอียดวิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิง

ขั้นตอนนี้เป็นกรกระตุ้นหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีไนเตรทและคัดเลือกให้ ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักในหัวเชื้อการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. บรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีของโรงงาน รอยัล ฟู้ด จำกัด ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 8,000 มก./ล. ลงในถังปฏิกรณ์ชนิดที่ละเทปปริมาตร 10 ลิตร โดยให้มีปริมาตรประมาณร้อยละ 20 ของถังปฏิกรณ์
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าอัตราส่วน COD:NO₃⁻-N เท่ากับ 5:1 ซึ่งเตรียมจากกลูโคสเป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอน และโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท กำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์มี

ความเข้มข้นของไนเตรทเท่ากับ 50 มก./ล. และค่าซีไอดีเท่ากับ 250 มก./ล. โดยมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ครบถ้วน

3. ควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 วัน

4. เก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการบำบัดเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บ่งถึงการเกิดสถานะดีไนตริฟิเคชันและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ได้แก่ พีเอช ไนเตรท ซีไอดี

3.5.2 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาลักษณะของเม็ดพลาสติกชีวภาพ สมบัติการละลายน้ำ และทดสอบการดูดติดของไนเตรทบนผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองที่ 1.1 การศึกษาลักษณะของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดสอบลักษณะของเม็ดพลาสติกชีวภาพแบ่งออกเป็น การทดสอบทางกายภาพและทางเคมี มีรายละเอียดดังนี้

- การทดสอบลักษณะทางกายภาพ

ทดสอบสมบัติความชอบน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดด้วยเทคนิค Contact angle ตลอดจนศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพเหล่านี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) และศึกษาประจุที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพด้วยวิธี zeta potential

การทดลองที่ 1.2 การศึกษาสมบัติการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

ทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในน้ำประปา โดยทำการทดลองแบบทีละเท ในสถานะที่ตัวกลางมีการเคลื่อนที่ในน้ำตลอดเวลา มีรายละเอียดการทดลองดังนี้

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับการเดินระบบ ถึงปฏิกรณ์สำหรับการทดลองส่วนนี้เป็นบีกเกอร์ ปริมาตร 2 ลิตร ทำการจำลองสถานะการทดลองแบบเบดเคลื่อนที่ โดยวางถังปฏิกรณ์บนเครื่องกวนสารละลาย เพื่อให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลา

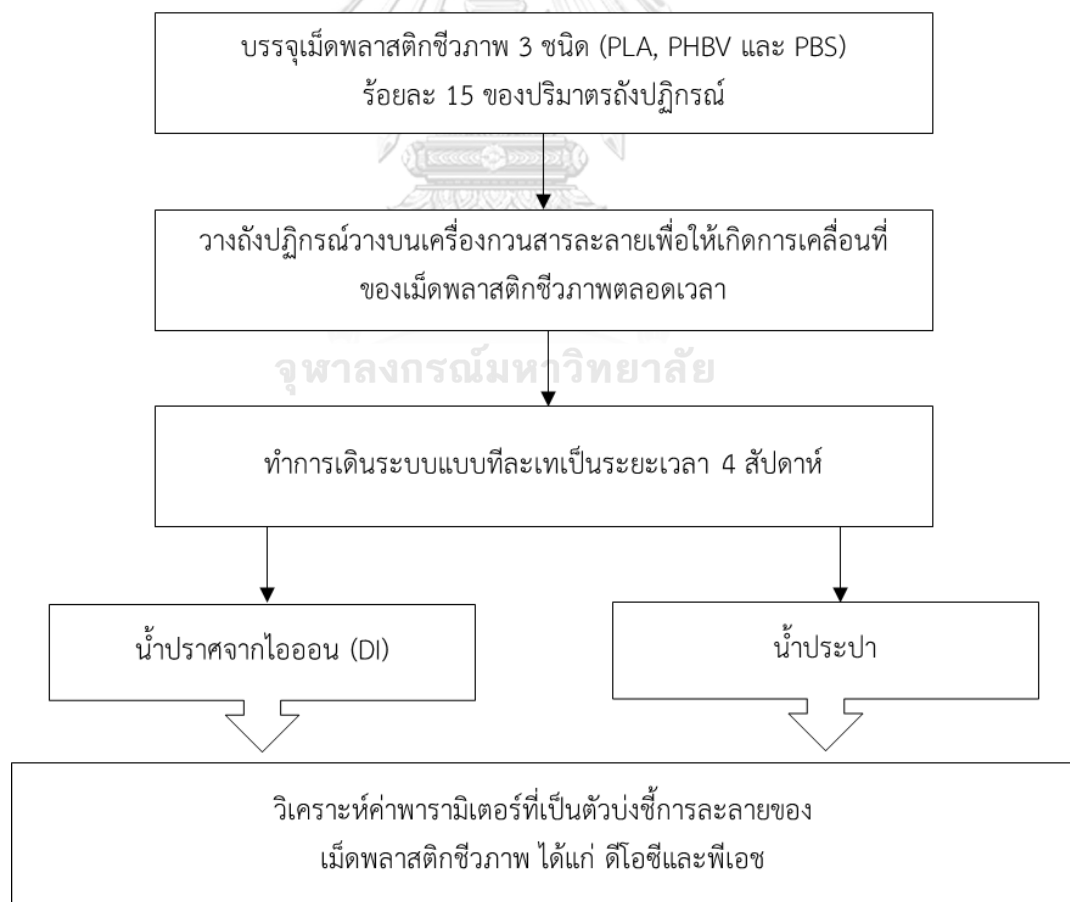
2. บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดลงในถังปฏิกรณ์ โดยบรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพร้อยละ 15 โดยปริมาตร จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 1.5 ลิตร

3. ตรวจวัดค่าพีเอชและเก็บตัวอย่างน้ำก่อนเริ่มเดินระบบเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปดีไอซี (DOC: Dissolved Organic Carbon)

4. ทำการเดินระบบต่อเนื่องประมาณ 4 สัปดาห์ โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า ดีไอซี และค่าพีเอช ตลอดจนติดตามการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำ โดยความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.5
5. ทำการทดสอบการละลายเช่นเดิมโดยเปลี่ยนจากน้ำที่ปราศจากไอออน (DI) เป็นน้ำประปา



รูปที่ 3.4 การทดสอบการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำปราศจากไอออนและน้ำประปา

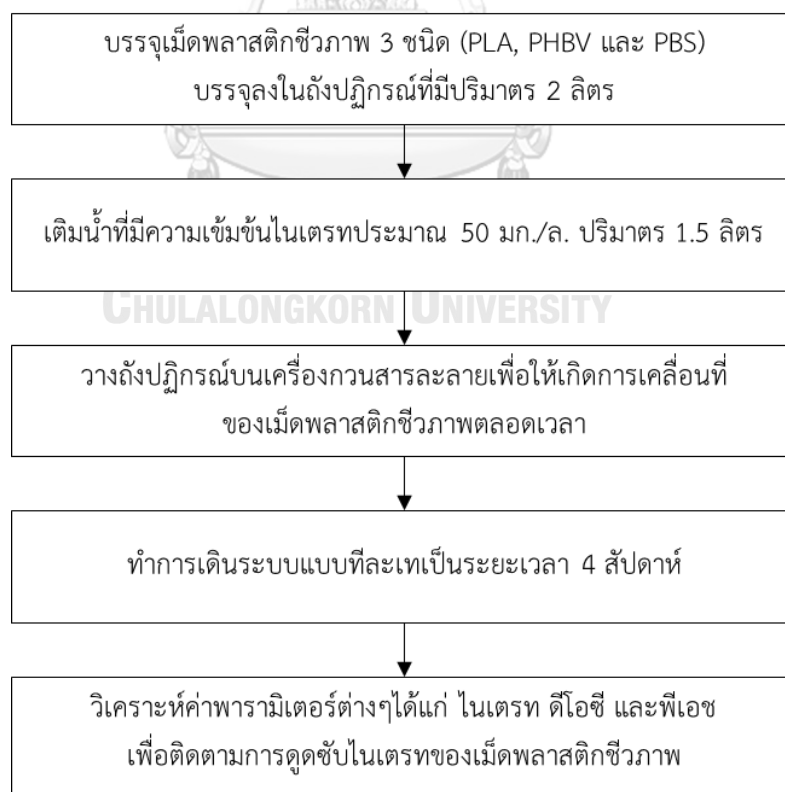


รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1.2

การทดลองที่ 1.3 การทดสอบการดูดซับของไนเตรทบนผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ เมื่อใช้เป็นตัวกลางเดินระบบที่สภาวะเบดเคลื่อนที่ ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นบีกเกอร์ปริมาตร 2 ลิตร มีฝาปิดเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ เดินระบบการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1.2 ดังแผนภาพรูปที่ 3.6 และมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1. บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดร้อยละ 15 โดยปริมาตร ลงในถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง เติมน้ำที่มีความเข้มข้นไนเตรทประมาณ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 100 ppm (Matthew Preisser) เพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์
2. วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท ดีไอซีและพีเอช ในน้ำก่อนเริ่มเดินระบบ
3. วางถังปฏิกรณ์บนเครื่องกวนสารละลายเพื่อจำลองสภาวะการเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่ ทำเดินระบบต่อเนื่องประมาณ 4 สัปดาห์
4. เก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าไนเตรท ดีไอซี และพีเอช เพื่อติดตามผลการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ โดยความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1.3

ตัวแปรสำหรับการทดลองส่วนที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่สำคัญในการทดลองส่วนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด	PLA, PHBV และ PBS
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความเข้มข้นของไนเตรท-ไนโตรเจน	50 มก.-ไนโตรเจน/ล.
- รอบของการหมุนของเครื่อง magnetic stirrer	100 รอบ/นาที
- ปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพ	ร้อยละ 15 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์
- ระยะเวลาที่เก็บน้ำ	4 สัปดาห์
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปดีไอซี	TOC analyzer
2. ปริมาณไนเตรท	UV spectrophotometer
3. พีเอช	pH meter

3.5.3 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

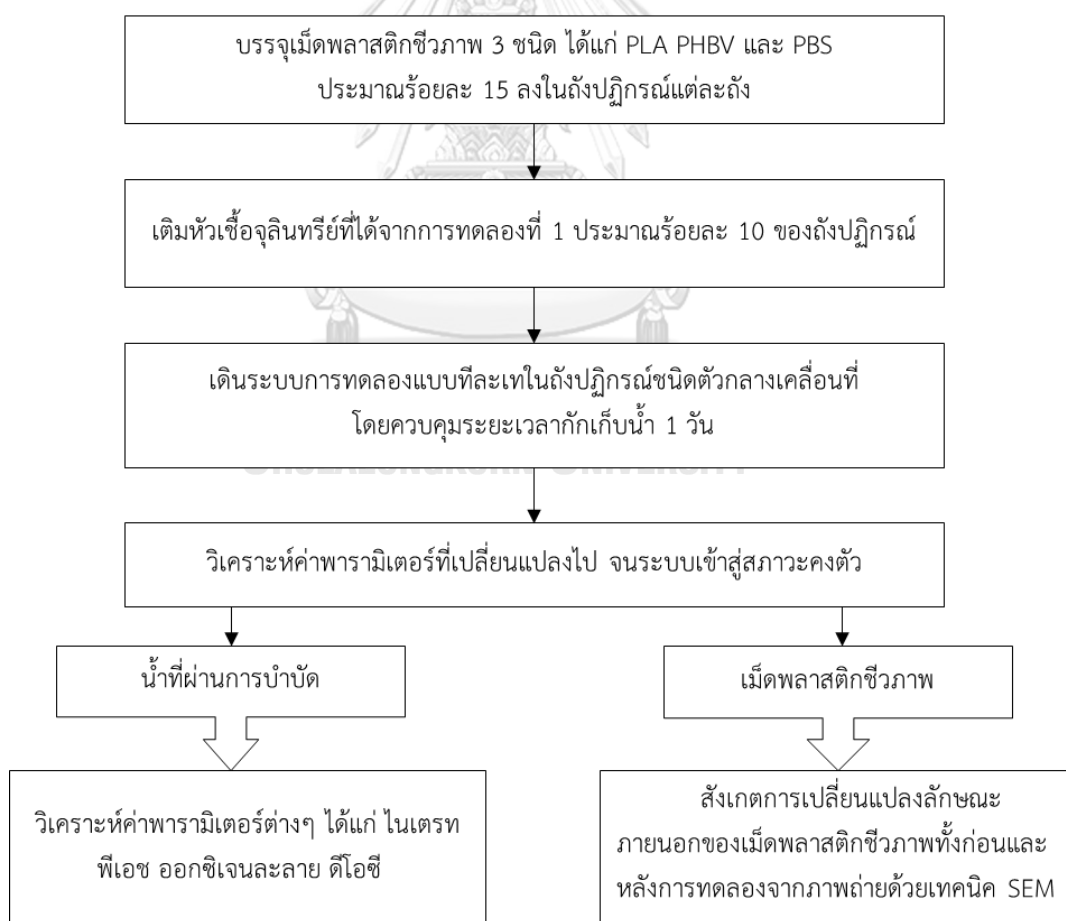
การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ โดยเดินระบบการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 2.1 การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

การทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อเดินระบบโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดเป็นตัวกลางในสถานะที่มีการเคลื่อนที่ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ถังปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นขวดรูปชมพู่ปริมาตร 2 ลิตร จำนวน 3 ขวด มีฝาปิดทำด้วยจุกยาง โดยเจาะรูที่ฝาจำนวน 2 รูเพื่อเป็นช่องระบายก๊าซและใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ

2. บรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์จุลินทรีย์ดีไนโตรไฟอิงที่ผ่านการกระตุ้น ประมาณร้อยละ 10 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ โดยควบคุมให้ค่าความเข้มข้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 800 มก./ล. (Xu และคณะ, 2018)
3. เติมเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดลงในแต่ละถังปฏิกรณ์ในสัดส่วนร้อยละ 15 ของปริมาตรที่ใช้งานคือ 1.5 ลิตร (Barwal and Chaudhary, 2015)
4. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นไนเตรทเท่ากับ 50 มก./ล. และเติมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
5. ก่อนเริ่มเดินระบบเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ค่าไนเตรท พีเอช ค่าออกซิเจนละลาย ดีไอซี
6. เดินระบบการทดลองแบบที่ละเท โดยกำหนดให้ระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชม.
7. เก็บตัวอย่างน้ำหลังการบำบัดเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท พีเอช ออกซิเจนละลาย และดีไอซี โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ทุกวัน
8. เดินระบบจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

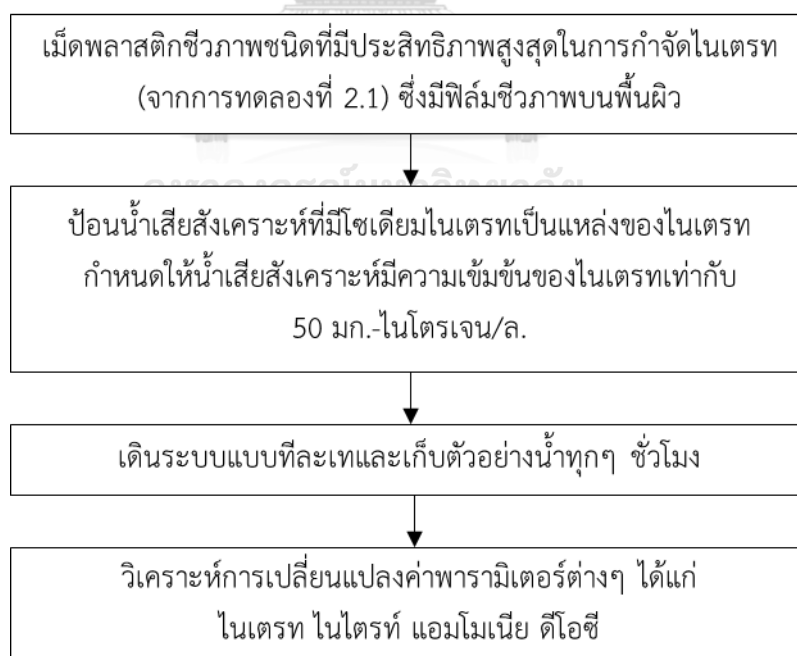


รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ที่ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน

จากการทดลองที่ผ่านมา จะได้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 ชนิดที่เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการตัดสินใจเพื่อเลือกเม็ดพลาสติกชีวภาพเพียงชนิดเดียวที่มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงสุด มาทำการทดลองต่อเพื่อศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ปรากฏฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวแล้ว (จากการทดลองที่ 2.1) ชนิดที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทสูงสุด ลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 2 ลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท ตลอดจนธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยกำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของไนเตรทเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล.
3. เดินระบบการทดลองแบบที่ละเทและทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และดีไอซี

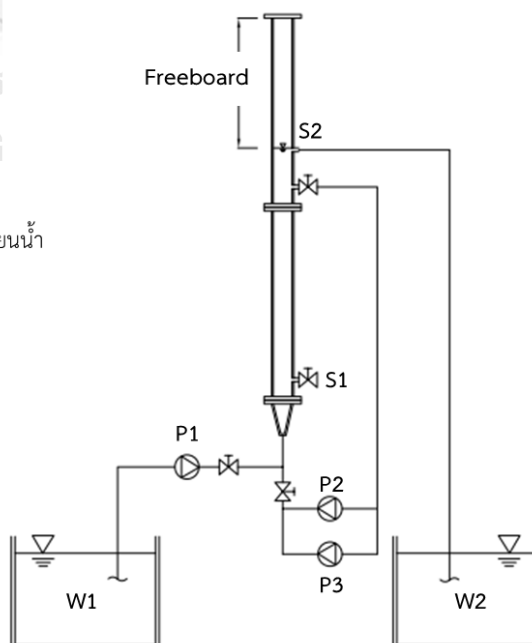


รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2.2

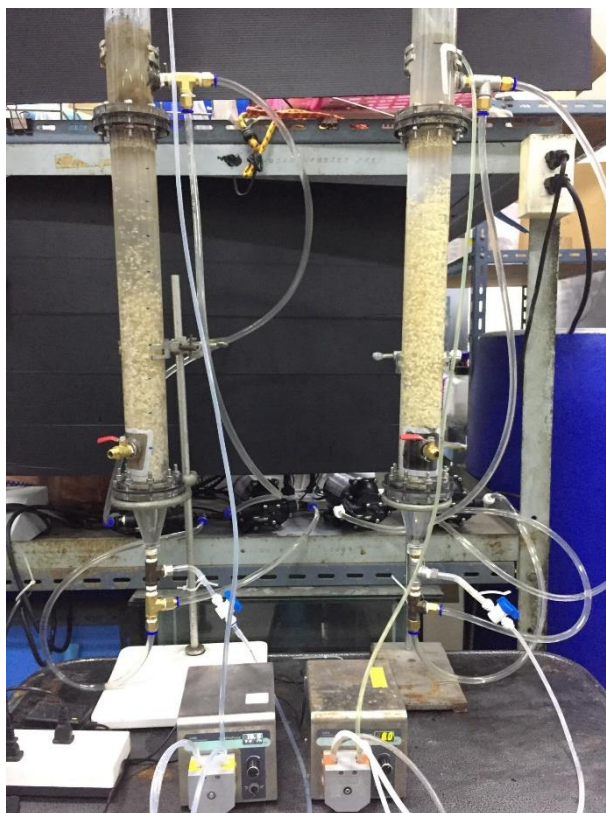
3.5.4 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาการกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เพื่อเม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางและแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1. บรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟิเคชัน ลงในถังปฏิกรณ์ร้อยละ 10 ของปริมาตรที่ใช้งาน (active volume) โดยปริมาตรที่ใช้งานเท่ากับ 1.5 ลิตร
2. บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพลงในถังปฏิกรณ์ร้อยละ 20 ของปริมาตรที่ใช้งาน โดยเลือกเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทสูงที่สุดจากการทดลองที่ 2.1 และใช้ระยะเวลาพักน้ำที่ได้จากการทดลองที่ 2.2
3. ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรทความเข้มข้นเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเติมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ตามแผนภาพรูปที่ 3.9
4. เดินระบบต่อเนื่อง โดยน้ำเสียสังเคราะห์จากถังเก็บน้ำเสียเข้าระบบ (W1) จะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จากทางด้านล่างด้วยเครื่องสูบน้ำ (P1) และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกจากถังปฏิกรณ์ที่ทางออกด้านบน (S2) เพื่อเข้าสู่ถังพักน้ำทิ้ง (W2) ในระหว่างการเดินระบบจะทำการหมุนเวียนน้ำเสียภายในด้วยเครื่องสูบน้ำ (P2) เพื่อช่วยให้เม็ดพลาสติกชีวภาพเกิดการกวนผสมภายในระบบและเพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและจุลินทรีย์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด S1 และ S2 ทุกวัน เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

- P1 คือ เครื่องสูบน้ำเข้า
 P2, P3 คือ เครื่องสูบน้ำสำหรับการเวียนน้ำ
 W1 คือ ถังเก็บน้ำเสียเข้าระบบ
 W2 คือ ถังพักน้ำทิ้ง
 S1, S2 คือ จุดเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 แผนภาพการเดินระบบแบบต่อเนื่อง



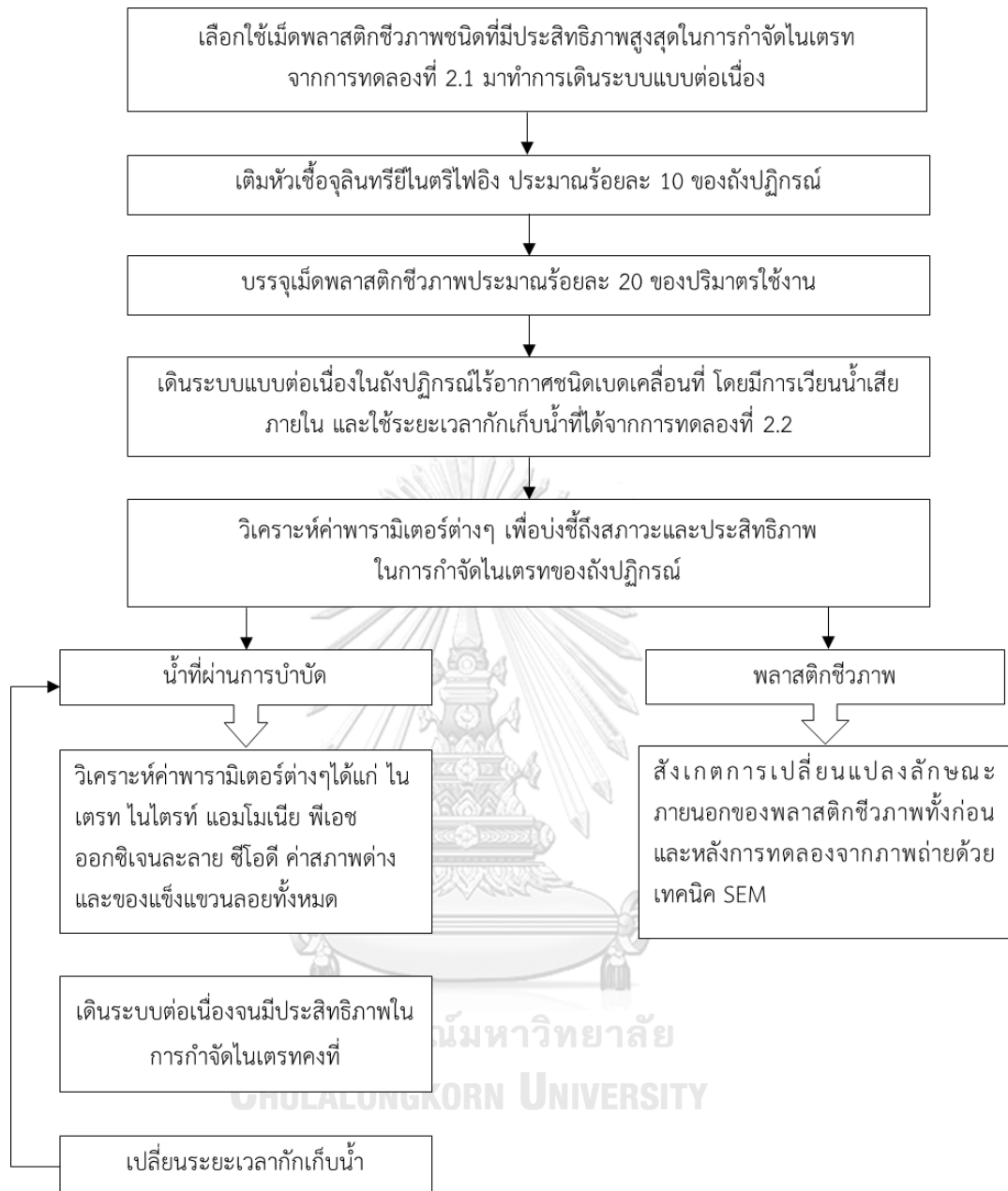
รูปที่ 3.10 การเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่

4. ติดตามการทำงานของระบบตลอดจนประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย ฟิเอช ออกซิเจนละลาย ซีไอดี ดีไอซี ค่าสภาพต่าง และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

5. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ปรับเปลี่ยนระยะเวลาเก็บน้ำต่างกัน

6. เก็บตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งก่อนและหลังการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 3.11 แสดงภาพรวมของการทดลองนี้ โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทคงที่ จะยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดนั้นเป็นตัวกลางและแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่เพื่อกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.11 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 3

ตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- เม็ดพลาสติกชีวภาพ	เม็ดพลาสติกชีวภาพที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงสุดจากการทดลองที่ 2.1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (การทดลองที่ 2.2)	12 ชม.
- ความเข้มข้นไนเตรท	50 มก.-ไนโตรเจน/ล.
- ปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพ	ร้อยละ 20 ของปริมาตรถังปฏิกรณ์
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. ซีโอดี	Closed reflux, Titration method
2. ดีโอซี	TOC Analyzer
3. ไนเตรท	UV spectrophotometer
4. ไนไตรท์	UV spectrophotometer
5. แอมโมเนีย	UV spectrophotometer
6. พีเอช	pH meter
7. ออกซิเจนละลาย	DO meter
8. ค่าสภาพต่าง	Titration method
9. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	อบที่อุณหภูมิ 103-105 °C
10. ลักษณะพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ	เทคนิค SEM

3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ทำการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ใช้บ่งชี้การทำงานของระบบและความถี่ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านการบำบัด

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์			
	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2.1	การทดลองที่ 2.2	การทดลองที่ 3
น้ำเสียและน้ำทิ้ง				
1. ไนเตรท	-	ทุกวัน	ทุกๆชั่วโมง	ทุกวัน
2. ซีโอดี	-	-	-	ทุกวัน
3. ทีโอซี	-	2 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกๆชั่วโมง	2 ครั้ง/สัปดาห์
4. พีเอช	-	ทุกวัน	-	ทุกวัน
5. ออกซิเจนละลาย	-	ทุกวัน	-	ทุกวัน
6. ไนไตรท์	-	-	ทุกๆชั่วโมง	ทุกวัน
7. แอมโมเนีย	-	-	ทุกๆชั่วโมง	ทุกวัน
8. ค่าสภาพต่าง	-	-	-	3 ครั้ง/สัปดาห์
9. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	-	-	-	วันเว้นวัน
เม็ดพลาสติกชีวภาพ				
1. ลักษณะพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ (SEM)	-	-	-	ก่อน-หลัง
2. ประจุบนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ	✓	-	-	-
3. การละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI)	✓	-	-	-
4. การละลายในน้ำประปา	✓	-	-	-
5. ทดสอบความชอบน้ำ	✓	-	-	-
6. ทดสอบการดูดซับไนเตรท	✓	-	-	-

*หมายเหตุ : ก่อน - หลัง หมายถึงก่อนการเริ่มเดินระบบการทดลอง และหลังจากสิ้นสุดการทดลอง

(-) ไม่ได้ทำการวัดตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือที่เรียกว่าดีไนตริฟิเคชัน จัดเป็นปฏิกิริยารีดิวซ์ไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในสภาวะกึ่งไร้อากาศ โดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟิอิงจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน จากสารอินทรีย์คาร์บอนซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพซึ่งเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ PLA, PHBV และ PBS เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เป็นแหล่งของอินทรีย์คาร์บอน รวมถึงเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะติดเพื่อกำจัดไนเตรทผ่านปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพและการทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะรูปร่าง พื้นผิว และสมบัติต่างๆ ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง นอกจากนี้จะทำการศึกษาการละลายและการดูดซับไนเตรทบนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ เพื่อใช้ตัวแปรควบคุมของการทดลองในช่วงที่ 2 และ 3

การทดลองช่วงที่ 2 แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทด้วยการทดลองแบบที่ละเท โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA, PHBV และ PBS ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 2 ลิตร บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพปริมาณร้อยละ 15 (โดยปริมาตร) และเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟิอิงที่ผ่านการกระตุ้นในห้องปฏิบัติการร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) จากนั้นเริ่มเดินระบบโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. และวางชุดการทดลองบนเครื่องกวนสารละลาย ที่ควบคุมความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เก็บน้ำตัวอย่างเป็นระยะเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท สำหรับการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการทดลองแบบที่ละเท จะทำการทดลองเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยจะทำการวิเคราะห์ไนเตรท ทีโอซี แอมโมเนีย และไนไตรท์ทุกชั่วโมง และติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไนเตรทและอัตราการกำจัดไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษาการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดตัวกลางเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน โดยเลือกใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 จากการทดลองช่วงที่ 2 มาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง การทดลองนี้ใช้ถังปฏิกรณ์อะคริลิกใสทรงกระบอกปริมาตร 2 ลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

0.054 เมตร สูง 0.98 เมตร บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพร้อยละ 20 (โดยปริมาตร) และหัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเดินระบบการทดลองในสภาวะที่มีการหมุนเวียนน้ำเสียภายใน เพื่อให้ตัวกลางเม็ดพลาสติกชีวภาพเกิดการกระจายตัวและเคลื่อนที่เป็นอิสระในถังปฏิกรณ์ โดยจะติดตามประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดตัวกลางเคลื่อนที่จากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท แอมโมเนีย ไนไตรท์ สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (ซีโอดีและทีโอดี) พีเอช ออกซิเจนละลาย และสภาพต่างทั้งหมด

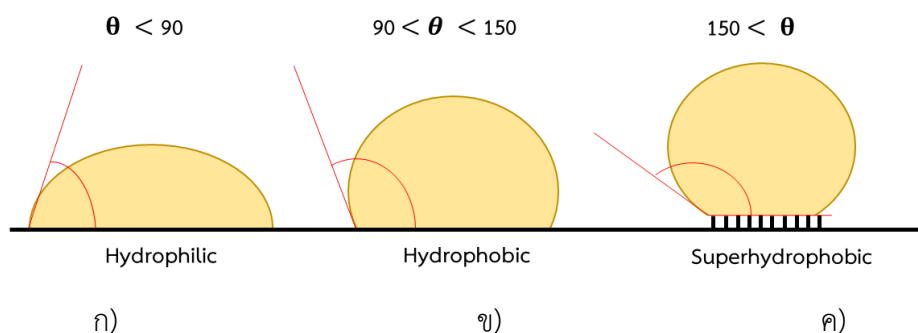
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

ในการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติของเม็ดพลาสติกชีวภาพของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาลักษณะทางกายภาพ การทดสอบการละลายน้ำและการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

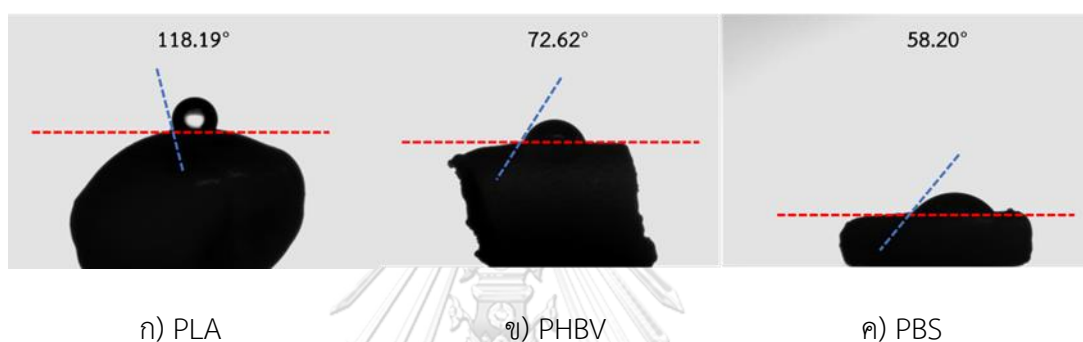
- ผลการศึกษาความชอบน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองนี้ทำการวัดค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (Water contact angle) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำหรับตรวจสอบความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของวัสดุ โดยรูปร่างของหยดน้ำเมื่อสัมผัสบนผิววัสดุที่ปรากฏจะสื่อถึงสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำตลอดจนบ่งบอกถึงความสามารถในการยึดเกาะของหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุได้ หากพื้นผิวที่มีสมบัติความชอบน้ำค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จะน้อยกว่า 90 องศา ขณะที่วัสดุที่มีความไม่ชอบน้ำค่ามุมสัมผัสจะมากกว่า 90 องศา และถ้าค่ามุมสัมผัสมากกว่า 150 องศาจะจัดเป็นวัสดุที่มีความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Kulkarni and Shaw, 2016) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่ามุมสัมผัสที่แตกต่างกันของหยดน้ำบนผิววัสดุ
เมื่อ ก) วัสดุชอบน้ำ ข) วัสดุไม่ชอบน้ำ ค) วัสดุไม่ชอบน้ำยิ่งยวด

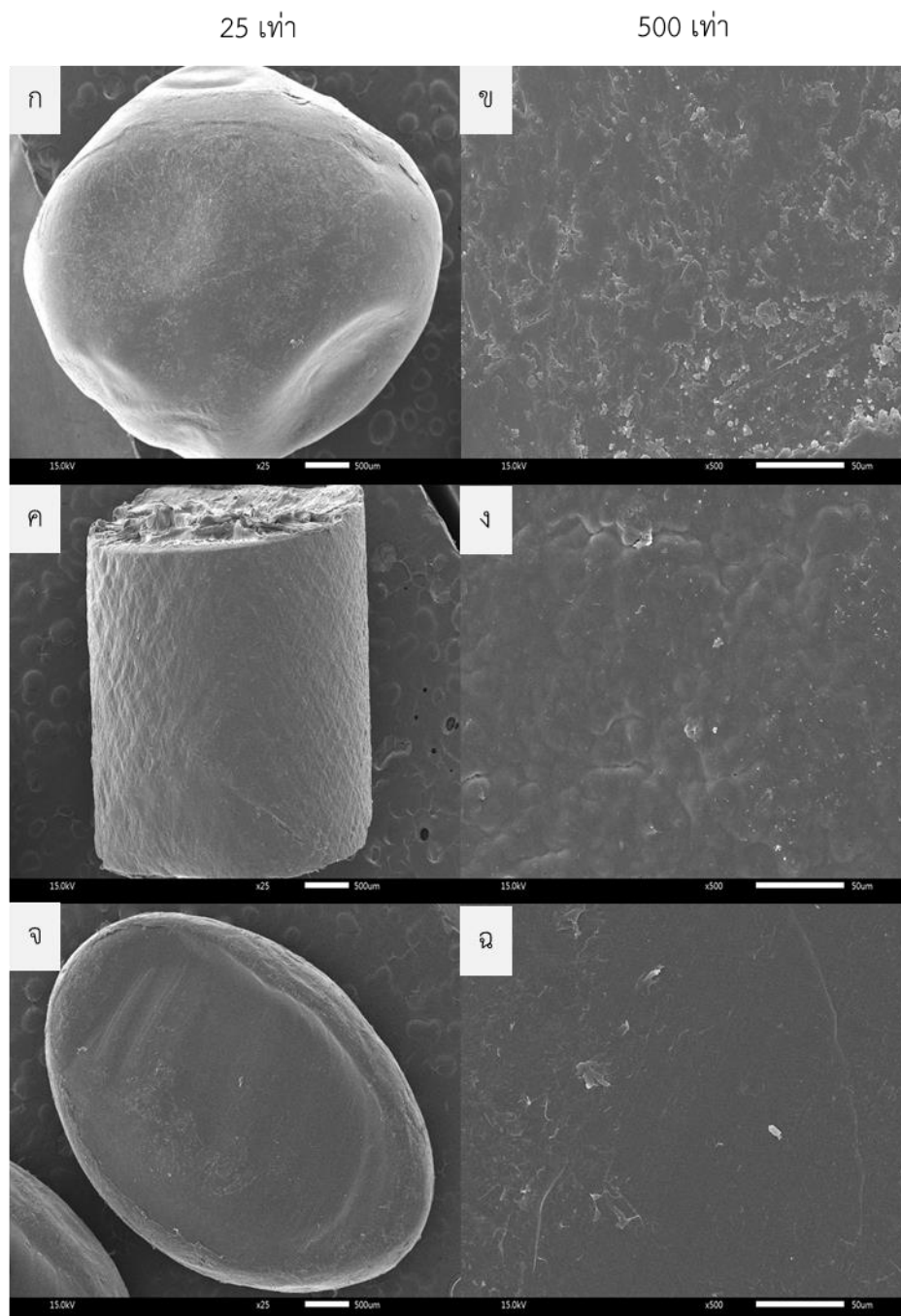
เมื่อทำการทดสอบความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA, PHBV และ PBS มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวเม็ดพลาสติกแตกต่างกัน มีค่าเท่ากับ 118.19 ± 0.2 , 72.62 ± 0.74 และ 58.20 ± 0.30 องศาตามลำดับ เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีความชอบน้ำมากกว่า PHBV และ PLA ตามลำดับ ทั้งนี้การวัดค่ามุมสัมผัสจะเป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อระบุสมบัติของพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพเท่านั้น จะต้องทำการทดสอบการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิดทั้งในน้ำปราศจากไอออนและน้ำประปาต่อไปเพื่อให้ทราบถึงปริมาณที่แน่นอนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายออกมาได้ในน้ำ



รูปที่ 4.2 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด

- ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

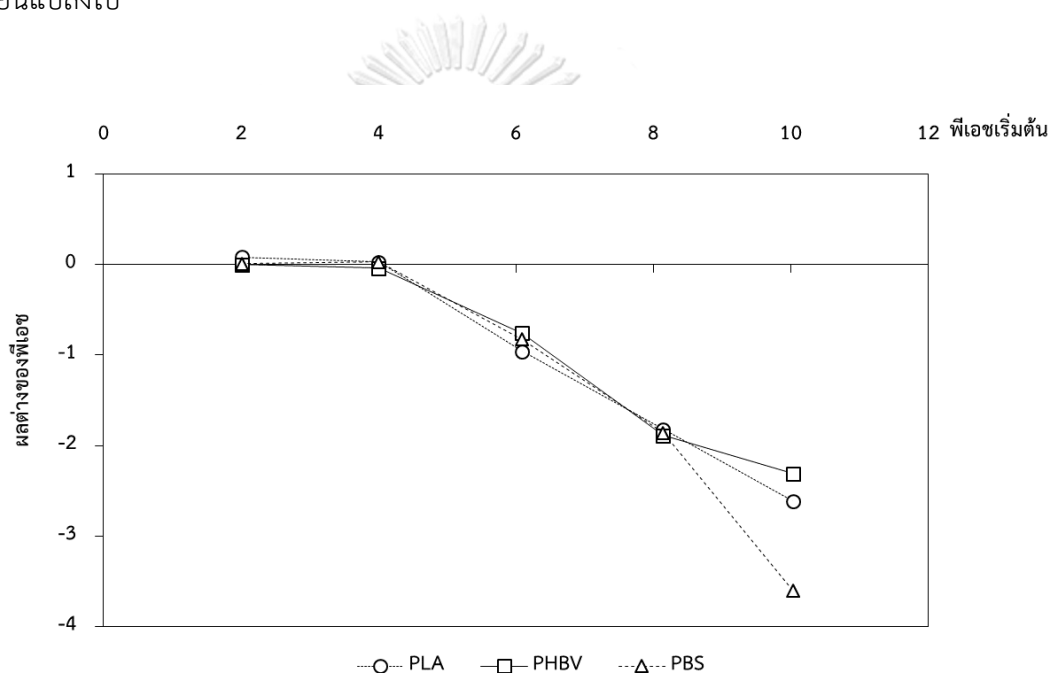
ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 25 และ 500 เท่า โดยภาพถ่ายจากกล้องที่กำลังขยาย 25 เท่า ใช้ระบุลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกชีวภาพ พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA มีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม PHBV มีลักษณะเป็นทรงกระบอก และ PBS มีลักษณะเป็นรูปทรงรี เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 500 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดไม่มีรูพรุน โดย PLA และ PHBV พื้นผิวมีลักษณะขรุขระเล็กน้อย แตกต่างกับเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS ที่พื้นผิวค่อนข้างเรียบ ทั้งนี้ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างของเม็ดพลาสติกชีวภาพที่แตกต่างกันอาจเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพและการยึดเกาะของจุลินทรีย์เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด เป็นตัวกลางในการเดินระบบร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อกำจัดไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายเมมเบรนพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 25 และ 50 เท่า ก) และ ข) PLA, ค) และ ง) PHBV, จ) และ ฉ) PBS

- ผลการวิเคราะห์ประจุที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การวิเคราะห์หาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{PZC}) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุที่ผิวของวัสดุตัวกลางเท่ากับศูนย์ ด้วยวิธี pH-drift method โดยค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 เริ่มต้นจากการบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไนเตรทความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 200 มล. และเม็ดพลาสติกชีวภาพ 0.2 ก./ล. ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นตามต้องการด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล นำไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชม. ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที แล้ววัดค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป

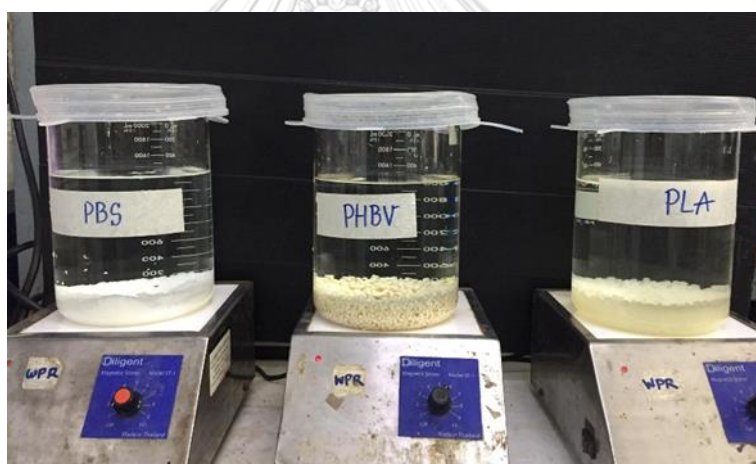


รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ประจุที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด

กราฟรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าผลต่างระหว่างพีเอชเริ่มต้นและพีเอชสุดท้ายของการตรวจวัดประจุที่พื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมากกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพจะแสดงประจุเป็นลบ ในขณะที่ถ้าค่าพีเอชของสารละลายน้อยกว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ประจุบนผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพจะแสดงประจุเป็นบวก จากการทดลองพบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA, PHBV และ PBS มีค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวมีค่าเท่ากับศูนย์เท่ากับ 3.24 2.00 และ 3.59 นั่นคือพีเอชในช่วงเป็นกรด (พีเอชต่ำกว่า 4) เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดจะแสดงประจุบวกที่พื้นผิว แต่หากปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง (พีเอชสูงกว่า 4) ประจุที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดจะแสดงประจุเป็นลบ

4.1.2 ศึกษาการละลายและดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบสมบัติการละลายน้ำและตรวจสอบการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบการละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI) การทดสอบการละลายในน้ำประปา และตรวจสอบการดูดซับไนเตรทบนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามการทดลองจะเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลาทั้งสิ้น 35 วัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยควบคุมค่าพีเอชตลอดการทดลองในช่วงที่เป็นกลาง (7.1-7.8) บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดปริมาณร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ลงในแต่ละบีกเกอร์โดยค่าน้ำหนักเริ่มต้นเม็ดพลาสติกชีวภาพของการทดลองแต่ละส่วนแสดงดังตารางที่ 4.1 วางชุดการทดลองบนเครื่องกวนสารละลายตลอดเวลา และปิดปากภาชนะด้วยแผ่นยางเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 7 วัน เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและไนเตรท



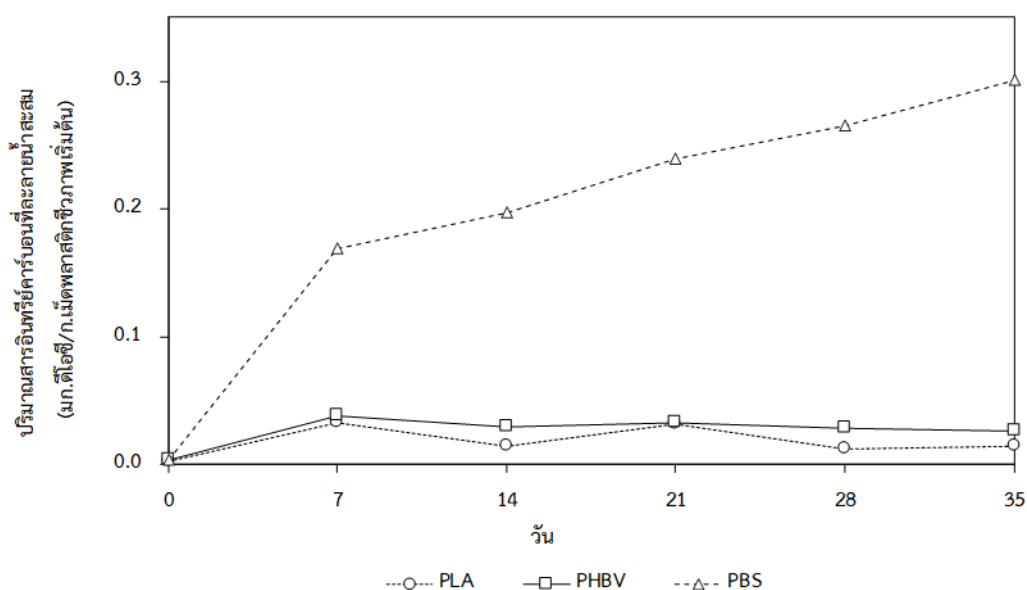
รูปที่ 4.5 การทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพร้อยละ 10 ก่อนเริ่มเดินระบบในแต่ละการทดลอง

การทดลอง	น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น (กรัม)		
	PLA	PHBV	PBS
1. ทดสอบในน้ำ DI	120.91±0.04	106.87±0.04	110.85±0.00
2. ทดสอบในน้ำประปา	125.1±0.03	103.75±0.02	111.42±0.01
3. ทดสอบในน้ำที่มีไนเตรท	124.9±0.07	101.43±0.01	110.01±0.02

- ผลการทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำปราศจากไอออน (DI)

กราฟรูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำหรือดีไอซี (DOC) สะสมจากการแช่เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ในน้ำปราศจากไอออนที่พีเอช 6.7 ± 0.2 พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS แสดงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยในช่วง 7 วันแรกตรวจพบปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสะสมเท่ากับ 0.17 มก.ดีไอซี/ก. เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงในช่วงวันที่ 8 ถึงวันที่ 35 ของการทดลอง โดยแสดงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสะสมเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.02 – 0.03 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้นในทุกๆ 7 วัน ขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และ PHBV ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสะสมน้อยมากคิดเป็นปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.018 และ 0.026 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้นตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการทดลอง 35 วัน

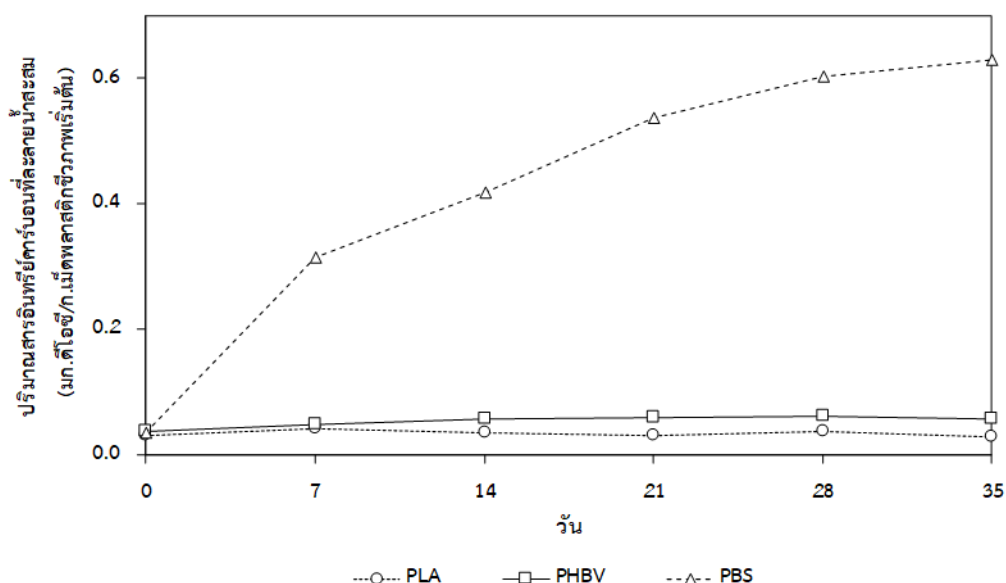


รูปที่ 4.6 ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ในน้ำปราศจากไอออน

- ผลการทดสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำประปา

นอกจากทำการทดสอบในน้ำปราศจากไอออนแล้ว ยังตรวจสอบการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำประปาด้วย เนื่องจากในการเดินระบบช่วงการทดลองที่ 2 และ 3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นจากน้ำประปาที่พีเอช 7-8 นอกจากนี้ยังเป็นการเปรียบเทียบการละลายของ

เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดระหว่างน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออนอีกด้วย ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำปราศจากไอออน แต่ทั้งสองการทดลองแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำที่คล้ายกัน กล่าวคือในช่วง 7 วันแรกค่าดีไอซีของชุดการทดลองที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นลักษณะเส้นตรง คิดเป็นปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสะสมในช่วง 7 วันแรกเท่ากับ 0.315 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น จากนั้นในช่วงวันที่ 8 ถึงวันที่ 35 มีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้น 0.1 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้นในทุกๆ 7 วัน โดยเมื่อทำการทดลองในน้ำประปาเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และ PHBV มีปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสูงกว่าน้ำปราศจากไอออน คิดเป็นปริมาณสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.03 และ 0.05 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น ตามลำดับที่ระยะเวลาทดลอง 35 วัน



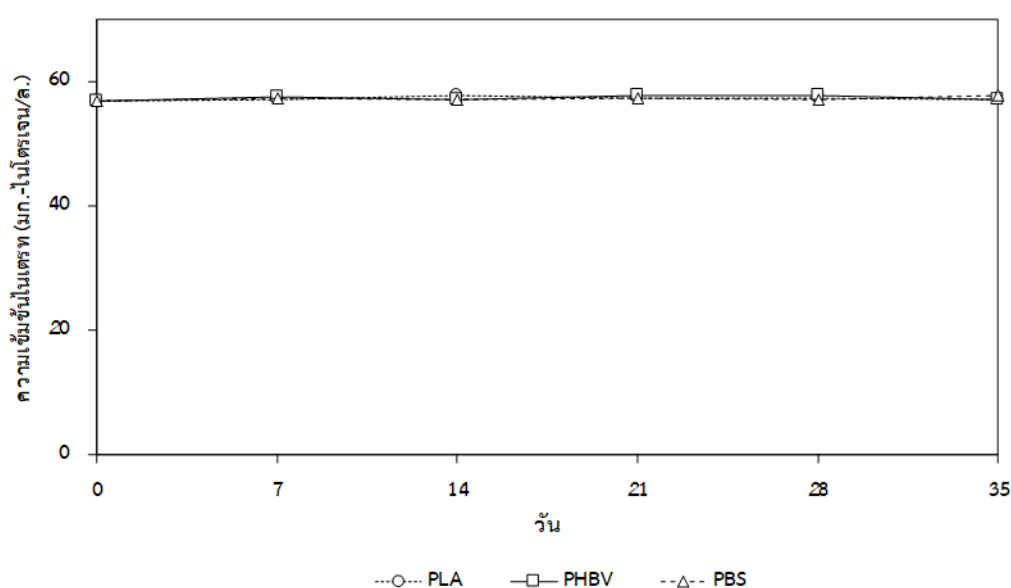
รูปที่ 4.7 ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดในน้ำประปา

ทั้งนี้ผลการศึกษการละลายของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำปราศจากไอออนและน้ำประปามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสที่แสดงถึงความชอบน้ำ-ไม่ชอบน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพในหัวข้อที่ผ่านมา โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีความชอบน้ำมากกว่า PHBV และ PLA ตามลำดับ จึงตรวจพบการละลายของสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำออกมามากกว่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิดในน้ำปราศจากไอออนและ

น้ำประปามีค่าน้อยมาก สารอินทรีย์คาร์บอนที่มาจากการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพเพียงอย่างเดียวไม่น่าเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการกำจัดไนเตรททางชีวภาพ ดังนั้นกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ต้องอาศัยกลไกการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพเหล่านี้ผ่านกระบวนการเมตาบอริซึมของจุลินทรีย์ร่วมด้วย จึงจะทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณเพียงพอต่อการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็งและตัวให้อิเล็กตรอนสำหรับปฏิกิริยาเพื่อรีดิวซ์ไนเตรท

- ผลการตรวจสอบการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

การทดลองนี้เดินระบบเช่นเดียวกับ 2 การทดลองที่ผ่านมา แต่เปลี่ยนน้ำที่ใช้ในการทดสอบจากน้ำที่ไม่มีสารปนเปื้อนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไนเตรท ในสถานะที่มีการควบคุมค่าพีเอชในช่วงที่เป็นกลาง (7.1-7.8) น้ำที่ใช้ในการทดสอบมีความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นเท่ากับ 57 มก.-ไนโตรเจน/ล. ผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นไนเตรทในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิดไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับไนเตรทเริ่มต้นคือ 57 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตลอดระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 35 วัน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์ เนื่องจากขณะทำการทดลองนี้ค่าพีเอช ที่วัดได้ตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 7.4 – 7.8 ซึ่งมากกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นศูนย์เมื่ออยู่บนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ดังนั้นเมื่อพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทุกชนิดมีค่าประจุเป็นลบ จึงไม่ส่งผลให้เกิดการดูดซับไนเตรทที่มีประจุเป็นลบเช่นเดียวกันบนพื้นผิวดังกล่าว



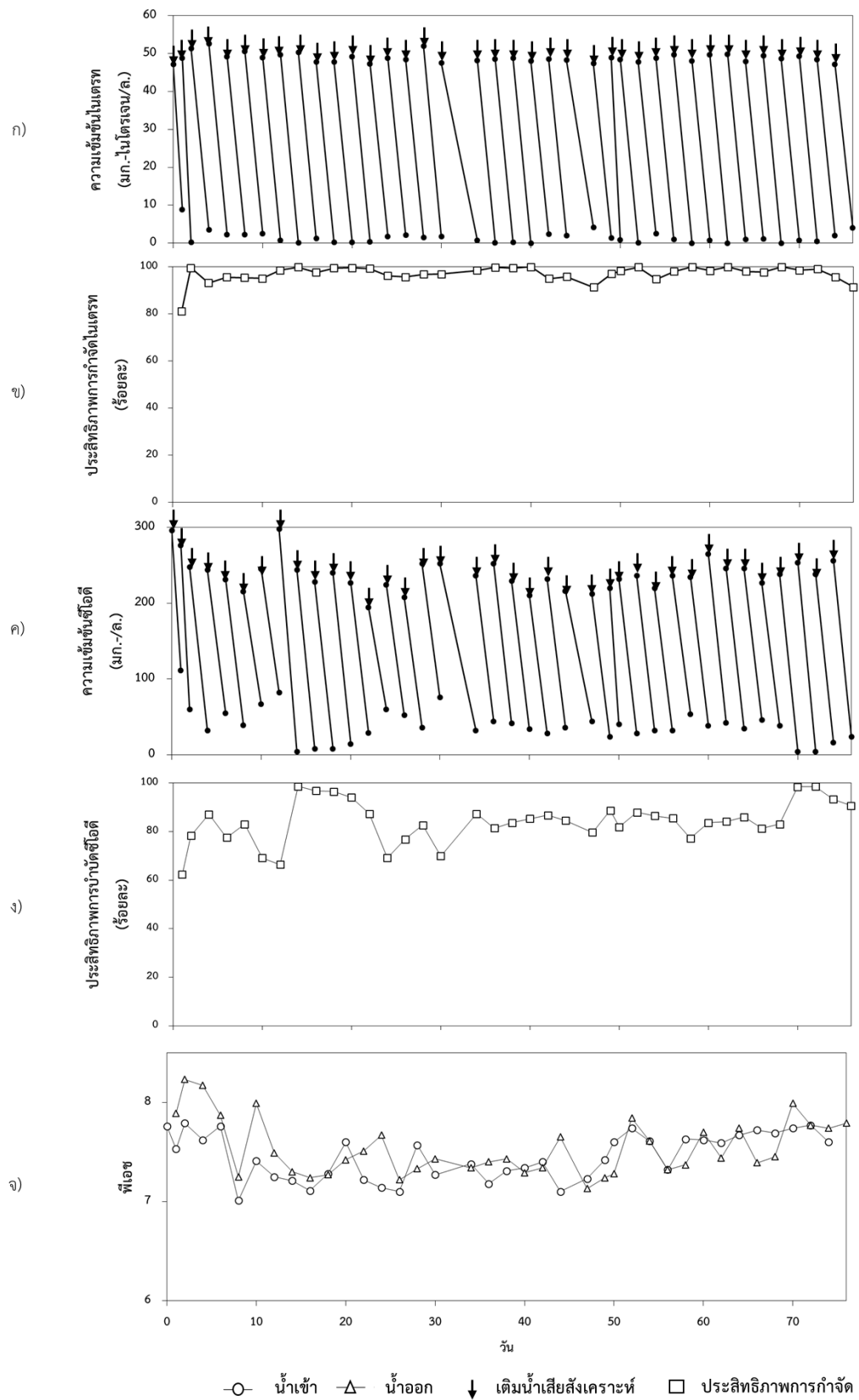
รูปที่ 4.8 การดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด

4.2 การเริ่มต้นเดินระบบและการเดินระบบการทดลองแบบทีละเท

4.2.1 การเริ่มต้นเดินระบบ

ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการกระตุ้นหัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มดีไนโตริฟิเคชันซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในการเดินระบบเลือกใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี (UASB; Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor) ของโรงงาน รอยัลฟู้ด จำกัด เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ทำการเดินระบบแบบทีละเทในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 10 ลิตร เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 8,000 มก./ล. ปริมาตร 1.6 ล. ลงในถังปฏิกรณ์ แล้วป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 6.4 ล. ที่มีค่าสัดส่วนซีโอดีต่อไนเตรท (ในรูปไนโตรเจน) เท่ากับ 5 ต่อ 1 โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและใช้โซเดียมไนเตรทเป็นแหล่งของไนเตรท มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีในช่วง 250 มก./ล. และความเข้มข้นไนเตรทคงที่ประมาณ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. มีการเติมธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์อย่างครบถ้วนระหว่างการทดลองจะทำการเติมน้ำเสียใหม่ทุกๆ 2 วัน โดยพบว่าถังปฏิกรณ์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 34 วัน ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ไนเตรท ซีโอดี และพีเอช ตลอดระยะเวลาการเดินระบบต่อเนื่องทั้งสิ้น 76 วัน

ความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ยในน้ำเสียสังเคราะห์ของการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 48.88 ± 1.24 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยตั้งแต่วันที่ 34 ของการทดลองพบว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว สังเกตได้จากน้ำออกมีค่าความเข้มข้นไนเตรทลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 มก.-ไนโตรเจน/ล. (รูปที่ 4.9ก) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 97.04 ± 3.52 (รูปที่ 4.9ข) สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 83.95 ± 8.86 (รูปที่ 4.9ง) โดยน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 238.72 ± 21.41 มก./ล. และมีค่าลดลงเมื่อผ่านการกำจัดโดยมีค่าซีโอดีลดลงเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 38.16 ± 22.46 มก./ล. (รูปที่ 4.9ค) จะเห็นได้ว่าถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความเข้มข้นซีโอดีหลังการกำจัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (น้อยกว่า 120 มก./ล.) ค่าพีเอชน้ำตลอดการทดลองอยู่ในช่วงเป็นกลาง น้ำเข้าระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.46 ± 0.23 ขณะที่น้ำออกมีค่าเฉลี่ย 7.54 ± 0.28 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อเกิดปฏิกิริยาดีไนโตริฟิเคชัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)



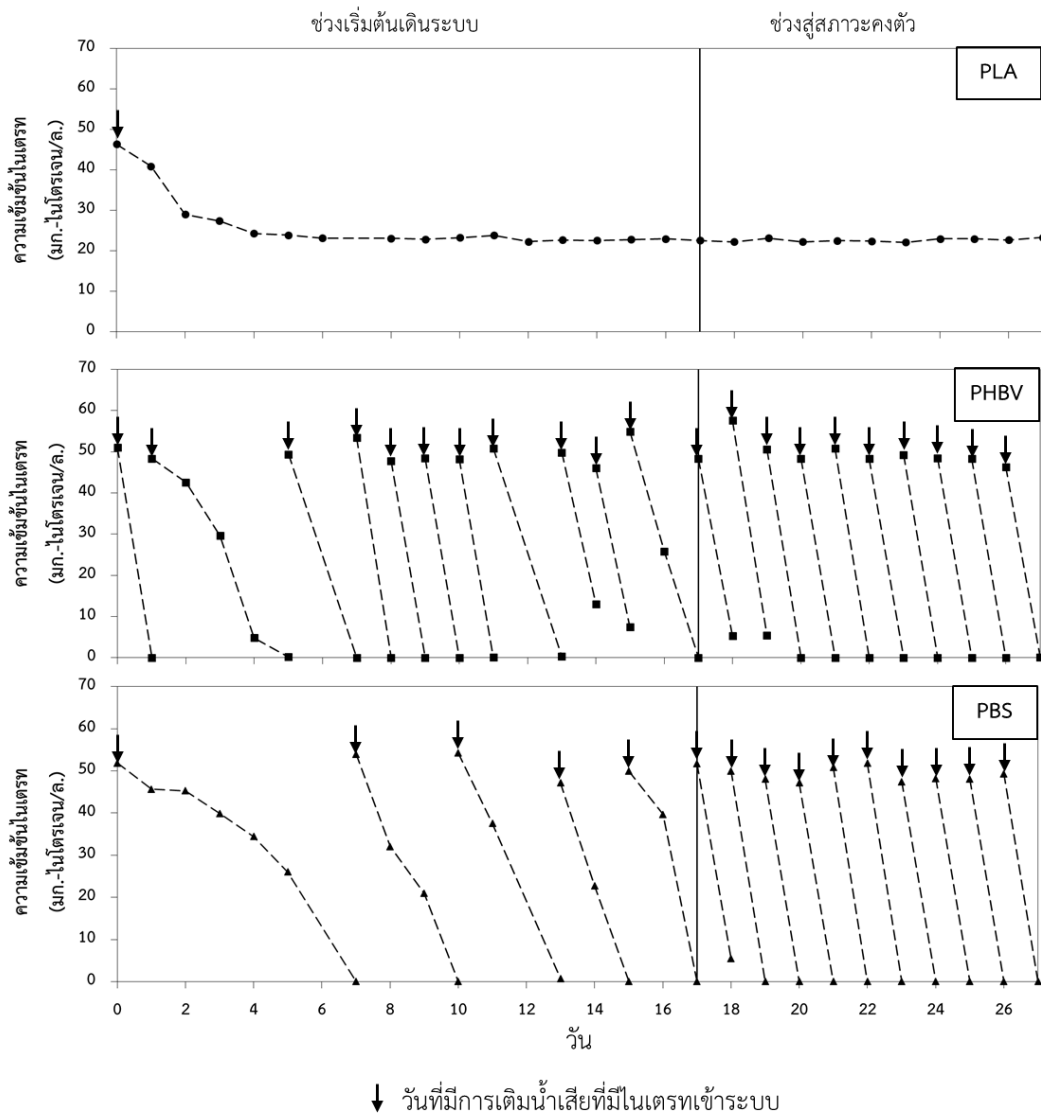
รูปที่ 4.9 พารามิเตอร์ต่างๆ จากการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

4.2.2 ประสิทธิภาพกำจัดไนเตรทของการเดินระบบแบบที่ละเท

การทดลองนี้ศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรทในชุดการทดลองแบบที่ละเท โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพยังเป็นตัวกลางเพื่อยึดเกาะและสร้างฟิล์มชีวภาพของจุลินทรีย์ในระบบอีกด้วย ใช้ระยะเวลาเดินระบบทั้งสิ้น 27 วัน ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ปริมาตร 2 ลิตร บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดร้อยละ 15 โดยปริมาตร และบรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ได้ผ่านการกระตุ้นให้มีหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟิอิง มีความเข้มข้นประมาณ 1,500 มก./ล. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแต่องค์ประกอบของไนเตรทเฉลี่ย 51 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตรลงในแต่ละถังปฏิกรณ์ และติดตามประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและสังเกตการเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆที่บ่งชี้การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.10 พบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบการทดลอง (วันที่ 1-17) ของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนไนเตรทถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วคิดเป็นปริมาณที่ถูกกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 7.75 และ 23.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้ในช่วงดังกล่าวยังไม่พบการสร้างฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวเม็ดพลาสติกและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำจากเม็ดพลาสติกชีวภาพยังไม่เพียงพอต่อการกำจัดไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ โดยเป็นระยะที่จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์อยู่ระหว่างการปรับตัวและคัดเลือกสายพันธุ์เพื่อให้คงเหลือเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถเติบโตจากการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนได้ ทั้งนี้ในระหว่างการทดลองได้ทำการควบคุมสภาวะต่างๆ ของการเดินระบบคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิประมาณ 31-32 °C พีเอชระหว่าง 7-8 ปริมาณออกซิเจนละลายในช่วง 0.06-0.2 มก./ล. โดยเมื่อเวลาผ่านไป 17 วันชุดการทดลองที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90 มีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบลดลงจนมีค่าคงเหลือเพียง 0.98 และ 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. ขณะที่ชุดทดลองของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเพียงร้อยละ 48 และมีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 23.96 ± 3.77 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ไม่เพียงพอต่อการรีดิวซ์ไนเตรททางชีวภาพซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA มีความไม่ชอบน้ำสูง ละลายน้ำได้น้อยมาก ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนจากการละลายน้ำไม่เพียงพอต่อการกำจัดไนเตรทจึงต้องการกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการช่วยย่อยสลายโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ของ PLA ให้เล็กลง

จุลินทรีย์ดีไนโตรไฟอิงแบคทีเรียจึงจะสามารถนำสารอินทรีย์คาร์บอนที่เกิดขึ้นไปใช้ในกระบวนการดีไนโตรฟิเคชันได้



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไนเตรท เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิดเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน

เมื่อคำนวณอัตราการกำจัดไนเตรทของการเดินระบบที่ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA, PHBV และ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน ภายหลังจากเดินทำการทดลองเป็นเวลา 27 วัน โดยเปรียบเทียบอัตราการกำจัดไนเตรทระหว่างการใส่เม็ดพลาสติกชีวภาพสามชนิด พบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (วันที่ 1-17) เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีอัตราการกำจัดไนเตรทช้ากว่า PHBV โดยต้องการระยะเวลาที่น้ำถึง 7 วันจึงสามารถกำจัดไนเตรทหมดได้ในรอบแรก หลังจากนั้น

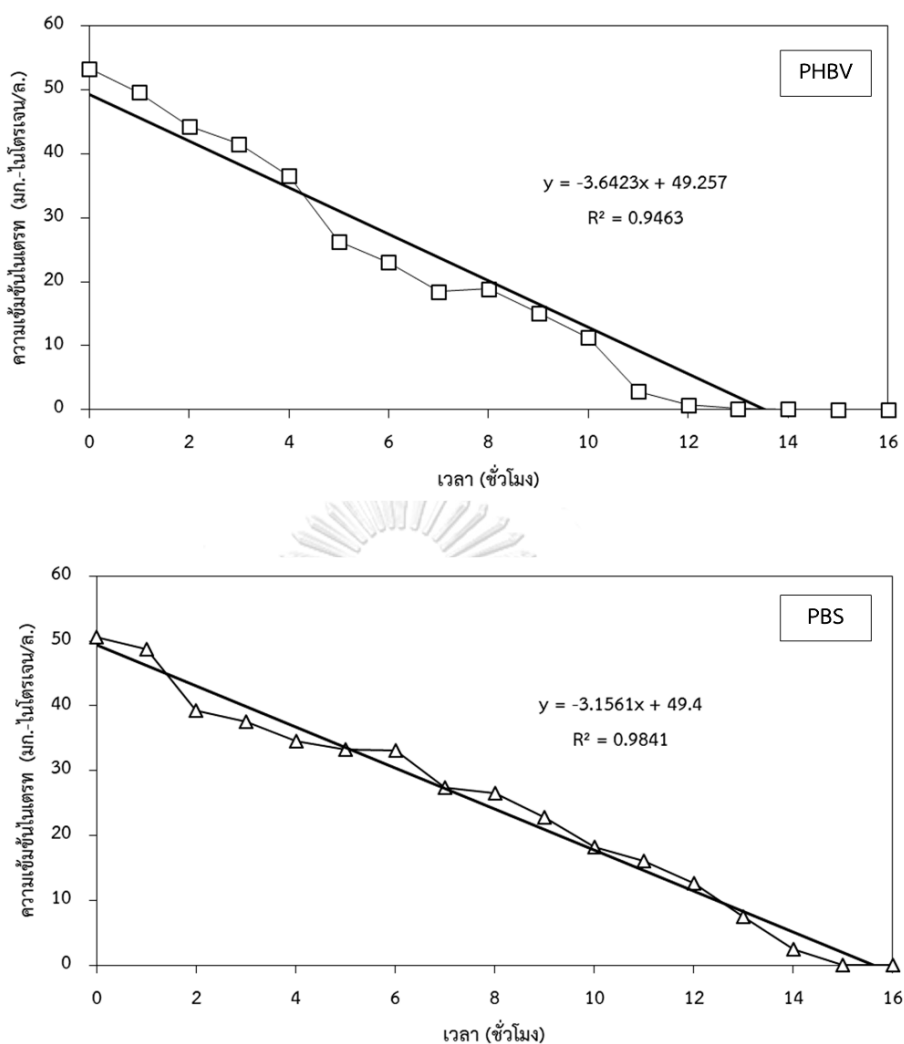
ระยะเวลาในการกำจัดไนเตรทรอบถัดไปลดลงเป็น 3 และ 2 วันตามลำดับ ภายหลังจากเติมน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ที่มีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 51 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ลงในถังปฏิกรณ์รอบที่ 2 และ 3 ขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ใช้ระยะเวลาพักน้ำเพียง 3 วันระบบก็สามารถกำจัดไนเตรทหมดได้ในการเดินระบบรอบแรก และใช้เวลากำจัดไนเตรทลดลงเป็น 1 วัน ในรอบของการเดินระบบครั้งต่อไป อาจกล่าวได้ว่าจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV สามารถปรับตัวได้ดี และเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์บนเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดนี้ได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นภายหลังจากเดินระบบพัน 17 วัน พบว่าถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS มีประสิทธิภาพกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 โดยมีอัตราการกำจัดไนเตรทอยู่ในช่วง 48-52 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 1 วัน ส่วนเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA พบว่ามีอัตราการกำจัดไนเตรทต่ำกว่าการใช้ PHBV และ PBS ทั้งนี้ผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่า PLA สามารถใช้เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรทได้ แต่ไม่สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำเสียที่ยาวนานกว่าการใช้พลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ เช่น PHBV PBS และ PCL เป็นต้น โดยจุลินทรีย์สามารถปรับตัวและย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ได้อย่างสมบูรณ์ในระยะเวลา 40 วัน (Fan และคณะ, 2012) ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรท จึงสามารถสรุปได้ว่า เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV มีอัตราการกำจัดไนเตรทสูงกว่าชนิด PBS และ PLA ในช่วงแรกของการเริ่มต้นเดินระบบ โดยใช้ระยะเวลากำจัดไนเตรทสั้นกว่าและมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงกว่า เนื่องจากเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS และ PLA โดยสังเคราะห์ขึ้นจากการนำ 3-hydroxybutyrate (3HB) และ 3-hydroxyvalerate (3HV) มาเชื่อมต่อกันเป็นอะลิฟาติกโพลิเอสเทอร์ จึงเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Hiraishi and Khan, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเม็ดพลาสติกชีวภาพถูกย่อยสลายทางชีวภาพจะทำให้ได้สารอินทรีย์ที่มีความสามารถละลายน้ำได้ง่าย ซึ่งจะอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก และกรดโพรไพโอนิก เป็นต้น ในการเดินระบบแบบที่สังเกตพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีกรดอินทรีย์ในรูปของกรดบิวทิริกสะสมอยู่ในน้ำประมาณ 400 มก./ล. ในขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA และ PHBV ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจาก PLA ไม่ละลายน้ำและ PHBV มีองค์ประกอบที่แตกต่างจากสารมาตรฐานที่ใช้ในการวัดได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก และกรดโพรไพโอนิก

4.2.3 อัตราการกำจัดไนเตรทและজনপলাস্টার্সของการเดินระบบแบบทีละเท

เมื่อระบบการทดลองเข้าสู่สภาวะวะคงตัว (หลังเวลาผ่านไป 27 วัน) จึงนำเม็ดพลาสติกชีวภาพสองชนิด (PHBV และ PBS) จากชุดการทดลองที่ผ่านมาซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 มาศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรท โดยทำการทดลองแบบทีละเทในถังปฏิกรณ์ชุดใหม่ซึ่งมีปริมาตร 2 ลิตรที่บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นเฉลี่ย 51.9 มก.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1 ลิตร เดินระบบการทดลองโดยวางถังปฏิกรณ์บนเครื่องกวนสารละลายให้เม็ดพลาสติกชีวภาพเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสกับน้ำเสียตลอดเวลา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในรูปของดีไอซี

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ PHBV และ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 ยืนยันว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order reaction) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9463 และ 0.9841 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wu และคณะ (2012) ที่ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพผสมสองชนิดได้แก่ชนิด PHBV และ PLA เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน โดยทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เช่นเดียวกัน และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 ทั้งนี้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์เป็นรูปแบบปฏิกิริยาที่มีอัตราการกำจัดคงตัวและไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร ดังนั้นในการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งคาร์บอน ความเข้มข้นของไนเตรทไม่มีผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทต่อระยะเวลาเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน พบว่าปริมาณไนเตรทในถังปฏิกรณ์ทั้งสองค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทร้อยละ 98.64 และมีความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือเท่ากับ 0.7 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชม. ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีปริมาณความเข้มข้นไนเตรทเข้าใกล้ศูนย์ในชั่วโมงที่ 15 คิดเป็นมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทร้อยละ 100 โดยตลอดระยะเวลาทำการทดลองตรวจไม่พบแอมโมเนียและไนไตรท์เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน



รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในการเดินระบบถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ แบบที่ละเท

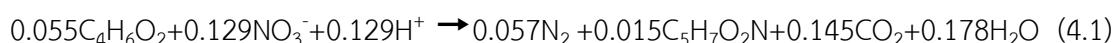
เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ชุดการทดลองพบว่าอัตราการกำจัดไนเตรทเท่ากับ 3.64 และ 3.15 มก.-ไนโตรเจน/ล.-ชม. และอัตราการกำจัดไนเตรทจำเพาะโดยมวลของเม็ดพลาสติกชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 2.22 ± 1.50 และ 1.80 ± 1.70 มก.-ไนโตรเจน/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพ-ล.-ชม. เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบอัตราการกำจัดไนเตรทของการทดลองนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ได้ผลดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้แหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของสารละลาย เช่น กลูโคส เมทานอล มีค่าต่ำกว่าการใช้แหล่งอินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็ง กล่าวได้ว่าปฏิกิริยารีดิวซ์ไนเตรทเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้สารอินทรีย์คาร์บอนต่างๆ ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

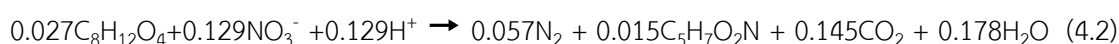
สารอินทรีย์คาร์บอน	อัตราการกำจัดไนเตรท (มก.-ไนเตรท/ล.-ชม.)	รูปแบบ ถึงปฏิกรณ์	เอกสารอ้างอิง
กลูโคส	1.7	คอลัมน์	Honda และคณะ (1993)
เมทานอล	1.8	คอลัมน์	Suzuki และคณะ (2003)
PCL	6.34	เบดเคลื่อนที่	Xu และคณะ (2011)
PLA/PHBV	6.63	แบบที่ละเท	Xu และคณะ (2011)
ซีลี้อย	1.22	เบดนิ่ง	Hu และคณะ (2019)
PHBV	4.02	เบดเคลื่อนที่	งานวิจัยนี้
PBS	3.19	แบบที่ละเท	งานวิจัยนี้

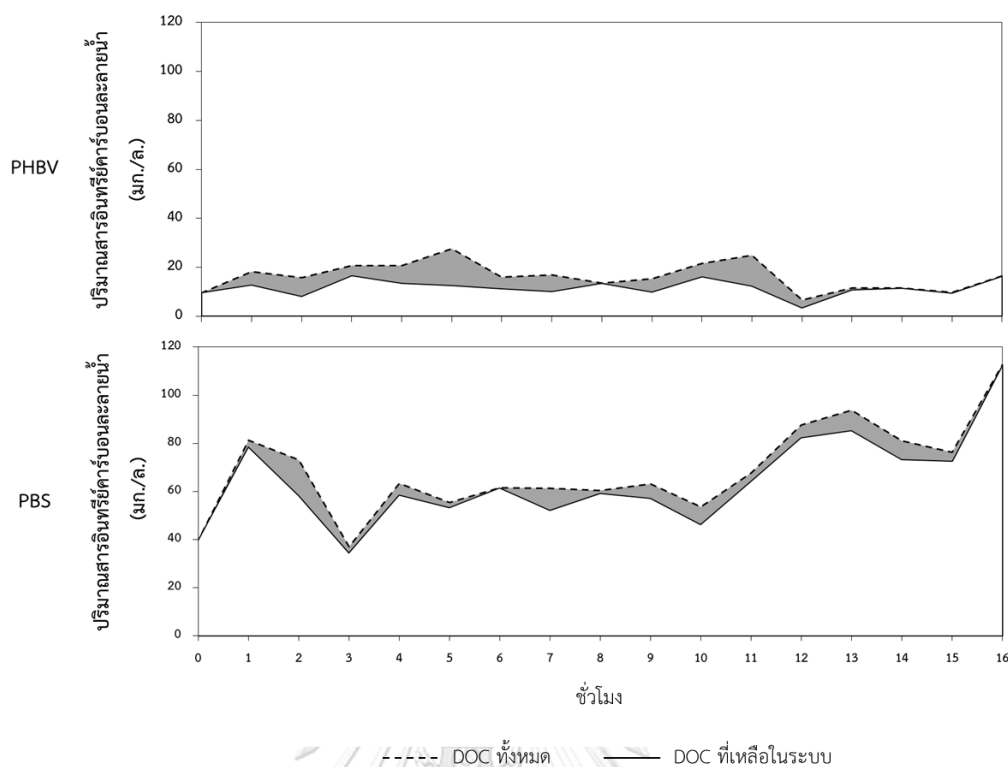
รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำหรือดีไอซีในการศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS จะเห็นได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงเมื่อถูกนำไปใช้ในการกำจัดไนเตรท จนเมื่อไนเตรทในระบบลดลงจนมีความเข้มข้นเข้าใกล้ศูนย์ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนคงเหลือในน้ำจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนคงเหลือเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 11.64 ± 3.24 และ 64.04 ± 18.88 มก.ดีไอซี/ล. ทั้งนี้เมื่อคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรท ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าสัดส่วนสารอินทรีย์ต่อไนเตรท-ไนโตรเจนในรูปคาร์บอนละลายน้ำเฉลี่ยของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยคิดเป็นสัดส่วน DOC : NO_3^- -N ที่เหมาะสมทางทฤษฎีเท่ากับ 1 : 0.68 และ 1 : 0.63 สำหรับพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS ตามลำดับ

PHBV :



PBS :





รูปที่ 4.12 ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายหรือดีไอซี ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน

ทั้งนี้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.12 คือค่าซีไอดีคงเหลือจากการใช้เพื่อกำจัดไนเตรทจากการวิเคราะห์ และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total DOC) นี้ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยผลต่างระหว่างปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งสองค่า (ส่วนที่แรงแงในรูป) จะแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่ถูกใช้ไปสำหรับการกำจัดไนเตรท โดยมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกใช้ไปเฉลี่ยเท่ากับ 4.64 ± 4.44 และ 4.71 ± 3.94 มก.ดีไอซี/ล. และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 16.28 ± 5.62 และ 68.75 ± 19.04 มก.ดีไอซี/ล. สำหรับเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS ตามลำดับ จากผลการทดลองปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีค่าสูงกว่า PHBV เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีความชอบน้ำและละลายน้ำได้ดี รวมถึงถูกย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้ง่าย ในขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ละลายน้ำได้น้อย ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนเหล่านี้จะเกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เท่านั้น

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรท เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์แอน็อกซิเจนชนิดเบดเคลื่อนที่เมื่อทำการเดิน

ระบบแบบที่ละเท สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับศูนย์ เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV มีอัตราการกำจัดไนเตรทสูงกว่า PBS และใช้เวลาในการกำจัดไนเตรทที่ความเข้มข้นคงเหลือเข้าใกล้ศูนย์น้อยกว่า PBS ที่เวลา 12 และ 15 ชม. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์	เม็ดพลาสติกชีวภาพ	
	PHBV	PBS
1. อันดับปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์
2. R^2	0.9463	0.9841
3. เวลาที่ใช้ในการกำจัด (ชม.)	12	15
4. k_0 (มก./ล.-ชม.)	-3.64	-3.15
5. อัตราการกำจัดไนเตรทจำเพาะโดยมวลของเม็ดพลาสติกชีวภาพเฉลี่ย (มก.-ไนโตรเจน/ก.เม็ดพลาสติก-ล.-ชม.)	2.22 ± 1.50	1.80 ± 1.70

4.3 การเดินระบบถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง

การทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ เมื่อทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน เริ่มต้นจากการบรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ปรากฏฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิว จากการทดลองที่ผ่านมา (การทดลองที่ละเท) ลงในถังปฏิกรณ์ร้อยละ 20 (โดยปริมาตร) เติมห่วงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) และน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรท 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร เดินระบบในสภาวะที่มีการเวียนน้ำในระบบเพื่อให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่และเพิ่มการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ โดยใช้ค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำที่ได้จากการทดลองการหาค่าจลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรท นั่นคือกำหนดระยะเวลาพักน้ำ (HRT) สำหรับถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เท่ากับ 12, 16, 20 และ 24 ชม. และถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เท่ากับ 12, 8, 4 และ 2 ชม. เพื่อหาระยะเวลากักน้ำที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทสูงสุด ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนโตรท์ แอมโมเนีย ซีไอที ดีไอซี ออกซิเจนละลาย พีเอช ของแข็งแขวนลอย สภาพต่างเป็นระยะเพื่อประเมินสมรรถนะการเดินระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์

4.3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ

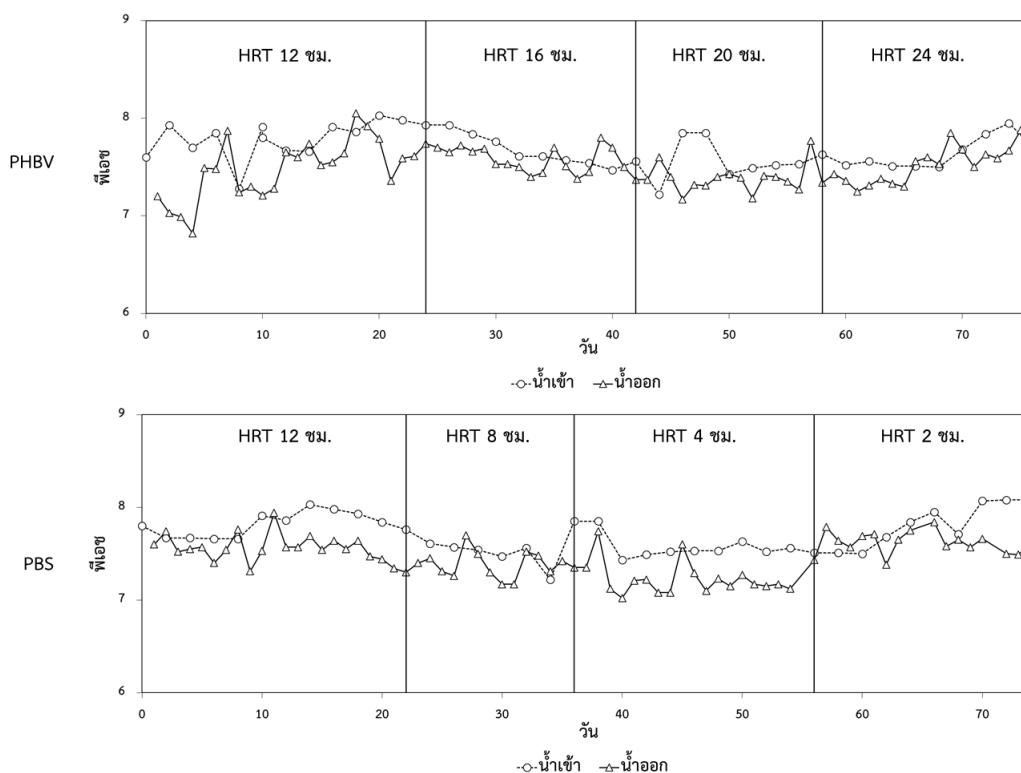
ในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางเพื่อกำจัดไนเตรท พารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบได้แก่ พีเอช ค่าสภาพต่าง และค่าออกซิเจนละลาย โดยจะควบคุมให้พารามิเตอร์เหล่านั้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ทั้งนี้หากค่าพีเอชและออกซิเจนละลายอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลยับยั้งทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงและมีการสะสมของไนโตรเจนในระบบ ระหว่างการเดินระบบจึงต้องทำการตรวจติดตามค่าพีเอชและออกซิเจนละลายทุกวัน ส่วนสภาพต่างจะตรวจวัดวันเว้นวัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- พีเอช

ควบคุมค่าพีเอชในระหว่างการเดินระบบให้อยู่ในช่วง 6.8-8.5 ซึ่งเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Gerardi, 2002) และเป็นช่วงพีเอชที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพแสดงประจุเป็นลบจึงไม่ดูดซับไนเตรทบนตัวกลาง กราฟรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกันพบว่า ระบบที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลาง ค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 16, 20 และ 24 ชม. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.78 ± 0.20 , 7.65 ± 0.23 , 7.52 ± 0.16 และ 7.74 ± 0.23 ตามลำดับ และน้ำออกมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.48 ± 0.30 , 7.58 ± 0.13 , 7.38 ± 0.13 และ 7.54 ± 0.23 ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 8, 4 และ 2 ชม. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.8 ± 0.15 , 7.52 ± 0.18 , 7.57 ± 0.11 และ 8.00 ± 0.13 ตามลำดับ ขณะที่น้ำออกมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.56 ± 0.15 , 7.38 ± 0.14 , 7.24 ± 0.18 และ 7.62 ± 0.12 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของระบบทุกช่วงการทดลองเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทั้งนี้โดยทั่วไปในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปละลายน้ำ กระบวนการเมตาบอลิซึมจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงที่เกิดขึ้นจะสร้างค่าสภาพต่างทำให้พีเอชของระบบเพิ่มขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดลองนี้ค่าพีเอชของน้ำออกจากระบบกลับมีค่าลดลงเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากผลผลิตในรูปกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยเม็ดพลาสติกชีวภาพโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ไม่ละลายน้ำ เมื่อถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลงและละลายน้ำได้ สารอินทรีย์ละลายน้ำดังกล่าวจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปกรด

ไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทริก โพรไพโอนิก และไอโซบิวทริก (Xu และคณะ, 2018) ทำให้ค่าพีเอชของน้ำภายในระบบลดลง



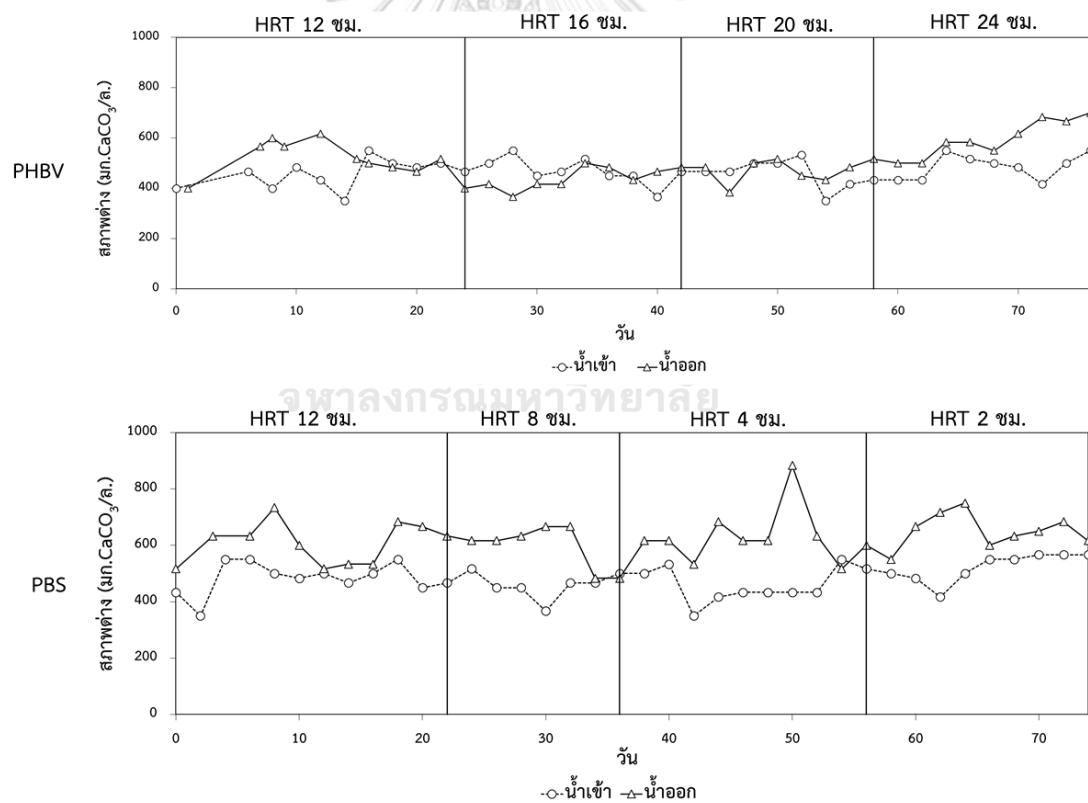
รูปที่ 4.13 ค่าพีเอชระหว่างการเดินทางระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกัน เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ค่าสภาพต่าง CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่าสภาพต่างเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญใช้ในการควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและระบบดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ค่าสภาพต่างสามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในระบบได้ เนื่องจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเป็นการสร้างค่าสภาพต่างกลับคืนมาโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิง ทั้งนี้ตามสมการมวลสารสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์จะผลิตค่าสภาพต่าง 3.57 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ก.ไนโตรเจน ที่ถูกรีดิวซ์ไป เมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน (ดังสมการที่ 4.3) อย่างไรก็ตามสภาพต่างที่เกิดขึ้นดังกล่าวยังน้อยกว่าสภาพต่างที่ถูกลดลงในขั้นตอนดีไนตริฟิเคชัน จึงควรเติมสภาพต่างเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมพีเอชให้เหมาะสมกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)



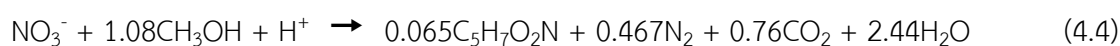
ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพต่างเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าสภาพต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าถังปฏิกรณ์ PHBV มีค่าเฉลี่ย 470.27 ± 55.71 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และน้ำออกมีค่าสภาพต่างเฉลี่ย 507.21 ± 83.38 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ที่ระยะเวลาพักน้ำ 20 และ 24 ชม. โดยค่าสภาพต่างของน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าในช่วงระยะเวลาพักน้ำ 12 และ 16 ชม. ส่วนค่าสภาพต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าถังปฏิกรณ์ PBS มีค่าสภาพต่างเฉลี่ย 485.53 ± 60.54 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และน้ำออกมีค่าสภาพต่างเฉลี่ย 636.49 ± 81.44 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยสังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาพักน้ำทั้ง 4 ช่วง น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพต่างเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถช่วยควบคุมให้ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุ PBS มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน



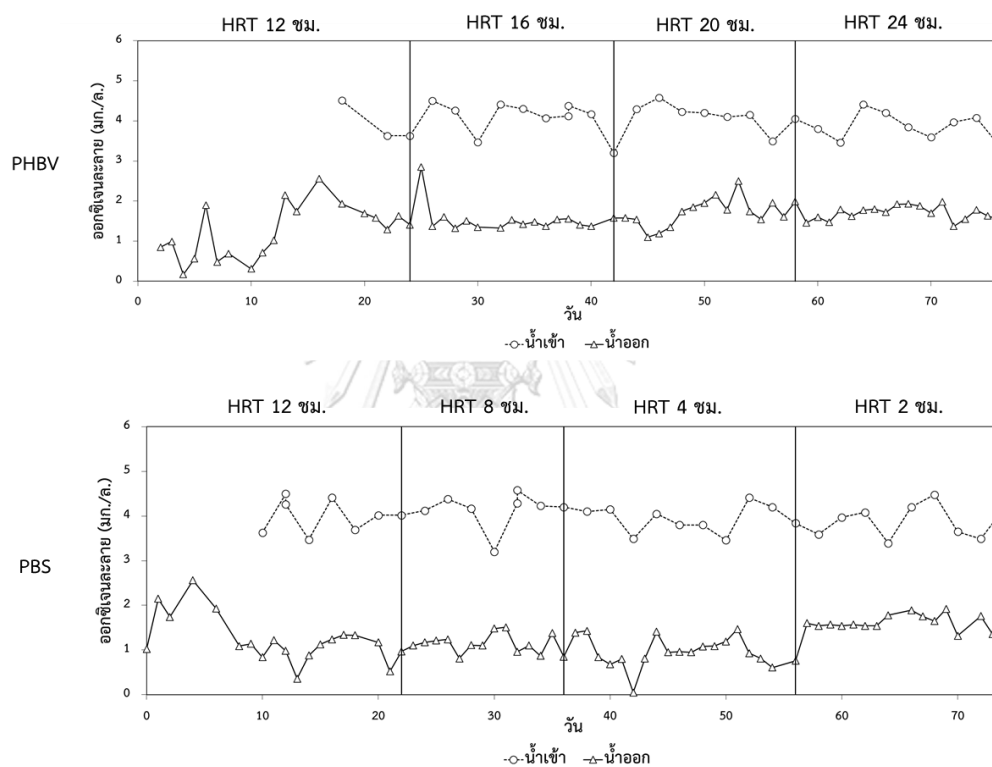
รูปที่ 4.14 ค่าสภาพต่างระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกัน เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS

- ค่าออกซิเจนละลาย

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันค่าออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ สามารถบอกถึงสมรรถนะของระบบได้ เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าไนเตรท หากระบบมีปริมาณออกซิเจนในน้ำสูงก็จะส่งผลยับยั้งให้อัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันช้าลง (Ni และคณะ 2016) รูปที่ 4.15 พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของระบบเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 16, 20 และ 24 ชม. มีค่าเฉลี่ย 4.21 ± 0.50 , 4.09 ± 0.42 , 4.03 ± 0.42 และ 3.88 ± 0.32 มก./ล. ตามลำดับ และปริมาณออกซิเจนละลายภายในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 1.24 ± 0.67 , 1.53 ± 0.35 , 1.70 ± 0.35 และ 1.70 ± 0.17 มก./ล. ตามลำดับ ปริมาณออกซิเจนละลายในแต่ละระยะเวลากักน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงระยะกักน้ำที่ 12 16 และ 20 ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทได้ต่ำ อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาพักน้ำ 24 ชั่วโมง ระบบสามารถกำจัดไนเตรทได้ร้อยละ 84.83 ± 4.58 ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลาง มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเข้าเฉลี่ย 4.00 ± 0.41 , 4.12 ± 0.41 , 3.99 ± 0.31 และ 3.89 ± 0.35 มก./ล. ตามลำดับ และออกซิเจนละลายในถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ย 1.24 ± 0.53 , 1.12 ± 0.22 , 0.95 ± 0.33 และ 1.42 ± 0.43 มก./ล. ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 8, 4 และ 2 ชม.ตามลำดับ โดยทุกช่วงของการเดินระบบสามารถกำจัดไนเตรทได้มากกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้ผลของปริมาณออกซิเจนละลายที่วัดได้จากถังปฏิกรณ์ทั้งสองสอดคล้องกับการศึกษาของ Xu และคณะ (2018) ที่ทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ชนิดตัวกลางอยู่กับที่ (Packed bed bioreactor) และใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลาง พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายภายในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 1.52 – 3.26 มก./ล. เช่นเดียวกับการศึกษาของ Luo และคณะ (2016) ที่ทำการศึกษาผลของออกซิเจนละลายต่อการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PCL ซึ่งพบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำที่น้อยกว่า 6 มก./ล. ไม่ส่งผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้จากการศึกษาของ S. P. Burghate และ N. W. Ingole (2013) รายงานว่าเมื่อใช้เมทานอลเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันดังแสดงในสมการที่ 4.4 โดย (Metcalf และ Eddy, 2014) พบว่าปริมาณเมทานอลที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการสร้างเซลล์เท่ากับร้อยละ 25-30 อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำในระบบเพิ่มขึ้นความต้องการใช้เมทานอลก็จะเพิ่มขึ้นสูงด้วย โดยทั่วไปพบว่าปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการกำจัดไนเตรทมีค่าเท่ากับ 3 กก.-เมทานอล/กก.-ไนเตรท-ไนโตรเจน ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการสมดุลมวลทางชีวภาพเท่ากับ 2.47 กก.-เมทานอล



จากสมการรวมข้างต้นแสดงกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน (Dissimilation) และแอสสิมิเลชัน (Assimilation) ซึ่งเกิดจากปริมาณของไนเตรทมีอย่างจำกัด และยังรายงานว่าปริมาณของออกซิเจนละลายส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน แต่ไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์นำไนเตรทไปใช้ในการสร้างเซลล์ อย่างไรก็ตามผลของปริมาณออกซิเจนละลายที่ส่งผลต่อจุลชีพแบบแขวนลอยในระบบเท่ากับ 0.5 มก.-ออกซิเจน/ล. ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนละลายที่ส่งผลต่อจุลชีพแบบเกาะติด (Attached growth) มีค่าเป็น 10 เท่าของปริมาณออกซิเจนละลายที่ส่งผลต่อจุลชีพแบบแขวนลอย



รูปที่ 4.15 ออกซิเจนละลายระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกันเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แลพ PBS

4.3.2 จลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน

การทดลองนี้เดินระบบโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเบดเคลื่อนที่ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 50.41 ± 1.4 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเติมเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟิเริงร้อยละ 10 โดยปริมาตร (มีความเข้มข้น 620 มก./ล.) ใช้ระยะเวลา

เดินระบบทั้งสิ้น 76 วัน แบ่งการเดินระบบออกเป็น 4 ช่วง โดยกำหนดให้ระยะเวลาที่น้ำเริ่มต้นเท่ากับ 12 ชม. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงเปลี่ยนระยะเวลาที่น้ำเท่ากับ 16, 20 และ 24 ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวเลขดังกล่าวพิจารณาจากผลประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่คงเหลืออยู่ในระบบ ตลอดจนพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะของระบบ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย ซีโอดี ดีโอซี ออกซิเจนละลาย พีเอช ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในการทดลองที่ผ่านมา ตารางที่ 4.4 แสดงสภาวะการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง ในถึงปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เพื่อกำจัดไนเตรททางชีวภาพ

ตารางที่ 4.4 สภาวะการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV

ระยะเวลาที่น้ำ (ชม.)	อุณหภูมิ (°ซ)	ไนเตรท _{เข้า} (มก./ล.)	อัตราการไหล (มล./นาที่)	NLR (ก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)	อัตราหมุนเวียนน้ำ (ล./นาที่)
12	36-39	50.95±1.60	2.08	0.07	11
16	36-39	50.09±1.38	1.56	0.06	11
20	36-39	50.92±0.86	1.25	0.04	11
24	36-39	49.65±1.28	1.04	0.037	11

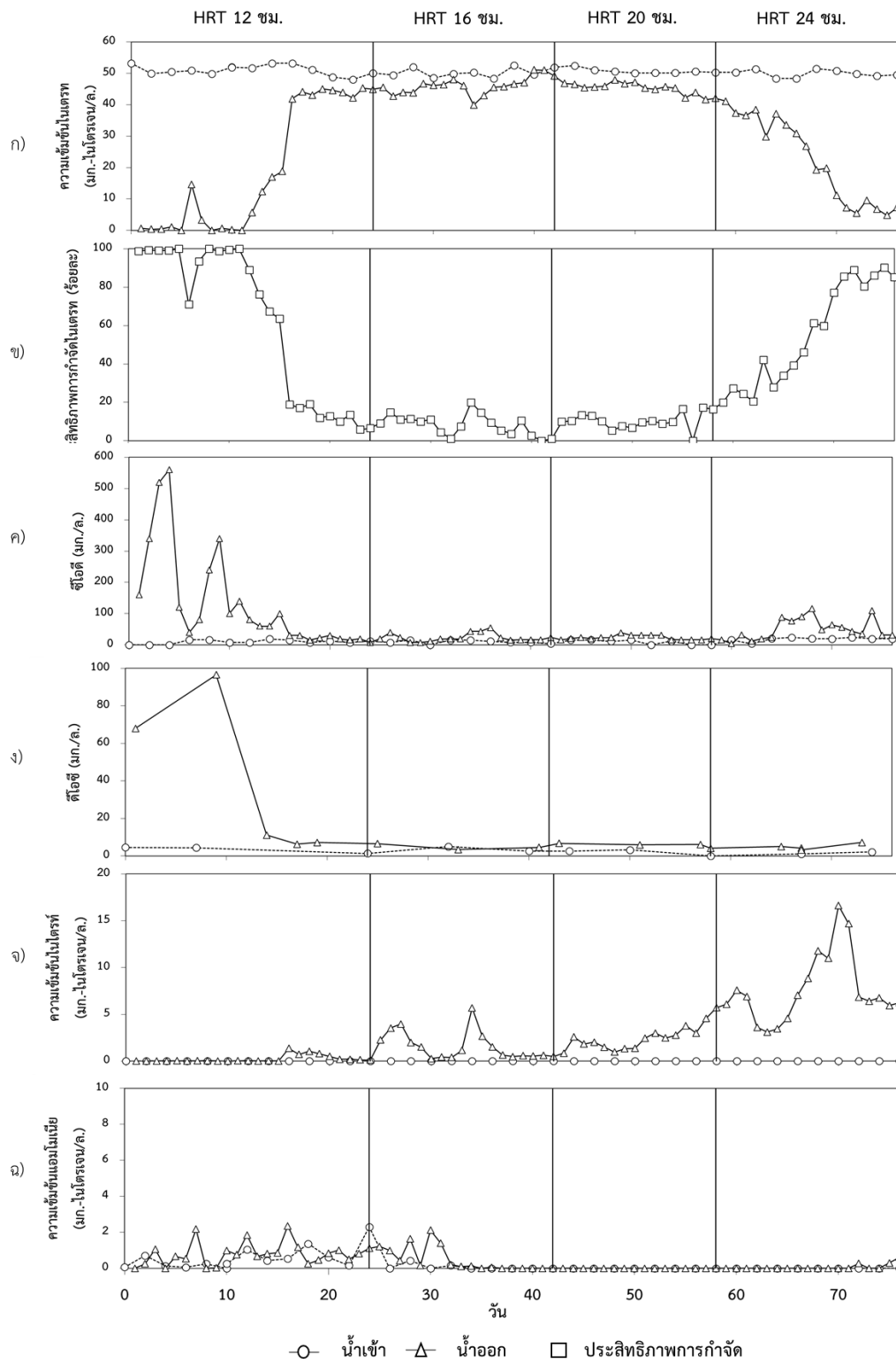
*NLR (Nitrate Loading Rate) อัตราภาระบรรทุกทุกไนเตรท

- ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สมรรถนะของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

ผลการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและตัวกลางในระบบเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่น้ำแตกต่างกันเท่ากับ 12, 16, 20 และ 24 ชม. พบว่าที่สภาวะคงตัวระบบมีความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 43.90 ± 1.24 , 45.99 ± 2.74 , 42.45 ± 0.98 และ 7.46 ± 2.24 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ผลการทดลองรูปที่ 4.16 และ ข แสดงความเข้มข้นไนเตรทและประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทที่ระยะเวลาที่น้ำต่างๆ พบว่าเวลาที่น้ำ 12 ชม. ระบบสามารถกำจัดไนเตรทได้มากกว่าร้อยละ 90 จากนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทลดลงเหลือร้อยละ 12.87 ± 4.92 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการมีสารอินทรีย์คาร์บอนหลงเหลือจากการเดินระบบแบบที่ละเททำให้ไนเตรทถูกกำจัดหายไปเกือบหมดเมื่อสารอินทรีย์ถูกใช้หมดไปประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทจึงลดลงและคงที่ จากนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงเปลี่ยนระยะเวลาที่น้ำเพิ่มขึ้นเป็น 16 และ 20 ชม. ผลการทดลองพบว่าที่สภาวะคงตัวของระยะเวลาที่น้ำทั้งสองสภาวะมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทต่ำมากโดยมีค่าเพียงร้อยละ

8.11±5.31 และ 12.33±8.37 ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนระยะเวลาที่น้ำเพิ่มเป็น 24 ชม. พบว่าระบบกำจัดไนเตรทได้ดีขึ้นความเข้มข้นไนเตรทเริ่มลดลงจนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทร้อยละ 84.83±4.58

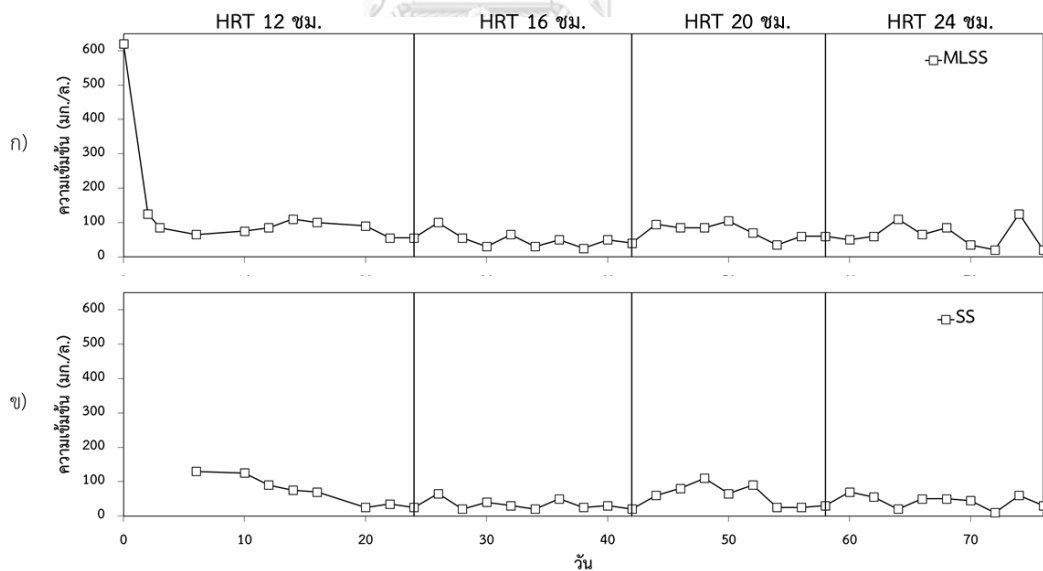
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความเข้มข้นไนเตรทและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำ (รูปที่ 4.16ค และ ง) พบว่าที่ระยะเวลาที่น้ำ 12 ชม. ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำเฉลี่ยมีค่าสูงถึง 240±177.9 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ระบบสามารถกำจัดไนเตรทได้มากกว่าร้อยละ 90 ในช่วง 11 วันแรกปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนเหล่านี้เพียงพอสำหรับเป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงเพื่อกำจัดไนเตรท ภายหลังจากวันที่ 11 ระบบเริ่มกลับเข้าสู่สภาวะคงตัว ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนคงเหลือในน้ำในรูปซีโอติมีค่าเท่ากับ 21.08±7.85 มก./ล. ส่วนที่สภาวะคงตัวสำหรับระยะเวลาที่น้ำ 16 และ 20 ชม. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนเฉลี่ยยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ 22.40±13.27 และ 17.0±2.00 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาดังกล่าวประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมีค่าต่ำ เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริไฟเคชัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพในน้ำประปาที่พบว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PLA มีอัตราการละลายน้ำน้อยมาก ต้องอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพร่วมด้วยเพื่อให้สารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเพิ่มมากขึ้นจนเพียงพอที่จะใช้ในการรีดิวซ์ไนเตรท ทั้งนี้กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพจะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของแข็งให้ละลายออกมาได้ในน้ำ จุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงสามารถนำไปใช้ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกย่อยออกมายังไม่เพียงพอต่อการกำจัดไนเตรท ดังนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่น้ำเป็น 24 ชม. ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทจึงเพิ่มขึ้นที่สภาวะคงตัวสารอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 52.98±27.98 มก./ล. และระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทที่สภาวะคงตัวร้อยละ 84.83±4.58 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทด้วยเม็ดพลาสติกชีวภาพซึ่งเป็นแหล่งสารอินทรีย์ในรูปของแข็ง โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่น้ำมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเพิ่มขึ้นและเพียงพอต่อการกำจัดไนเตรทได้ดี ทั้งนี้หากระยะเวลาที่น้ำยาวนานเกินไปกลับส่งผลเสียต่อปริมาณซีโอติละลายน้ำ ซึ่งอาจจะทำให้ค่าดังกล่าวในน้ำออกจากระบบสูงเกินค่ามาตรฐานมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ไม่เกิน 120 มก./ล.



รูปที่ 4.16 ปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนรูปต่างๆ ในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่
ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV

ผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในระบบ ดังรูปที่ 4.16จ พบว่าเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนในระบบมีค่าค่อนข้างมาก ในช่วงระยะเวลาที่น้ำ 16, 20 และ 24 ชม. โดยปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นขณะที่ไนเตรทมีปริมาณลดลง และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบมีอย่างจำกัด กล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์นี้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Oh Silverstein (1999) ที่รายงานการสะสมของไนเตรทในระบบเนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอน (กรดอะซิติก) มีอย่างจำกัด ทั้งนี้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยารีดิวซ์ไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ถ้าระบบมีไนโตรเจนสะสมอยู่ในระดับความเข้มข้นมากกว่า 0.13 มก./ล. จะส่งผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ ทำให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นช้าลงและเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งถ้ามีปริมาณไนโตรเจนสูงก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

รูปที่ 4.16จ แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในระบบ พบว่าในช่วงระยะเวลาที่น้ำ 12 ชม. และช่วงต้นของการเปลี่ยนระยะเวลาที่น้ำเป็น 16 ชม. น้ำเสียเข้าและน้ำออกจากถังปฏิกรณ์มีปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ย 0.5 และ 0.9 ± 0.6 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าไม่มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลืออยู่ในระบบ

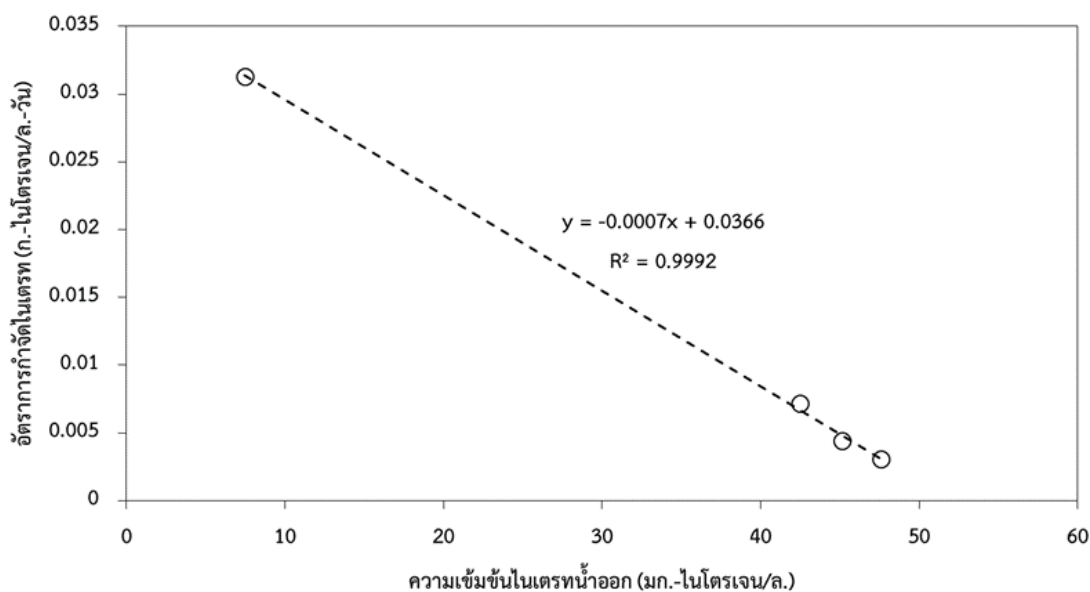


รูปที่ 4.17 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ก) ของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ (MLSS) ข) ของแข็งแขวนลอยที่หลุดมาจากน้ำทิ้ง (SS)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) ที่สื่อถึงการสูญเสียมวลเซลล์จุลินทรีย์ออกไปกับน้ำออกจากระบบ เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำวันเว้นวัน ผลการทดลองรูปที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของจุลชีพในถังปฏิกรณ์ ในวันแรกมีความเข้มข้น 620 มก./ล. เมื่อเวลาผ่านไปจุลชีพหลุดออกไปกับน้ำออก ส่งผลให้ระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 133.18 , 50.0 ± 21.85 , 70.5 ± 24.0 และ 63 ± 35.3 มก./ล. และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดไปกับน้ำออกเท่ากับ 71.87 ± 41.9 , 32.5 ± 14.9 , 56.1 ± 32.8 และ 42.0 ± 18.8 มก./ล. ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 16, 20 และ 24 ชม.ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดมากับน้ำออกมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำออกอุตสาหกรรมที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ (ไม่เกิน 50 มก./ล.) ในขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบเบดเคลื่อนที่โดยมีค่าอยู่ในช่วง 100-250 มก./ล. (Metcalf และ Eddy, 2014)

- จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV

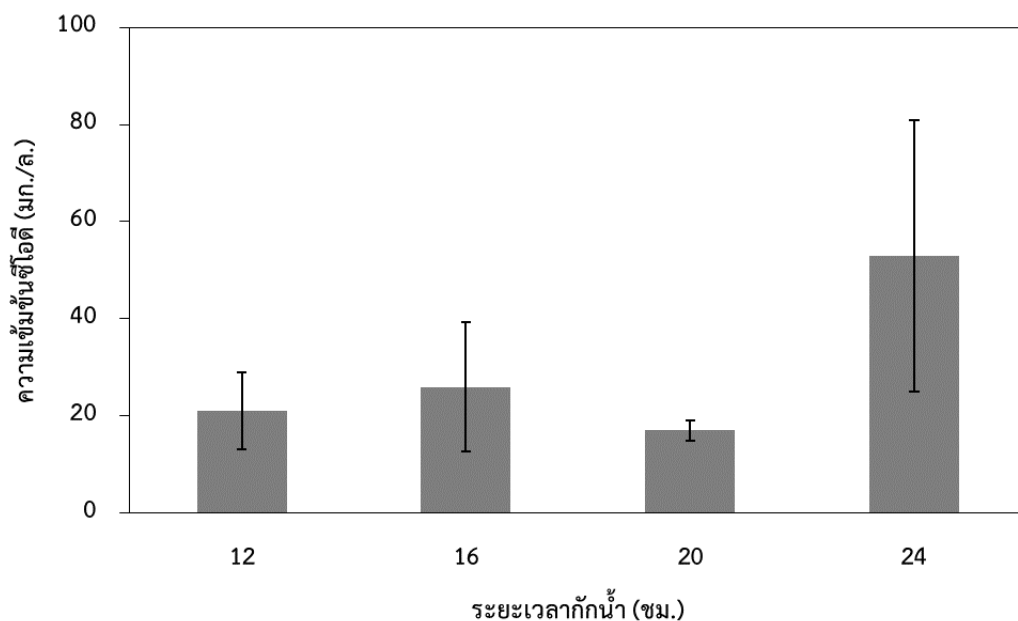
นำค่าอัตราการกำจัดไนเตรทที่ได้จากการแปรค่าระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกันเท่ากับ 12, 16, 20 และ 24 ชม. มาหาค่าจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นตัวกลางและแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนเตรทในน้ำออกจากระบบและอัตราการกำจัดไนเตรท พบว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 และ $K_1 = 0.0007$ (วัน⁻¹) จากการศึกษาอัตราการกำจัดไนเตรทที่ระยะเวลาพักน้ำต่างๆ พบว่ามีอัตราการกำจัดไนเตรทเท่ากับ 0.031 ก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน ที่เวลาพักน้ำ 24 ชม. และเท่ากับ 0.004, 0.003 และ 0.007 ก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน ที่เวลาพักน้ำ 12, 16 และ 20 ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่ได้จากการทดลองเกิดจากสารอินทรีย์คาร์บอนภายนอกมีอยู่อย่างจำกัดจึงส่งผลต่ออัตราการกำจัดไนเตรททำให้อัตราการกำจัดไนเตรทช้าลง



รูปที่ 4.18 จลนพลศาสตร์ในการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

- ความเข้มข้นซีโอดีต่อระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังปฏิกรณ์ PHBV

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาการกำจัดไนเตรทโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงที่มีความต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับไนเตรทในปฏิกิริยาชีวภาพ การทดลองนี้ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยจัดเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนรูปของแข็งที่จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงใช้ในการเจริญเติบโตได้ รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นซีโอดีและระยะเวลาที่เก็บน้ำต่างๆที่สภาวะคงตัว ผลการทดลองพบว่าซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 12, 16, 20 และ 24 ชม. มีปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 21.08 ± 7.85 , 25.95 ± 13.27 , 17.00 ± 2.00 และ 52.98 ± 27.99 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บน้ำมากขึ้นความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV มีสมบัติไม่ชอบน้ำละลายน้ำได้น้อย การยืดเวลาเก็บน้ำในถังปฏิกรณ์จึงช่วยให้จุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพได้ดีขึ้น และสารอินทรีย์ในน้ำมีปริมาณเพียงพอต่อการกำจัดไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ อาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาเก็บน้ำที่เหมาะสมเป็นปัจจัยหลักสำคัญต่อการกำจัดไนเตรทด้วยเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นซีไอดีเฉลี่ยที่ระยะเวลาพักน้ำต่างๆ เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ที่เดินระบบต่อเนื่อง

4.3.3 อัตราการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นตัวกลางและสารอินทรีย์คาร์บอน

การทดลองนี้เดินระบบโดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเบดเคลื่อนที่ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 50.10 ± 1.50 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงร้อยละ 10 โดยปริมาตร (มีความเข้มข้น 370 มก./ล.) ใช้ระยะเวลาเดินระบบทั้งสิ้น 74 วัน แบ่งการเดินระบบออกเป็น 4 ช่วง โดยกำหนดให้ระยะเวลาพักน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 12 ชม. เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงเปลี่ยนระยะเวลาพักน้ำลดลงเป็น 8, 4 และ 2 ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้พิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนคงเหลือในระบบ จากการเดินระบบแบบที่ละเทตลอดจนการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะของระบบ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย ซีไอดี ดีไอซี ออกซิเจนละลาย ฟิเอส ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่าง ทั้งนี้สภาวะการเดินระบบเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS ที่ระยะเวลาพักน้ำแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS

ระยะเวลาพักน้ำ (ชม.)	อุณหภูมิ (°ซ)	ไนเตรท _{เข้า} (มก./ล.)	อัตราการไหล (มล./นาท)	NLR (ก.-ไนโตรเจน/ล.-วัน)	อัตราหมุนเวียนน้ำ (ล./นาท)
12	36-39	50.44±1.67	2.08	0.08	11
8	36-39	50.91±1.54	3.12	0.11	11
4	36-39	50.34±0.72	6.25	0.23	11
2	36-39	48.51±1.88	12.5	0.44	11

*NLR (Nitrate Loading Rate) อัตราภาระบรรจุทุกไนเตรท

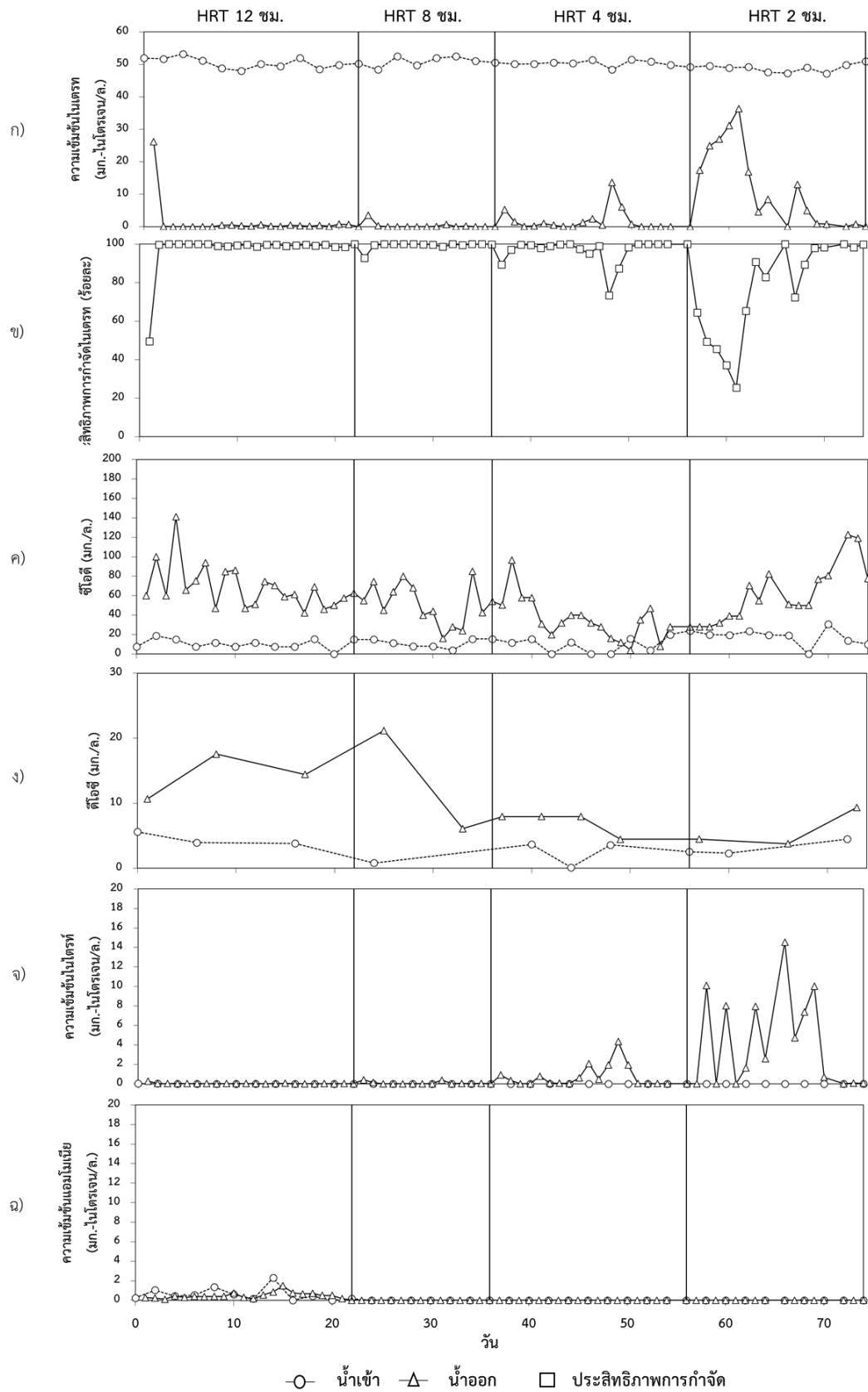
- ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสมรรถนะของถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่แบบเดินระบบต่อเนื่องที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

ผลการทดลองกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลาง ที่ระยะเวลาพักน้ำต่าง ๆ เท่ากับ 12, 8 และ 2 ชม. แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว น้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบมีความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือโดยเฉลี่ย 0.27 ± 0.25 , 0.33 และ 0.54 ± 0.47 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาพักน้ำ 4 ชม. ตรวจไม่พบไนเตรทหลงเหลืออยู่ในน้ำ และจะเห็นได้ว่าในช่วงที่แปรเปลี่ยนระยะเวลาพักน้ำที่ระยะเวลาพักน้ำที่ 12 และ 8 ชม. จุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวสั้นมากเพียง 1 วัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทที่สภาวะคงตัวสูงถึงร้อยละ 99.47 ± 0.52 และ 99.34 ± 1.83 ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลาพักน้ำ 4 และ 2 ชม. จุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานกว่า 2 ช่วงที่ผ่านมา แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทที่สภาวะคงตัวโดยเฉลี่ยร้อยละ 100 และ 98.91 ± 0.95 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปซีไอดีและดีไอซีจากถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS (รูปที่ 4.20ค – 4.20ง) พบว่าตลอดการเดินระบบน้ำออกมีปริมาณซีไอดีโดยเฉลี่ย 54.81 ± 26.86 มก./ล. และดีไอซีอยู่ในช่วง 10-20 มก.ดีไอซี/ล. เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการกำจัดไนเตรทที่สภาวะคงตัว พบว่าที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 8 และ 4 ชม. มีปริมาณซีไอดีน้ำออกเฉลี่ย 68.40 ± 22.65 , 52.20 ± 20.55 และ 35.93 ± 21.34 มก./ล. ตามลำดับ และระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 ในทั้งสามช่วงการทดลอง แสดงว่า ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเพียงพอสำหรับการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แต่เมื่อลดระยะเวลาพักน้ำเป็น 2 ชม. พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบมีปริมาณซีไอดีคงเหลือเฉลี่ย 39.49 ± 16.03 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทได้เพียงร้อยละ 47.90 ± 15.53 ความเข้มข้นไนเตรทยังคงเหลือใน

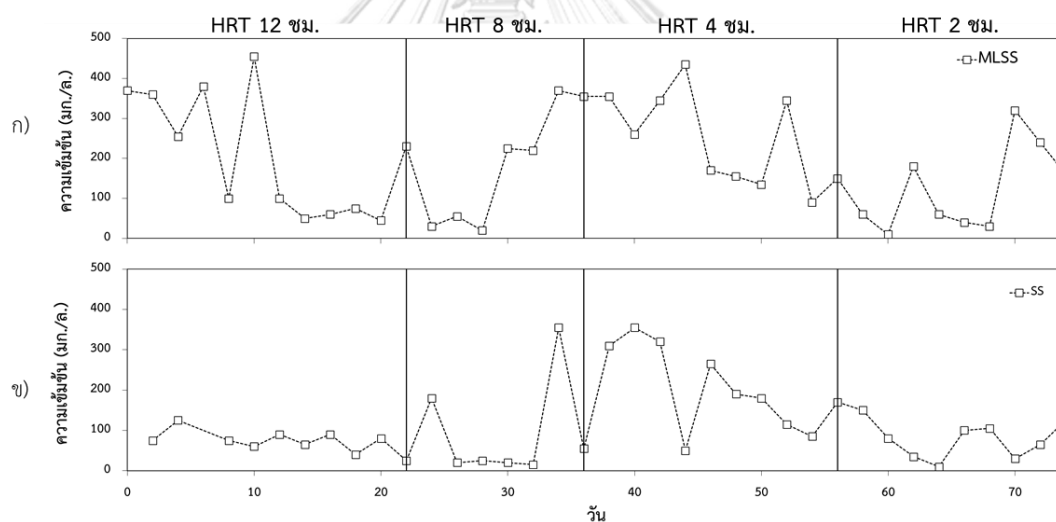
ระบบมาก มีปริมาณเฉลี่ย 25.65 ± 7.64 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้การเปลี่ยนระยะเวลาที่กักน้ำให้สั้นลงโดยมีอัตราการไหลเข้าและออกของน้ำเสียผ่านถังปฏิกรณ์เร็วขึ้นส่งผลให้สารอินทรีย์คาร์บอนถูกย่อยสลายออกมาไม่ทันจนไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ของจุลินทรีย์เพื่อรีดิวซ์ไนเตรท จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 98.91 ± 0.95 น้ำออกมีปริมาณซีโอติโดยเฉลี่ย 95.40 ± 23.39 มก./ล. และความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 0.54 ± 0.47 มก.-ไนโตรเจน/ล. จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณซีโอติในระบบมีเพียงพอสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยมีปริมาณมากกว่าเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีความสามารถในการละลายน้ำ ประกอบกับกิจกรรมที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้ปริมาณซีโอติละลายน้ำเพียงพอต่อการกำจัดไนเตรทในแต่ละช่วงระยะเวลาที่กักน้ำ

ผลการศึกษาปริมาณไนโตรทในระบบ (รูปที่ 4.20จ) พบว่าที่ระยะเวลาที่กักน้ำ 12 และ 8 ชม. ตรวจไม่พบปริมาณไนโตรทในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ที่เวลาดังกล่าว ระบบมีความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือเฉลี่ย 0.27 ± 0.25 0.33 ± 0.21 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ระยะเวลาที่กักน้ำที่ 4 ชม. ตรวจพบไนโตรทในระบบเล็กน้อยเช่นเดียวกับ ในช่วงเริ่มต้นของระยะเวลาที่กักน้ำ 2 ชม. พบว่ามีความเข้มข้นไนโตรทโดยเฉลี่ย 5.57 ± 4.80 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยเมื่อพิจารณาพร้อมกับการกำจัดไนเตรทพบว่าช่วงระยะเวลาที่กักน้ำที่ 4 และ 2 ชม. มีปริมาณไนเตรทคงเหลือในระบบ โดยเฉพาะระยะเวลาที่กักน้ำที่ 2 ชม. ไนเตรทคงเหลือในระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.65 ± 7.64 มก.-ไนโตรเจน/ล. อาจกล่าวได้ว่าที่ระยะเวลาที่กักน้ำ 2 ชม. ไนโตรทส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันช้าลง



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนและสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย ซึ่งสื่อถึงปริมาณจุลินทรีย์ ในระบบและที่สูญเสีย ออกไปกับน้ำออก โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างวันเว้นวัน จะสังเกตได้ว่าปริมาณความเข้มข้นจุลินทรีย์ ในระบบแสดงดังรูปที่ 4.21ก และ ข ในวันแรกระบบมีความเข้มข้นจุลินทรีย์ 370 มก./ล. เมื่อเวลา ผ่านไปตรวจพบการหลุดออกไปกับน้ำออก ส่งผลให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ที่แต่ละช่วงระยะเวลาพักเก็บน้ำ 12, 8, 4 และ 2 ชม. โดยมีค่าเท่ากับ 204.55 ± 160.15 , 149.38 ± 129.10 , 255.45 ± 119.05 และ 125.00 ± 102.23 มก./ล. ส่วนน้ำออก ตรวจพบปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูญเสียออกไปเฉลี่ย 72.50 ± 27.81 , 26.67 ± 14.38 , 190.45 ± 109.14 และ 87.00 ± 52.93 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดมากับน้ำ ออกเหล่านี้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ (ไม่เกิน 50 มก./ล.) ทั้งนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในแต่ละช่วงเวลากักน้ำมีความแปรปรวนเนื่องจากจุลินทรีย์เกาะตาม ขอบถังปฏิกรณ์ค่อนข้างมาก และเกาะตัวกันเป็นก้อนรวมกับเม็ดพลาสติกชีวภาพ ส่งผลทำให้ผลการ ทดลองที่ตรวจวิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างแปรปรวน

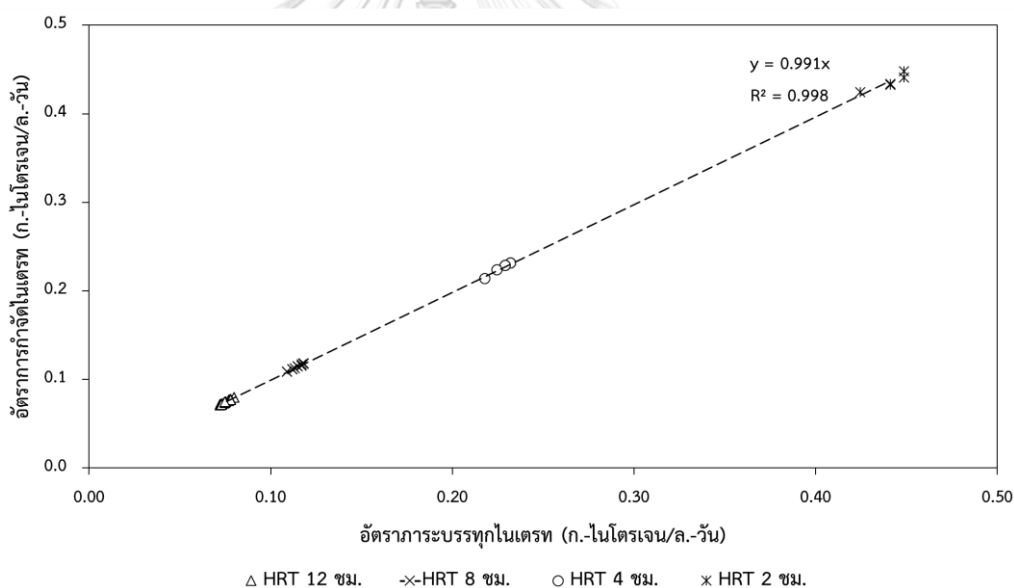


รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS ก) ของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ (MLSS) ข) ของแข็งแขวนลอยที่หลุดมากับน้ำทิ้ง (SS)

- ผลของอัตราภาระบรรทุกในเตรทต่ออัตราการกำจัดในเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็น แหล่งอินทรีย์คาร์บอน

การทดลองนี้ทำการเดินระบบโดยน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นไนเตรทเข้าถังปฏิกรณ์คงที่ (50 มก./ล.) มีระยะเวลาพักน้ำที่แตกต่างกันได้แก่ 12, 8, 4 และ 2 ชม. พบว่าทั้ง 4 ช่วงการทดลองมี

ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่เท่ากับ 99.47 ± 0.52 , 99.34 ± 1.83 , 100 และ 98.91 ± 0.95 ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อลดระยะเวลาพักน้ำของถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ลงประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทยังคงมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 แสดงถึงความสามารถของจุลินทรีย์ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในการรีดิวซ์ไนเตรท ส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจากการศึกษาของ Wu และคณะ (2013) ที่ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งที่ระยะเวลาพักน้ำ 0.5 ชม. โดยมีความเข้มข้นไนเตรทเข้าระบบเท่ากับ 15 มก.-ไนโตรเจน/ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทร้อยละ 94.87 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาพักน้ำที่ลดลงถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีสมรรถนะในการกำจัดไนเตรทสูง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการระบรทุกไนเตรทต่ออัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งคาร์บอนในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง

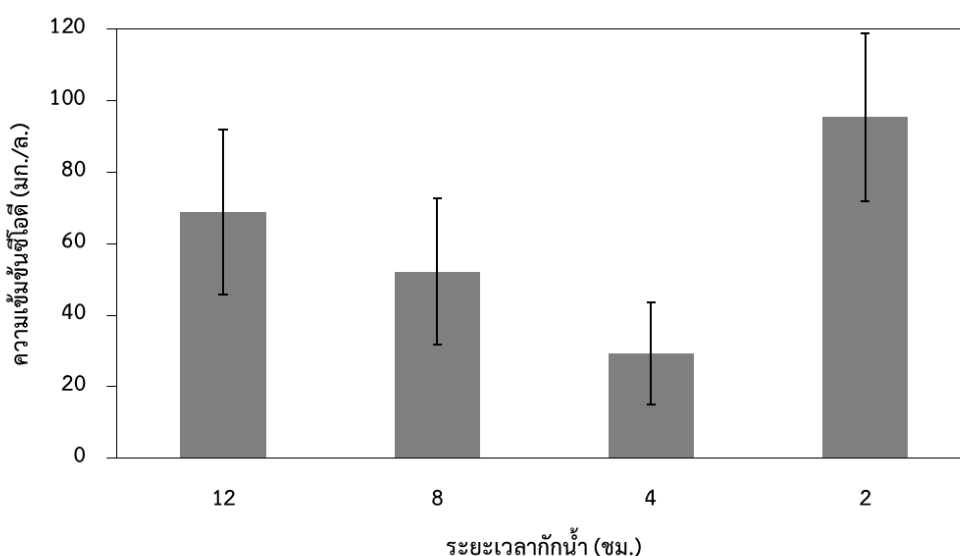


รูปที่ 4.22 อัตราการระบรทุกไนเตรทในแต่ละระยะเวลาพักน้ำเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS

- ความเข้มข้นซีโอดีต่อระยะเวลาพักเก็บน้ำในถังปฏิกรณ์ PBS

จากการศึกษาอัตราการกำจัดไนเตรทเมื่อบรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและตัวกลางในระบบเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง ปริมาณซีโอดีคงเหลือที่สภาวะคงตัวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 68.40 ± 22.65 , 52.20 ± 20.55 , 35.93 ± 21.34 และ 95.40 ± 23.39 มก./ล. ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12, 8, 4 และ 2 ชม. ตามลำดับ ผลการทดลองจากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างระยะเวลาที่น้ำและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปซีโอดี พบว่าเมื่อลดระยะเวลาที่น้ำจาก 12 เป็น 8 และ 4 ชม. ตามลำดับ ปริมาณซีโอดีคงเหลือมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำที่สั้นเกินไปส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยเม็ดพลาสติกชีวภาพเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้สารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำยังเป็นผลจากการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพอีกด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่สภาวะคงตัวของระยะเวลาที่น้ำ 2 ชม. ตรวจพบปริมาณซีโอดีคงเหลือในน้ำสูง เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนที่ทำหน้าที่ในการให้อิเล็กตรอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีค่ามาเกินพอ จึงทำให้ระบบมีปริมาณซีโอดีหลงเหลือในน้ำมาก อาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องอยู่ในควรรช่วง 4-12 ชม. เพื่อควบคุมไม่ให้ปริมาณซีโอดีของน้ำที่งอยู่ในค่ามาตรฐานตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (< 120 มก./ล.)

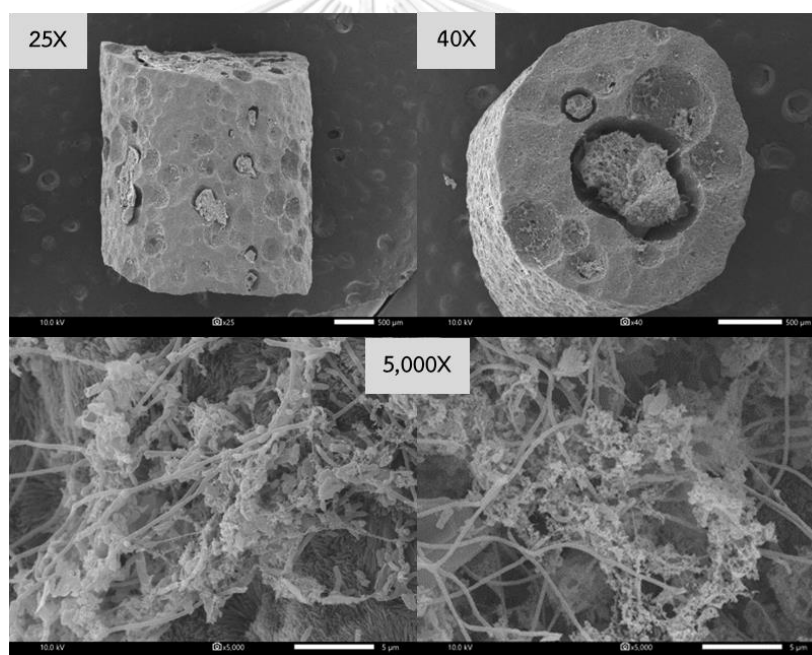


รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นซีโอดีในแต่ละระยะเวลาที่น้ำ เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS

4.3.4 การศึกษาเม็ดพลาสติกชีวภาพจากถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ทำการศึกษาลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของเม็ดพลาสติกชีวภาพภายหลังการเดินระบบแบบต่อเนื่อง รวมถึงตรวจสอบการเกาะติดของจุลินทรีย์บนพื้นผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ PHBV และ PBS ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 25, 40 และ 5,000 เท่า จากผลการศึกษาดูพบการสร้างฟิล์มชีวภาพและกลุ่มจุลินทรีย์บนผิวของเม็ดพลาสติก

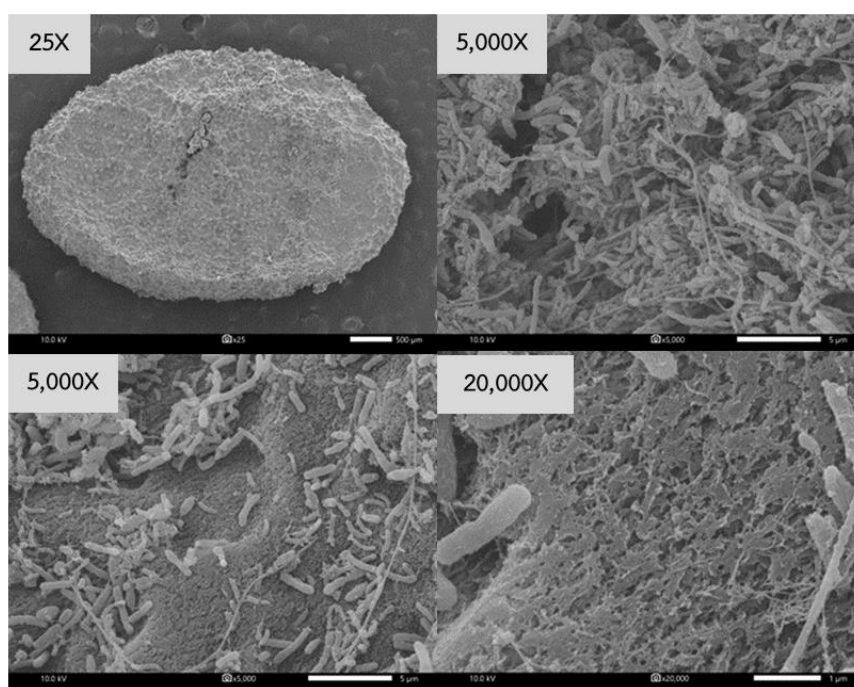
ชีวภาพทั้งสองชนิดโดยเป็นการอาศัยอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายชนิด ทั้งที่มีลักษณะเป็นทั้งเส้นใย (Filaments) เซลล์รูปแท่ง (Bacilli) รูปข้อปล้อง (Shot rods) และรูปทรงกลม (Cocci) รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่ายของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV ภายหลังจากการเดินระบบ พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดนี้ก่อนการทดลองมีลักษณะเรียบและไม่มีรูพรุน แต่ภายหลังจากการเดินระบบพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม มีลักษณะขรุขระ พบการเกาะติดของชั้นฟิล์มชีวภาพค่อนข้างบางซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงเฉือน (Shear force) ของการเวียนน้ำภายในระบบ และพบจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวกลาง โดยเฉพาะกลุ่มเส้นใย และเซลล์รูปแท่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Khan และคณะ, 2007) ที่รายงานพบจุลินทรีย์ชนิด *Acidovorax*, *Brachymonas*, *Comamonas*, *Diaphorobacter*, *Thiothrix* และ *Simplicispira* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ได้



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่างๆ จากถังปฏิกรณ์เบดเคลื่อนที่ เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV ภายหลังจากการเดินระบบ

สำหรับเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เมื่อนำมาศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.25 พบว่ามีการยึดเกาะของจุลินทรีย์และฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวดังกล่าวอย่างหนาแน่น โดยจุลินทรีย์หลักที่พบมีรูปร่างเป็นแท่งสั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wu และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการ

ดีไนตริฟิเคชันในระบบเบตนิ่ง (packed-bed) โดยศึกษาลักษณะของกลุ่มจุลินทรีย์โดยการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดพบว่า จุลินทรีย์ที่พบบนผิวเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS มีรูปร่างเป็นรูปแท่ง รูปทรงกลม และเป็นเส้นใย ได้แก่ *Diaphorobacter*, *Dechloromonas*, *Thauera*, *Alicyclophilus* และ *Simplicispira* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟิเคชันที่สามารถย่อยสลายพลาสติกชีวภาพชนิด PBS ได้

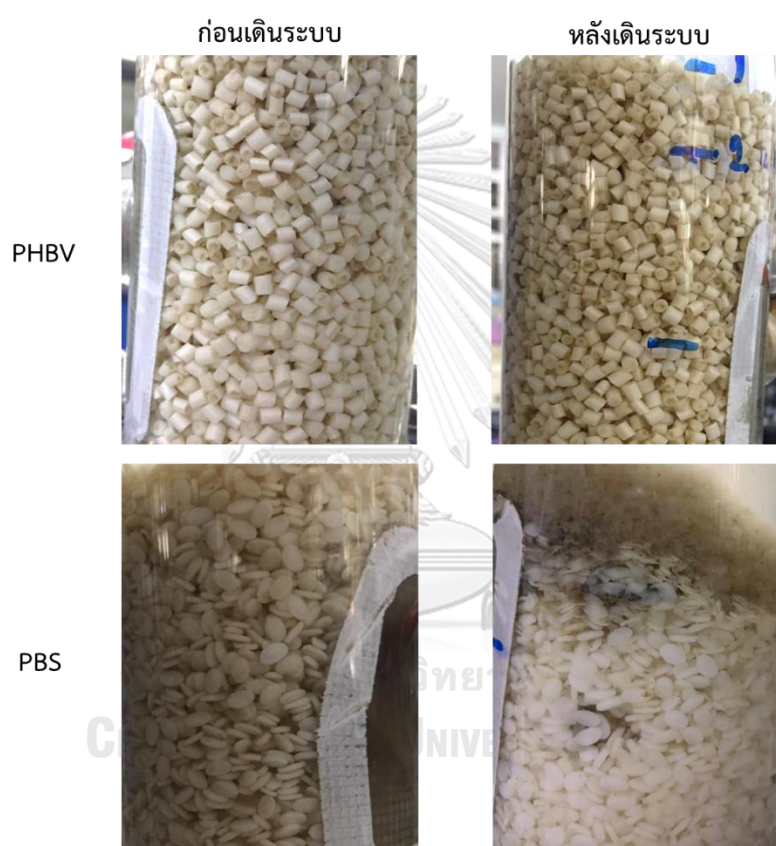


รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่างๆ แสดงเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS จากถังปฏิกรณ์เบตเคลื่อนที่ภายหลังการเดินระบบ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV และ PBS จะเห็นได้ชัดว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีลักษณะการยึดเกาะของจุลินทรีย์บนพื้นผิวหนาแน่นมากกว่า PHBV อาจเกิดจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายและย่อยสลายออกมามีปริมาณมากกว่า จึงส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนเตรทเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งคาดว่า การยึดเกาะของจุลินทรีย์และฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพที่เพิ่มขึ้นจะช่วยรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ และยังสามารถต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของระบบอีกด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ดังรูปที่ 4.26 เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกชะละลายออกมามากขึ้นโดยกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์บนผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพ และอาจเกิด

จากการขัดกันของเม็ดพลาสติกชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ โดยเฉพาะเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะค่อนข้างบางและเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV เนื่องจาก PBS มีความชอบน้ำ ทำให้มีการปล่อยสารอินทรีย์ออกมาได้มากกว่า PHBV เมื่อแช่อยู่ในน้ำ และเมื่อพิจารณาร่วมกับผลการทดลองการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ผ่านมาพบว่า เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS ปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกปล่อยออกมาในระบบเพียงพอต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยมาภายในถังปฏิกรณ์จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกชีวภาพ



รูปที่ 4.26 ลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกชีวภาพก่อนและหลังเดินระบบแบบต่อเนื่อง

อาจกล่าวได้ว่าเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิด ได้แก่ PHBV และ PBS สามารถใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ดี โดยจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงสามารถใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางที่เหมาะสมในการยึดเกาะและย่อยสลายเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อรีดิวซ์ไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์

4.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเดินระบบเบดเคลื่อนที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแบบทีละเท และแบบต่อเนื่อง

จากการศึกษาการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและตัวกลางในระบบเบดเคลื่อนที่ เมื่อทำการเดินระบบแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง ผลจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดไนเตรทของทั้งสองระบบมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ขณะทำการเดินระบบที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของทั้งสองระบบแตกต่างกัน โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเดินระบบทั้ง 2 สภาวะแสดงดังตารางที่ 4.6 ได้แก่ อุณหภูมิ การกวนผสม ของแข็งแขวนลอยในระบบ สารอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการเดินระบบแบบต่อเนื่องไม่พบการสะสมของสารอินทรีย์เนื่องจากการกวนผสมที่ดีกว่าจึงทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียได้ดีกว่าแบบทีละเท นอกจากนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบแบบต่อเนื่องมีปริมาณน้อยกว่าแต่ก็มีประสิทธิภาพการกำจัดได้ใกล้เคียงกันจากการทดลองที่ผ่านมา และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วและเข้มข้นกับอุณหภูมิขณะเดินระบบอีกด้วย จากการศึกษาของ Xu และคณะ (2019) ใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV/PLA เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน โดยเดินระบบที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้แก่ 30, 20, 15 และ 10 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C มีประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ และไม่มีการสะสมของสารอินทรีย์ในระบบ นอกจากนี้อุณหภูมียังส่งผลต่อการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพ จะเห็นได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ที่มีน้ำเสียเมื่อเทียบกับการทดสอบการละลายในน้ำปราศจากไอออนและประปา ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่ามากกว่าเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากความร้อนจากเครื่องสูบน้ำและกิจกรรมของจุลินทรีย์ ในขณะที่การทดสอบการละลายทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและไม่มีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในการทดลองการละลายจึงมีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 4.6 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเดินระบบเบดเคลื่อนที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพแบบทีละเท และแบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	แบบทีละเท	แบบต่อเนื่อง
1. อุณหภูมิ (°C)	31-32	36-39
2. การกวนผสม (mixing)	200 รอบ/นาที	11 ล./นาที
3. ของแข็งแขวนลอยในระบบ (MLSS) (มก./ล.)	> 1000	80 - 300
4. สารอินทรีย์คาร์บอน	พบการสะสม	ไม่พบการสะสม
5. ปริมาณเม็ดพลาสติกชีวภาพ	15%	20%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PLA PHBV และ PBS เป็นตัวกลางและแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์เคลื่อนที่ โดยเดินระบบระดับปฏิบัติการเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ การละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท ตลอดจนจลนพลศาสตร์และอัตราการกำจัดไนเตรท ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติทางกายภาพ การละลายน้ำ และการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

จากการทดสอบความชอบน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด พบว่า เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีสมบัติความชอบน้ำ ในขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA และ PHBV มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำในน้ำปราศจากไอออน และน้ำประปาแตกต่างกัน เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีอัตราการละลายน้ำ เท่ากับ 0.02 และ 0.1 มก.ดีไอซี/ก.เม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น เมื่อทดลองในน้ำปราศจากไอออนและน้ำประปา ตามลำดับ ในขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA และ PHBV มีอัตราการละลายน้ำน้อยมาก นอกจากนี้ผลการทดสอบการดูดซับไนเตรทของเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA, PHBV และ PBS พบว่า ที่ค่าพีเอชมากกว่า 4 เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดจะไม่ดูดซับไนเตรท เนื่องจากเป็นค่าพีเอชที่มากกว่า จึงทำให้ประจุที่พื้นผิวของเม็ดพลาสติกชีวภาพทุกชนิดเป็นลบ ดังนั้นในทุกการทดลองจะทำการควบคุมค่าพีเอชของการเดินระบบเป็นกลางอยู่ในช่วง (6.8-8.5) ซึ่งเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยค่าพีเอชในช่วงดังกล่าวยังส่งผลให้เม็ดพลาสติกชีวภาพไม่เกิดการดูดซับไนเตรทที่พื้นผิว จึงมั่นใจว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น เพื่อกำจัดไนเตรทเป็นกระบวนการทางชีวภาพเพียงอย่างเดียว

5.1.2 ประสิทธิภาพ จลนพลศาสตร์ และอัตราการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แเน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ เพื่อเดินระบบการทดลองแบบทีละเท

ในการทดลองเดินระบบเพื่อกำจัดไนเตรททางชีวภาพแบบทีละเท พบว่า เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS มีอัตราการกำจัดไนเตรทได้สูงกว่า PLA เม็ดพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวมีอัตราการกำจัดไนเตรทอยู่ในช่วง 48-52 มก.-ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลาพักน้ำ

1 วัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 ขณะที่เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเพียงร้อยละ 48 และมีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 23.96 ± 3.77 มก.-ไนโตรเจน/ล. ดังนั้นจึงเลือกใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทได้มากกว่าร้อยละ 90 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการกำจัดไนเตรททางชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order reaction) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9463 และ 0.9841 และมีค่าความชันหรือค่าคงตัวของปฏิกิริยา (K_0) เท่ากับ -3.6423 และ -3.1561 เมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV และ PBS เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยพบว่าความเข้มข้นไนเตรทคงเหลือในระบบเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะเวลา 12 และ 15 ชม. ตามลำดับ

5.1.3 ประสิทธิภาพ จลนพลศาสตร์ และอัตราการกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์แอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่เพื่อเดินระบบแบบต่อเนื่อง

- เพื่อทำการเดินระบบโดยบรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PHBV เป็นตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่เพื่อกำจัดไนเตรท โดยเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่ กำหนดระยะเวลาพักน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 12 ชม. พบว่า ที่สภาวะคงตัวถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทร้อยละ 12 มีความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ย 43 มก.-ไนโตรเจน/ล. และความเข้มข้นซีโอดีคงเหลือเฉลี่ย 21 มก./ล. ซึ่งไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นจึงเพิ่มระยะเวลาพักน้ำมากขึ้นเป็น 16, 20 และ 24 ชม. เพื่อให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียมากขึ้นและมีเวลาในการย่อยสลายเม็ดพลาสติกชีวภาพและปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมาในน้ำ ทั้งนี้ที่ระยะเวลาพักน้ำ 24 ชม. ถังปฏิกรณ์กำจัดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 84 และมีความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 52.98 มก./ล. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการกำจัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดเบดเคลื่อนที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV พบว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากระบบมีสารอินทรีย์คาร์บอนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดช้าลง

- ผลการทดลองเมื่อใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เป็นตัวกลางและเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกำจัดไนเตรทในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแอน็อกซิกชนิดเบดเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง โดยมีระยะเวลาพักน้ำเริ่มต้น 12 ชม. พบว่า ระยะเวลาพักน้ำดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 การทดลองนี้จึงลดระยะเวลาพักน้ำลงเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการกำจัดไนเตรท ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาพักน้ำทั้ง 4 ช่วง ที่สภาวะคงตัวมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS มีสมบัติละลายน้ำ และถูกย่อย

สลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ได้ดี จึงทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเพียงพอต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเดินระบบปฏิกรณ์ชีวภาพเบดเคลื่อนที่ (MBBR) โดยใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพเป็นตัวกลางในระบบ ต้องใช้ปั๊มที่มีกำลังมากและอัตราการไหลสูง เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ถ้าแรงส่งจากปั๊มไม่เพียงพอจะส่งผลให้ตัวกลางไม่เกิดการเคลื่อนที่ในระบบ ซึ่งข้อเสียของการใช้ปั๊มที่มีอัตราการไหลสูงจะส่งผลให้น้ำในถังปฏิกรณ์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ขณะเดินระบบ

2. ศึกษาข้อมูลประชากรจุลินทรีย์ในระบบเพิ่มเติม จะทำให้เห็นภาพรวมของระบบมากขึ้น รวมทั้งใช้ข้อมูลกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในการควบคุมสถานะในการเดินระบบและส่งเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

3. ในการเดินระบบแบบที่ละเท ควรเพิ่มชุดควบคุมโดยไม่มีการบรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพลงในถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการยืนยันว่าจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากตัวเองด้วยหรือไม่

ภาคผนวก ก
รายการการคำนวณ

ก-1 วิธีการคำนวณหาค่าออกแบบ

เม็ดพลาสติกชีวภาพ	ครั้งที่	ระยะทาง, s (m.)	เวลา, t (s)	$V_{\text{ตกตะกอน}}$ (m/s)	พื้นที่หน้าตัด, A (cm ²)	$Q_{\text{รีเจนน้ำที่ต้องการ}}$ (l/min)
PHBV	1	0.3	3.21	0.09	22.9	12.36
	2	0.3	3.50	0.085	22.9	11.67
	3	0.3	3.16	0.094	22.9	12.91
PBS	1	0.3	3.89	0.077	22.9	10.57
	2	0.3	4.19	0.071	22.9	9.75
	3	0.3	3.75	0.08	22.9	10.99

ก-2 การคำนวณสารอาหารที่ใช้ในการทดลอง

-การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าอัตราส่วน COD : NO₃⁻ เท่ากับ 5 ปริมาตร 7 ลิตร

1. ปริมาณโซเดียมไนเตรท (NaNO₃) ที่ทำให้น้ำเสียมีความเข้มข้นไนเตรทเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล.

$$50 \frac{\text{มก.}-\text{ไนโตรเจน}}{\text{ล.}} \times 1 \text{ ล.} = 0.05 \text{ ก.}-\text{ไนโตรเจน}$$

ต้องใช้โซเดียมไนเตรท (NaNO₃)

$$0.05 \text{ ก.}-\text{ไนโตรเจน} \times \frac{85}{14} = 0.05 \text{ ก. NaNO}_3$$

ตาราง ก-2 ปริมาณโซเดียมไนเตรทในแต่ละการทดลอง

การทดลอง	ปริมาตรน้ำเสียที่เตรียม (ล.)	ปริมาณโซเดียมไนเตรท (ก.)
-ล้างเลี้ยงเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์	7	2.12
-ล้างปฏิกรณ์แบบที่ละเท	1	0.05
-ล้างปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	40	12.14

2. ปริมาณกลูโคสที่ทำให้น้ำเสียมีความเข้มข้น 250 มก./ล.

$$250 \frac{\text{มก. - ซีไอดี}}{\text{ล.}} \times 1 \text{ ล.} = 0.25 \text{ ก. - ซีไอดี}$$

ต้องใช้กลูโคสปริมาณ

$$0.25 \text{ ก. - ซีไอดี} \times \frac{1}{1.06} = 0.23 \text{ ก. กลูโคส}$$

3. การคำนวณอาหารเสริม

- การเติม NaHCO_3 ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 1 ลิตร

ปริมาณ NaHCO_3 ที่ใช้คือ 0.75 ก. ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

- การเตรียมสารอาหารหลัก (เตรียมทุกครั้งที่ต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์)

$$\text{K}_2\text{HPO}_4 \quad 400 \text{ (มก./ล.)} / 1,000 \text{ (มก./ก.)} = 0.4 \text{ ก.}$$

$$\text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \quad 400 \text{ (มก./ล.)} / 1,000 \text{ (มก./ก.)} = 0.4 \text{ ก.}$$

- การเตรียมสารอาหารหลัก ทำ stock ไว้ 50 เท่า ในปริมาตรน้ำ 1 ลิตร

$$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \quad (50 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (50 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 2.5 \text{ ก.}$$

$$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad (10 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (50 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 0.5 \text{ ก.}$$

$$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \quad (40 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (50 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 2 \text{ ก.}$$

- การเตรียมสารอาหารรอง ทำ stock ไว้ 10,000 เท่า ในปริมาตรน้ำ 1 ลิตร (สารละลาย A)

ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

$$\text{H}_3\text{BO}_3 \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

$$\text{ZnCl}_2 \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

$$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

$$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

$$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \quad (0.5 \text{ มก./ล.}) \times (1 \text{ ล.}) \times (10,000 \text{ เท่า}) / (1,000 \text{ มก./ล.}) = 5 \text{ ก.}$$

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ข. การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวิธีซาลิไซเลต

สารเคมี

1. เตรียมสารละลายซาลิไซเลต-อะซิโตน โดยใช้โซเดียมซาลิไซเลต 440 กรัม และโซเดียมไนโตรปริสไซด์ 0.28 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI เป็น 1 ลิตร เก็บรักษาโดยใส่ตู้เย็นและไม่ให้โดนแสง

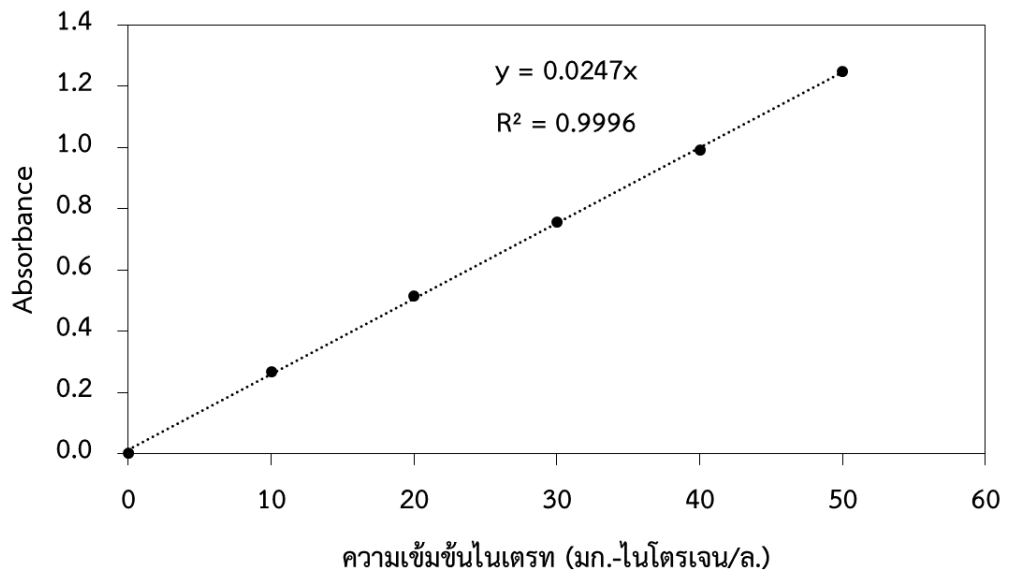
2. เตรียมสารอัลคาไลน์ซีเตรท โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 18.5 กรัม และโซเดียมซีเตรท 100 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI เป็น 1 ลิตร เก็บรักษาโดยใส่ตู้เย็นและไม่ให้โดนแสง

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายซาลิไซเลต 0.6 มิลลิลิตร
3. ใส่สารละลายผสมอัลคาไลน์ซีเตรทกับไฮโปคลอไรต์ (อัตราส่วน 9 ต่อ 1) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง
4. นำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าดูดกลืนแสง 640 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานแอมโมเนีย
5. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายแอมโมเนียตามขั้นตอนที่ 1-4 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย โดยเตรียมจากแอมโมเนียคลอไรด์

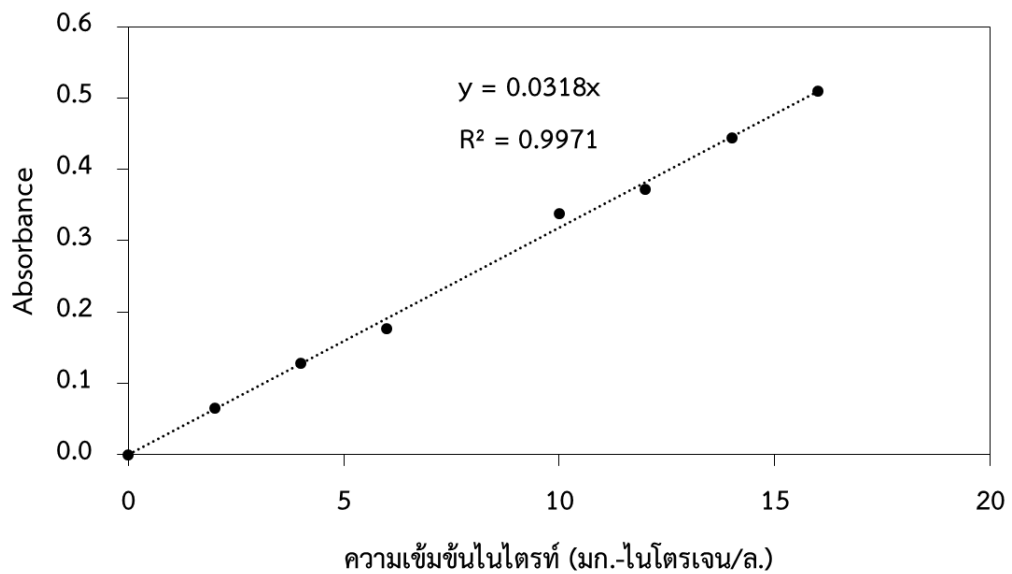
ภาคผนวก ค
กราฟมาตรฐาน

ค.1 กราฟมาตรฐานไนเตรท



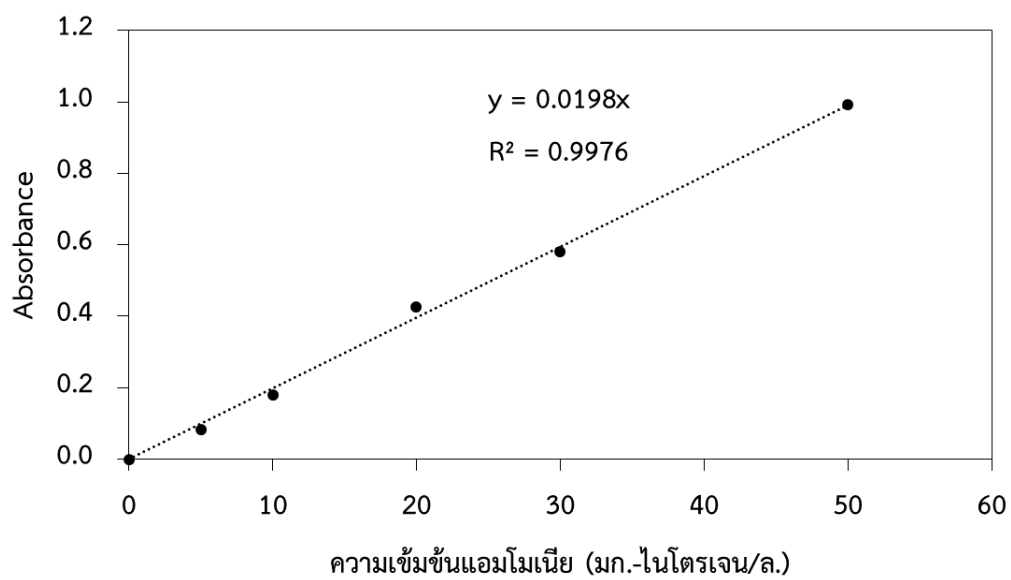
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานไนเตรท

ค.2 กราฟมาตรฐานไนไตรท์



รูป ค.2 กราฟมาตรฐานไนเตรท

ค.3 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย



รูป ค.3 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย



ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

ง-1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และการละลายน้ำของเม็ดพลาสติกชีวภาพ

ตาราง ง-1.1 ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ และพีเอชในน้ำปราศจากไอออน (DI)

วัน	วัน/เดือน/ปี	ดีไอซี (มก./ล.)			พีเอช		
		PLA	PHBV	PBS	PLA	PHBV	PBS
0	23/12/2562	0.208	0.208	0.208	7.05	7.05	7.05
7	29/12/2562	2.642	2.664	12.45	7	7.83	7.33
14	6/1/2563	1.173	2.064	14.58	7.3	7.4	7.3
21	13/1/2563	2.566	2.304	17.65	7.8	7.39	7.56
28	20/1/2563	0.9169	1.995	19.54	7.75	7.2	7.5
35	27/1/2563	1.159	1.849	22.21	7.66	7.43	7.8
ค่าเฉลี่ย		1.44	1.85	14.44	7.43	7.38	7.42
S.D.		0.96	0.85	7.79	0.36	0.26	0.26
น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น (ก.)		120.51	106.85	110.81	-	-	-

ตาราง ง-1.2 ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ ในเตรท และพีเอชในน้ำประปา

วัน	วัน/เดือน/ปี	ดีไอซี (มก./ล.)			ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			พีเอช		
		PLA	PHBV	PBS	PLA	PHBV	PBS	PLA	PHBV	PBS
0	12/6/2563	0.551	0.551	0.551	57.00	57.00	57.00	7	7	7
7	19/6/2563	0.8992	2.65	20.81	57.21	57.64	57.38	7.6	7.4	7.1
14	26/6/2563	1.241	3.046	27.46	57.81	57.08	57.08	7.4	7.5	7.4
21	3/7/2563	1.094	3.271	31.85	57.30	57.73	57.30	7.5	7.1	7.4
28	10/7/2563	0.9271	3.483	37.16	57.30	57.77	57.10	7.92	7.32	7.62
35	17/7/2563	1.24	3.658	39.08	57.10	57.19	57.79	7.3	7.1	7.3
ค่าเฉลี่ย		0.99	2.78	26.15	57.29	57.40	57.28	7.45	7.24	7.30
S.D.		0.26	1.15	14.19	0.28	0.35	0.29	0.31	0.20	0.22
น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น (ก.)		124.8	101.45	110.02	-	-	-	-	-	-

ตาราง ง-1.3 ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ และพีเอชในน้ำประปา

วัน	วัน/เดือน/ปี	ดีไอซี (มก./ล.)			พีเอช		
		PLA	PHBV	PBS	PLA	PHBV	PBS
0	25/8/2563	2.662	2.662	2.662	7.5	7.5	7.5
7	1/9/2563	3.424	3.319	23.38	7.43	7.6	7.35
14	8/9/2563	3.012	3.975	31.03	7.45	7.5	7.7
21	15/8/2563	2.600	4.194	39.89	7.58	7.35	7.67
28	22/8/2563	3.129	4.261	44.71	7.51	7.62	7.59
35	19/8/2563	2.395	3.939	46.78	7.2	7.41	7.2
ค่าเฉลี่ย		2.87	3.72	31.41	7.45	7.50	7.50
S.D.		0.38	0.62	16.59	0.13	0.10	0.19
น้ำหนักเม็ดพลาสติกชีวภาพเริ่มต้น (ก)		125.03	103.74	111.37	-	-	-

ตาราง ง-1.4 ผลการทดสอบประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของเม็ดพลาสติกชีวภาพด้วยวิธี zeta potential

พีเอช เริ่มต้น	พีเอชเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม.		
	PLA	PHBV	PBS
2.01	2.09	2.01	2.02
4	4.03	3.96	4.03
6.09	5.13	5.33	5.26
8.14	6.32	6.25	6.28
10.03	7.42	7.72	6.43

ง-2 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์

ตาราง ง-2.1 ค่าไนเตรทน้ำเข้าและออกในช่วงการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟิอิงแบบที่ละเท

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ซีไอดี (มก./ล.)			พีเอช	
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก
0	13/8/2562	47.13	-	-	296	-	-	7.76	-
1	14/8/2562	48.86	8.86	81.2	276	111	62.34	7.53	7.89
2	16/8/2562	51.38	0.20	99.6	248	60	78.30	7.79	8.23
4	18/8/2562	52.64	3.52	93.1	244	32	87.10	7.62	8.17
6	20/8/2562	49.23	2.30	95.6	231	55	77.51	7.76	7.87
8	22/8/2562	50.59	2.26	95.4	216	39	83.05	7.01	7.25
10	24/8/2562	49.02	2.48	95.1	245	67	69.09	7.41	7.99

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ซีโอดี (มก./ล.)			พีเอช	
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก
12	26/8/2562	49.72	0.67	98.6	298	82	66.40	7.25	7.49
14	28/8/2562	50.39	0.06	99.9	244	4	98.66	7.21	7.3
16	30/8/2562	47.87	1.18	97.7	228	8	96.72	7.11	7.24
18	1/9/2562	47.87	0.24	99.5	240	8	96.49	7.28	7.27
20	3/9/2562	49.21	0.18	99.6	227	14	94.00	7.6	7.42
22	5/9/2562	47.24	0.35	99.3	194	29	87.30	7.22	7.51
24	7/9/2562	48.82	1.79	96.2	224	60	69.14	7.14	7.67
26	9/9/2562	48.43	2.09	95.7	208	52	76.79	7.1	7.22
28	11/9/2562	52.00	1.54	96.8	252	36	82.69	7.57	7.33
30	14/9/2562	47.54	1.71	96.9	252	76	69.84	7.27	7.43
34	16/9/2562	48.23	0.71	98.5	236	32	87.30	7.38	7.34
36	18/9/2562	48.62	0.10	99.8	252	44	81.36	7.18	7.4
38	20/9/2562	48.82	0.26	99.5	229	41	83.59	7.31	7.43
40	23/9/2562	48.09	0.00	100.0	211	34	85.25	7.34	7.29
42	25/9/2562	48.60	2.40	95.0	232	28	86.70	7.4	7.34
44	27/9/2562	48.29	2.03	95.8	216	36	84.48	7.1	7.65
47	29/9/2562	47.42	4.19	91.3	212	44	79.63	7.23	7.13
49	1/10/2562	48.94	1.38	97.1	220	24	88.68	7.42	7.24
50	3/10/2562	48.43	0.83	98.3	232	40	81.82	7.6	7.28
52	7/10/2562	47.83	0.06	99.9	236	28	87.93	7.74	7.84
54	9/10/2562	48.82	2.48	94.8	220	32	86.44	7.61	7.61
56	11/10/2562	49.69	0.94	98.1	236	32	85.45	7.32	7.32
58	17/10/2562	48.03	0.00	100.0	234	54	77.22	7.63	7.37
60	19/10/2562	49.67	0.79	98.4	265	38	83.61	7.62	7.7
62	22/10/2562	49.78	0.00	100.0	246	42	84.06	7.59	7.44
64	24/10/2562	47.99	0.94	98.1	246	35	85.94	7.67	7.74
66	28/10/2562	49.51	1.08	97.7	227	46	81.25	7.72	7.39
68	31/10/2562	48.74	0.00	100.0	238	38	83.05	7.69	7.45
70	4/11/2562	49.39	0.71	98.5	253	4	98.39	7.74	7.99
72	11/11/2562	48.44	0.43	99.1	238	4	98.48	7.77	7.77
74	30/12/2562	47.19	2.05	95.8	256	16	93.28	7.6	7.74
76	1/1/2563	-	4.06	91.4	-	24	90.63	7.62	7.79
ค่าเฉลี่ย		48.91	1.44	97.04	238.37	38.16	83.95	7.46	7.54
S.D.		1.25	1.68	3.52	21.59	22.46	8.86	0.23	0.28

ง-3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในการเดินระบบแบบที่ละเท

การทดลองแบบที่ละเททำการเดินระบบทั้งหมด 27 วัน หลังจากนั้นนำเม็ดพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 90 มาศึกษาจลนพลศาสตร์ผลการวิเคราะห์รายละเอียดทั้งหมดแสดงในตาราง ง-3.1 – ง-3.5

ตาราง ง-3.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA แบบที่ละเท

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		พีเอช		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)	ดีไอซี (มก./ล.)
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		
0	17/1/2563	46.32	-	7.76	-	2.66	-
1	18/1/2563	-	40.85	-	7.58	0.19	-
2	20/1/2563	-	28.96	-	7.51	0.11	0.9169
3	21/1/2563	-	27.36	-	7.62	0.77	-
4	22/1/2563	-	24.25	-	7.81	0.09	-
5	23/1/2563	-	23.87	-	7.59	0.15	1.834
6	24/1/2563	-	23.11	-	7.68	0.11	-
8	26/1/2563	-	23.02	-	7.62	0.09	-
9	27/1/2563	-	22.83	-	7.8	0.34	-
10	28/1/2563	-	23.21	-	7.73	0.09	-
11	29/1/2563	-	23.77	-	7.84	0.19	2.642
12	30/1/2563	-	22.26	-	7.53	0.2	-
13	31/1/2563	-	22.64	-	8	0.13	-
14	1/2/2563	-	22.55	-	7.85	0.07	-
15	2/2/2563	-	22.74	-	7.79	0.15	-
16	3/2/2563	-	22.92	-	8.31	0.08	-
17	4/2/2563	-	22.55	-	7.69	0.22	-
18	5/2/2563	-	22.17	-	7.81	0.14	-
19	6/2/2563	-	23.11	-	7.72	0.09	-
20	7/2/2563	-	22.17	-	7.95	0.1	-
21	8/2/2563	-	22.45	-	7.77	0.11	-
22	9/2/2563	-	22.36	-	7.77	0.22	-
23	10/2/2563	-	22.08	-	7.86	0.77	-
24	11/2/2563	-	22.92	-	7.29	0.37	-
25	12/2/2563	-	22.92	-	7.93	0.4	-
26	13/2/2563	-	22.64	-	8.02	0.26	-
27	14/2/2563	-	23.30	-	8.07	0.49	-

หมายเหตุ : (-) คือ ไม่มีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบและไม่มีการวัดตัวอย่าง

ตาราง ง-3.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบทีละเท

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		พีเอช		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)	ดีไอซี (มก./ล.)
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		
0	13/1/2563	50.98	-	7.68	-	0.39	10.1
1	14/1/2563	48.33	0.00	7.6	7.35	0.19	14.32
2	15/1/2563	-	42.55	-	7.4	0.09	10.63
3	16/1/2563	-	29.62	-	7.25	0.22	12.58
4	17/1/2563	-	4.81	-	7.4	0.09	11.73
5	18/1/2563	49.34	0.19	7.58	7.46	0.04	14.38
7	20/1/2563	53.40	0.00	7.5	7.43	0.06	10.54
8	21/1/2563	47.74	0.00	7.83	7.55	0.15	14.33
9	22/1/2563	48.40	0.00	7.6	7.51	0.07	12.48
10	23/1/2563	48.21	0.00	7.62	7.51	0.09	5.102
11	24/1/2563	50.85	0.09	7.6	7.46	0.1	6.994
13	26/1/2563	49.81	0.28	7.54	7.44	0.08	-
14	27/1/2563	46.04	13.02	7.62	7.55	0.07	-
15	28/1/2563	54.91	7.45	7.69	7.58	0.05	5.26
16	29/1/2563	-	25.75	-	7.47	0.06	9.105
17	30/1/2563	48.30	0.00	7.5	7.45	0.06	-
18	31/1/2563	57.55	5.28	7.5	7.63	0.07	-
19	1/2/2563	50.57	5.38	7.78	7.69	0.07	-
20	2/2/2563	48.30	0.00	7.83	7.65	0.08	-
21	3/2/2563	50.75	0.00	7.75	7.5	0.06	-
22	4/2/2563	48.30	0.00	7.58	7.53	0.06	-
23	5/2/2563	49.25	0.00	7.63	7.51	0.09	-
24	6/2/2563	48.40	0.00	7.57	7.48	0.07	-
25	7/2/2563	48.30	0.00	7.58	7.48	0.07	-
26	8/2/2563	46.32	0.00	7.42	7.5	0.06	-
27	9/2/2563	-	0.09	-	7.52	0.07	-

หมายเหตุ : (-) คือ ไม่มีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบและไม่ได้ทำการวัดตัวอย่าง

ตาราง ง-3.3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบทีละเท

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ฟิเอช		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)	ดีไอซี (มก./ล.)
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		
0	13/1/2563	51.87	-	7.75	-	0.17	14.55
1	14/1/2563	-	45.67	-	7.55	0.17	12.93
2	15/1/2563	-	45.28	-	7.53	0.027	13.99
3	16/1/2563	-	39.91	-	7.43	0.17	7.805
4	17/1/2563	-	34.43	-	7.56	0.02	15.76
5	18/1/2563	-	26.04	-	7.45	0.17	15.58
7	20/1/2563	53.96	0.00	7.62	7.35	0.15	-
8	21/1/2563	-	32.08	-	7.62	0.19	16.54
9	22/1/2563	-	20.94	-	7.6	0.05	7.647
10	23/1/2563	54.25	0.00	7.78	7.59	0.05	14.32
11	24/1/2563	-	37.55	-	7.6	0.04	-
13	26/1/2563	47.17	0.75	7.66	7.32	0.07	41.09
14	27/1/2563	-	22.74	-	7.67	0.08	-
15	28/1/2563	49.91	0.00	7.73	7.62	0.03	13.24
16	29/1/2563	-	39.72	-	7.46	0.06	12.98
17	30/1/2563	51.70	0.00	7.51	7.56	0.09	14.1
18	31/1/2563	50.00	5.47	7.6	7.76	0.07	-
19	1/2/2563	48.02	0.00	7.9	7.53	0.06	-
20	2/2/2563	47.17	0.00	7.71	7.45	0.06	-
21	3/2/2563	50.85	0.00	7.74	7.6	0.04	-
22	4/2/2563	51.89	0.00	7.59	7.52	0.07	-
23	5/2/2563	47.45	0	7.62	7.38	0.06	-
24	6/2/2563	48.21	0	7.62	7.52	0.09	-
25	7/2/2563	48.0	0	7.76	7.41	0.06	-
26	8/2/2563	49.3	0.0	7.39	7.42	0.05	-
27	9/2/2563	-	0.0	-	7.25	0.08	-

หมายเหตุ : (-) คือ ไม่มีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบและไม่ได้ทำการวัดตัวอย่าง

ตาราง ง-3.4 ผลการวิเคราะห์การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบที่ละเท

เวลา (ชม.)	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ดีไอซี (มก./ล.)		
	ไนเตรท	ไนไตรท์	แอมโมเนีย	คงเหลือ	ที่ต้องการ	ทั้งหมด
0	53.30	0.00	0.00	9.62	0	9.62
1	49.57	0.00	0.00	12.84	5.49	18.33
2	44.30	0.00	0.00	8.08	7.76	15.84
3	41.50	0.00	0.00	16.52	4.11	20.63
4	36.54	0.00	0.00	13.35	7.30	20.65
5	26.31	0.00	0.00	12.50	15.05	27.55
6	23.03	0.00	0.00	11.20	4.83	16.03
7	18.46	0.00	0.00	10.16	6.72	16.89
8	18.85	0.00	0.00	13.45	0	13.45
9	15.10	0.00	0.00	9.92	5.51	15.44
10	11.29	0.00	0.00	16.05	5.60	21.65
11	2.83	0.00	0.00	12.37	12.44	24.81
12	0.72	0.00	0.00	3.49	3.10	6.60
13	0.12	0.00	0.00	10.73	0.89	11.62
14	0.10	0.00	0.00	11.53	0.03	11.56
15	0.00	0.00	0.00	9.52	0.15	9.67
16	0.00	0.00	0.00	16.42	0	16.42

ตาราง ง-3.5 ผลการวิเคราะห์การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบที่ละเท

เวลา (ชม.)	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ดีไอซี (มก./ล.)		
	ไนเตรท	ไนไตรท์	แอมโมเนีย	คงเหลือ	ที่ต้องการ	ทั้งหมด
0	50.51	0.00	0.00	0	39.65	39.65
1	48.67	0.00	0.00	2.91	78.33	81.25
2	39.24	0.00	0.00	14.97	58.15	73.13
3	37.54	0.00	0.00	2.70	34.29	36.99
4	34.51	0.00	0.00	4.81	58.57	63.38
5	33.28	0.00	0.00	1.95	53.34	55.30
6	33.11	0.00	0.00	0.28	61.35	61.63
7	27.32	0.00	0.00	9.18	52.05	61.23
8	26.52	0.00	0.00	1.27	59.09	60.37
9	22.75	0.00	0.00	5.98	57.09	63.08

เวลา (ชม.)	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ดีไอซี (มก./ล.)		
	ไนเตรท	ไนไตรท์	แอมโมเนีย	คงเหลือ	ที่ต้องการ	ทั้งหมด
10	18.24	0.00	0.00	7.16	46.31	53.48
11	16.07	0.00	0.00	3.44	64.17	67.62
12	12.70	0.00	0.00	5.36	82.37	87.74
13	7.44	0.00	0.00	8.34	85.33	93.67
14	2.48	0.00	0.00	7.87	73.28	81.16
15	0.10	0.00	0.00	3.78	72.61	76.40
16	0.08	0.00	0.00	0.03	112.61	112.65
17	0.08	0.00	0.00	89.26	0.00	89.26

การคำนวณดีไอซีที่ต้องการและดีไอซีทั้งหมด

$$\text{ดีไอซีทั้งหมด} = \text{ดีไอซีคงเหลือ(ได้จากการวัด)} + \text{ดีไอซีที่ต้องการ}$$

$$\text{ดีไอซีที่ต้องการ} = \frac{\text{ผลต่างของความเข้มข้นไนเตรทแต่ละชั่วโมง}}{\text{อัตราส่วนของดีไอซีต่อไนเตรท}}$$

หมายเหตุ : อัตราส่วนไอซีต่อไนเตรท (คำนวณได้จากสมการเคมีของเม็ดพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิด)

ง-4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อใช้เม็ดพลาสติก PHBV ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตาราง ง-4.1 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	2/8/2563	53.22	0.00	-	0.00	-	0.06	-	7.60	-
1	3/8/2563	-	0.63	98.82	-	0.00	-	0.00	-	7.20
2	4/8/2563	49.94	0.38	99.28	0.02	0.01	0.71	0.25	7.93	7.03
3	5/8/2563	-	0.43	99.15	-	0.02	-	1.06	-	6.99
4	6/8/2563	50.49	1.07	99.15	0.03	0.02	0.13	0.00	7.70	6.82
5	7/8/2563	-	0.00	100.00	-	0.03	-	0.66	-	7.49
6	8/8/2563	50.93	14.60	71.09	0.03	0.02	0.05	0.53	7.85	7.48
7	9/8/2563	-	3.32	93.48	-	0.04	-	2.17	-	7.87
8	10/8/2563	49.90	0.00	100	0.02	0.06	0.25	0.00	7.28	7.24
9	11/8/2563	-	0.63	98.74	-	0.03	-	0.03	-	7.30

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
10	12/8/2563	51.98	0.24	99.51	0.00	0.01	0.00	0.98	7.91	7.21
11	13/8/2563	-	0.00	100	-	0.03	-	0.76	-	7.28
12	14/8/2563	51.94	5.69	89.06	0.02	0.06	0.25	1.84	7.80	7.65
13	15/8/2563	-	12.35	76.23	-	0.02	-	0.66	-	7.60
14	16/8/2563	51.72	16.96	67.34	0.02	0.03	1.04	0.81	7.67	7.74
15	17/8/2563	-	18.79	63.68	-	0.03	-	0.86	-	7.52
16	18/8/2563	53.22	41.90	18.98	0.01	1.36	0.43	2.35	7.66	7.55
17	19/8/2563	-	44.11	17.12	-	0.72	-	1.16	-	7.64
18	20/8/2563	51.19	43.08	19.06	0.00	1.06	0.53	0.25	7.91	8.05
19	21/8/2563	-	45.06	11.98	-	0.78	-	0.45	-	7.92
20	22/8/2563	48.79	44.60	12.89	0.00	0.50	1.36	0.83	7.86	7.79
21	23/8/2563	-	43.89	10.04	-	0.19	-	1.01	-	7.36
22	24/8/2563	48.06	42.21	13.49	0.01	0.20	0.61	0.51	8.03	7.59
23	25/8/2563	-	45.28	5.77	-	0.14	-	0.81	-	7.61
24	26/8/2563	50.12	44.94	6.49	0.00	0.11	0.15	1.11	7.98	7.74

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.2 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี ทีโอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
0	2/8/2563	0	-	-	-	620	-	400	-
1	3/8/2563	-	160	-	-	-	-	-	400
2	4/8/2563	0	340	-	0.85	125	-	-	-
3	5/8/2563	-	520	-	0.99	85	-	-	-
4	6/8/2563	0	560	-	0.17	-	-	-	-
5	7/8/2563	-	120	-	0.56	-	-	-	-
6	8/8/2563	16	40	-	1.9	65	130	466.6	-
7	9/8/2563	-	80	-	0.48	-	-	-	566.6
8	10/8/2563	16	240	-	0.69	-	-	400	600

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
9	11/8/2563	-	340	-	-	-	-	-	566.6
10	12/8/2563	7.52	100	-	0.31	75	125	483.3	-
11	13/8/2563	-	140	-	0.71	-	-	-	-
12	14/8/2563	7.52	80	-	1.02	85	90	433.3	616.6
13	15/8/2563	-	60	-	2.15	-	-	-	-
14	16/8/2563	7.52	60	-	1.74	110	75	350	-
15	17/8/2563	-	100	-	-	-	-	-	516.6
16	18/8/2563	18.8	30.08	-	2.56	100	70	550	500
17	19/8/2563	-	30.08	-	-	-	-	-	-
18	20/8/2563	15.04	15.04	4.51	1.93	-	-	500	483.3
19	21/8/2563	-	22.56	-	-	-	-	-	-
20	22/8/2563	7.52	30.08	-	1.69	90	25	483.3	466.6
21	23/8/2563	-	18.8	-	1.58	-	-	-	-
22	24/8/2563	11.76	15.68	3.63	1.29	55	35	500	516.6
23	25/8/2563	-	19.6	-	1.63	-	-	-	-
24	26/8/2563	7.52	7.84	4.5	1.41	55	25	466.6	400

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.3 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และฟิเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 16 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							ฟิเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
24	26/8/2563	50.12	44.94	6.49	0.00	0.11	0.15	1.11	7.98	7.74
25	27/8/2563	-	45.55	9.13	-	2.26	-	1.21	-	7.70
26	28/8/2563	49.45	42.71	14.78	0.01	3.55	2.30	0.98	7.93	7.65
27	29/8/2563	-	43.97	11.09	-	3.97	-	0.43	-	7.72
28	30/8/2563	51.96	43.85	11.34	0.00	2.00	0.00	1.64	7.84	7.66
29	31/8/2563	-	46.74	10.05	-	1.52	-	0.15	-	7.69
30	1/9/2563	48.54	46.19	11.10	0.00	0.28	0.43	2.12	7.76	7.53
31	2/9/2563	-	46.42	4.38	-	0.43	-	1.39	-	7.53
32	3/9/2563	49.88	48.02	1.08	0.00	0.40	0.00	0.20	7.61	7.50
33	4/9/2563	-	46.11	7.55	-	1.15	-	0.10	-	7.40

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
34	5/9/2563	50.28	39.90	20.01	0.01	5.70	0.15	0.13	7.57	7.44
35	6/9/2563	-	42.98	15	-	2.68	-	0.00	-	7.70
36	7/9/2563	48.40	45.57	9.38	0.01	1.53	0.00	0.05	7.54	7.51
37	8/9/2563	-	45.81	5.35	-	0.65	-	0.00	-	7.38
38	9/9/2563	52.51	46.68	3.55	0.00	0.48	0.00	0.00	7.47	7.45
39	10/9/2563	-	47.02	10.45	-	0.58	-	0.00	-	7.80
40	11/9/2563	49.70	51.15	2.58	0.00	0.53	0.00	0.00	7.56	7.70
41	12/9/2563	-	51.03	0.00	-	0.63	-	0.00	-	7.50
42	13/9/2563	51.94	49.19	1.02	0.00	0.50	0.00	0.00	7.22	7.37

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.4 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี ทีโอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 16 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
24	26/8/2563	7.52	7.84	4.5	1.41	55	25	466.7	-
25	27/8/2563	-	19.6	-	2.85	-	-	-	-
26	28/8/2563	11.76	39.2	4.26	1.37	100	65	500.0	416.7
27	29/8/2563	-	23.52	-	1.61	-	-	-	-
28	30/8/2563	7.52	7.68	3.47	1.32	55	20	550.0	366.7
29	31/8/2563	-	7.86	-	1.51	-	-	-	-
30	1/9/2563	15.36	11.52	4.41	1.35	30	40	450.0	416.7
31	2/9/2563	-	19.2	-	-	-	-	-	-
32	3/9/2563	0	19.2	4.3	1.33	65	30	466.7	416.7
33	4/9/2563	-	19.2	-	1.53	-	-	-	-
34	5/9/2563	15.04	43.12	4.07	1.42	30	20	516.7	500.0
35	6/9/2563	-	43.12	-	1.48	-	-	-	-
36	7/9/2563	15.04	54.88	4.12	1.37	50	50	450.0	483.3
37	8/9/2563	-	22.56	-	1.54	-	-	-	-
38	9/9/2563	11.28	15.04	4.38	1.56	25	25	450.0	433.3
39	10/9/2563	-	16	-	1.41	-	-	-	-

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอติ (มก./ล.)		ดีโอซี (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
40	11/9/2563	8	16	4.17	1.37	50	30	366.7	466.7
41	12/9/2563	-	16	-	-	-	-	-	-
42	13/9/2563	8	24	-	1.58	40	20	467	483.3

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.5 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และฟิเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 20 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							ฟิเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย		น้ำเข้า	น้ำออก
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		
42	13/9/2563	51.94	49.19	1.02	0.00	0.50	0.00	0.00	7.22	7.37
43	14/9/2563	-	46.80	9.90	-	0.84	-	0.00	-	7.37
44	15/9/2563	52.49	46.54	10.41	0.00	2.58	0.00	0.00	7.85	7.60
45	16/9/2563	-	45.47	13.38	-	1.83	-	0.00	-	7.40
46	17/9/2563	51.07	45.69	12.96	0.00	2.03	0.00	0.00	7.43	7.17
47	18/9/2563	-	45.91	10.11	-	1.49	-	0.00	-	7.32
48	19/9/2563	50.61	47.94	5.28	0.00	0.98	0.00	0.00	7.49	7.31
49	20/9/2563	-	46.70	7.72	-	1.34	-	0.00	-	7.40
50	21/9/2563	50.12	47.21	7	0.00	1.36	0.00	0.00	7.52	7.43
51	22/9/2563	-	45.32	9.57	-	2.46	-	0.00	-	7.39
52	23/9/2563	50.18	44.92	10.38	0.00	3.00	0.00	0.00	7.53	7.18
53	24/9/2563	-	45.75	9	-	2.48	-	0.00	-	7.41
54	25/9/2563	50.61	45.30	9.72	0.00	2.77	0.00	0.00	7.63	7.40
55	26/9/2563	-	42.23	16.56	-	3.79	-	0.00	-	7.35
56	27/9/2563	50.32	43.89	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00	7.52	7.27
57	28/9/2563	-	41.64	17.26	-	4.58	-	0.00	-	7.77
58	29/9/2563	51.42	42.06	16.41	0.00	5.72	0.00	0.00	7.56	7.34

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.6 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี ทีโอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 20 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
42	13/9/2563	8.0	24	3.2	1.58	40.0	20.0	466.7	483
43	14/9/2563	-	16.0	-	1.5	-	-	-	-
44	15/9/2563	4.0	20.0	4.3	1.1	95.0	60.0	466.7	483.3
45	16/9/2563	-	24.0	-	1.2	-	-	-	-
46	17/9/2563	15.5	19.4	4.6	1.4	85.0	80.0	500.0	383.3
47	18/9/2563	-	23.2	-	1.7	-	-	-	-
48	19/9/2563	15.5	23.2	4.2	1.9	85.0	110.0	500.0	500.0
49	20/9/2563	-	38.7	-	2.0	-	-	-	-
50	21/9/2563	11.6	31.0	4.2	2.2	105.0	65.0	533.3	516.7
51	22/9/2563	-	31.0	-	1.8	-	-	-	-
52	23/9/2563	15.5	31.0	4.1	2.5	70.0	90.0	350.0	450.0
53	24/9/2563	-	31.0	-	1.7	-	-	-	-
54	25/9/2563	0.0	16.0	4.2	1.5	35.0	25.0	416.7	433.3
55	26/9/2563	-	16.0	-	2.0	-	-	-	-
56	27/9/2563	12.0	16.0	3.5	1.6	60.0	25.0	433.3	483.3
57	28/9/2563	-	16.0	-	2.0	-	-	-	-
58	29/9/2563	0.00	20.0	4.05	1.5	60.0	30.0	-	516.7

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.7 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนเตรท แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 24 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนเตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
58	29/9/2563	51.42	42.06	16.41	0.00	5.72	0.00	0.00	7.56	7.34
59	30/9/2563	-	41.15	19.96	-	6.09	-	0.00	-	7.43
60	1/10/2563	48.38	37.37	27.32	0.00	7.59	0.00	0.00	7.51	7.36
61	2/10/2563	-	36.56	24.44	-	6.92	-	0.00	-	7.25
62	3/10/2563	51.52	38.44	20.54	0.00	3.60	0.00	0.00	7.51	7.31

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
63	4/10/2563	-	29.84	42.08	-	3.11	-	0.00	-	7.38
64	5/10/2563	50.85	37.19	27.82	0.00	3.45	0.00	0.00	7.50	7.33
65	6/10/2563	-	33.56	34.00	-	4.58	-	0.00	-	7.30
66	7/10/2563	49.84	30.91	39	0.00	7.05	0.00	0.00	7.68	7.56
67	8/10/2563	-	26.84	46.14	-	8.86	-	0.00	-	7.60
68	9/10/2563	49.21	19.31	61.25	0.00	11.80	0.00	0.00	7.84	7.53
69	10/10/2563	-	19.78	60	-	10.99	-	0.00	-	7.85
70	11/10/2563	49.55	11.19	77.25	0.00	16.63	0.00	0.00	7.95	7.68
71	12/10/2563	-	7.17	85.54	-	14.68	-	0.00	-	7.50
72	13/10/2563	48.93	5.47	88.97	0.00	6.84	0.00	0.27	7.71	7.63
73	14/10/2563	-	9.57	80.43	-	6.42	-	0.00	-	7.59
74	15/10/2563	49.23	6.78	86.14	0.00	6.78	0.00	0.00	8.07	7.67
75	16/10/2563	-	4.78	90.30	-	5.94	-	0.30	-	7.88
76	17/10/2563	-	7.29	85.20	-	6.25	-	0.60	-	7.98

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-4.8 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี ทีโอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PHBV แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 24 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
58	29/9/2563	0.0	20.0	4.1	1.46	60.0	30.0	433.3	517
59	30/9/2563	-	16.0	-	1.6	-	-	-	-
60	1/10/2563	0.0	4.0	3.8	1.5	50.0	70.0	433.3	500.0
61	2/10/2563	-	32.0	-	1.8	-	-	-	-
62	3/10/2563	15.7	11.8	3.5	1.6	60.0	55.0	550.0	500.0
63	4/10/2563	-	19.6	-	1.8	-	-	-	-
64	5/10/2563	3.9	23.5	4.4	1.8	110.0	20.0	516.7	583.3
65	6/10/2563	-	88.0	-	1.7	-	-	-	-
66	7/10/2563	20.0	76.0	4.2	1.9	65.0	50.0	500.0	583.3
67	8/10/2563	-	90.0	-	1.9	-	-	-	-

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
68	9/10/2563	24.0	116.0	3.8	1.9	85.0	50.0	483.3	550.0
69	10/10/2563	-	48.0	-	1.7	-	-	-	-
70	11/10/2563	20.0	64.0	3.6	2.0	35.0	45.0	416.7	616.7
71	12/10/2563	-	56.0	-	1.4	-	-	-	-
72	13/10/2563	19.6	43.1	4.0	1.6	20.0	10.0	500.0	683.3
73	14/10/2563	-	35.3	-	1.8	-	-	-	-
74	15/10/2563	23.5	109.8	4.1	1.6	125.0	60.0	550.0	666.7
75	16/10/2563	-	31.36	-	1.54	-	-	-	-
76	17/10/2563	-	31.36	-	1.76	20	30	-	700.0

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ง-5 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อใช้เม็ดพลาสติก PBS ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตาราง ง-5.1 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
0	14/8/2563	51.94	-	-	0.02	-	0.25	-	7.80	-
1	15/8/2563	-	26.21	49.53	-	0.28	-	0.28	-	7.60
2	16/8/2563	51.72	0.14	99.73	0.02	0.03	1.04	0.23	7.67	7.74
3	17/8/2563	-	0.00	100.00	-	0.02	-	0.10	-	7.52
4	18/8/2563	53.22	0.00	100.00	0.01	0.03	0.43	0.45	7.66	7.55
5	19/8/2563	-	0.00	100.00	-	0.02	-	0.30	-	7.57
6	20/8/2563	51.19	0.00	100.00	0.00	0.02	0.53	0.40	7.91	7.40
7	21/8/2563	-	0.00	100.00	-	0.02	-	0.38	-	7.54
8	22/8/2563	48.79	0.51	99.01	0.00	0.01	1.36	0.40	7.86	7.76
9	23/8/2563	-	0.53	98.92	-	0.02	-	0.40	-	7.31
10	24/8/2563	48.06	0.28	99.42	0.01	0.02	0.61	0.76	8.03	7.53
11	25/8/2563	-	0.16	99.66	-	0.02	-	0.30	-	7.94
12	26/8/2563	50.12	0.65	98.65	0.00	0.02	0.15	0.15	7.98	7.57
13	27/8/2563	-	0.18	99.64	-	0.00	-	0.56	-	7.57
14	28/8/2563	49.45	0.14	99.72	0.01	0.02	2.30	0.86	7.93	7.69
15	29/8/2563	-	0.47	99.06	-	0.05	-	1.49	-	7.54

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
16	30/8/2563	51.96	0.30	99.39	0.00	0.00	0.00	0.76	7.84	7.64
17	31/8/2563	-	0.18	99.65	-	0.00	-	0.66	-	7.55
18	1/9/2563	48.54	0.43	99.18	0.00	0.00	0.43	0.71	7.76	7.64
19	2/9/2563	-	0.12	99.75	-	0.02	-	0.51	-	7.47
20	3/9/2563	49.88	0.77	98.42	0.00	0.00	0.00	0.51	7.61	7.44
21	4/9/2563	-	0.71	98.58	-	0.02	-	0.18	-	7.34
22	5/9/2563	50.28	0.00	100.00	0.01	0.01	0.15	0.00	7.57	7.30

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.2 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี ทีโอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 12 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
0	14/8/2563	7.52	-	-	1.02	370	-	433.3	516.7
1	15/8/2563	-	60.00	-	2.15	-	-	-	-
2	16/8/2563	18.80	100.00	-	1.74	360	75	350.0	-
3	17/8/2563	-	60.00	-	-	-	-	-	633.3
4	18/8/2563	15.04	141.00	-	2.56	255	125	550.0	-
5	19/8/2563	-	65.80	-	-	-	-	-	-
6	20/8/2563	7.52	75.20	-	1.93	-	-	500.0	633.3
7	21/8/2563	-	94.00	-	-	-	-	-	-
8	22/8/2563	11.76	47.00	-	1.09	380	75	483.3	733.3
9	23/8/2563	-	84.60	-	1.14	-	-	-	-
10	24/8/2563	7.52	86.24	3.63	0.84	100	60	500.0	600.0
11	25/8/2563	-	47.04	-	1.22	-	-	-	-
12	26/8/2563	11.76	50.96	4.5	0.98	455	90	466.7	516.7
13	27/8/2563	-	74.48	-	0.36	-	-	-	-
14	28/8/2563	7.52	70.56	4.26	0.88	100	65	500.0	533.3
15	29/8/2563	-	58.80	-	1.13	-	-	-	-
16	30/8/2563	7.52	61.44	3.47	1.24	50	90	550.0	683.3
17	31/8/2563	-	42.24	-	1.34	-	-	-	-

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
18	1/9/2563	15.36	69.12	4.41	1.33	60	40	450.0	666.7
19	2/9/2563	-	46.08	-	-	-	-	-	-
20	3/9/2563	0	49.92	3.69	1.17	75	80	466.7	633.3
21	4/9/2563	-	57.6	-	0.52	-	-	-	-
22	5/9/2563	15.04	62.72	4.02	0.97	45	25	516.7	616.7

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.3 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนเตรท แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่
ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 8 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22	5/9/2563	50.28	0.00	100	0.01	0.01	0.15	0.00	7.57	7.30
23	6/9/2563	-	3.58	92.87	-	0.41	-	0.00	-	7.40
24	7/9/2563	48.40	0.26	99.48	0.01	0.13	0.00	0.00	7.54	7.45
25	8/9/2563	-	0.00	100.00	-	0.01	-	0.00	-	7.31
26	9/9/2563	52.51	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.47	7.26
27	10/9/2563	-	0.00	100.00	-	0.00	-	0.00	-	7.70
28	11/9/2563	49.70	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.56	7.50
29	12/9/2563	-	0.02	99.96	-	0.01	-	0.00	-	7.30
30	13/9/2563	51.94	0.14	99.71	0.00	0.00	0.00	0.00	7.22	7.17
31	14/9/2563	-	0.73	98.60	-	0.38	-	0.00	-	7.17
32	15/9/2563	52.49	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.85	7.52
33	16/9/2563	-	0.22	99.58	-	0.04	-	0.00	-	7.48
34	17/9/2563	51.07	0.00	100.00	0.00	0.02	0.00	0.00	7.43	7.31
35	18/9/2563	-	0.00	100.00	-	0.03	-	0.00	-	7.42
36	19/9/2563	50.61	0.02	99.96	0.00	0.00	0.00	0.00	7.49	7.35

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.4 ผลการวิเคราะห์ซีไอดี ทีไอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 8 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
22	5/9/2563	15.04	62.72	4.02	0.97	45	25	516.7	616.7
23	6/9/2563	-	54.88	-	1.1	-	-	-	-
24	7/9/2563	15.04	74.48	4.12	1.17	230	180	450.0	616.7
25	8/9/2563	-	45.12	-	1.21	-	-	-	-
26	9/9/2563	11.28	63.92	4.38	1.24	30	20	450.0	633.3
27	10/9/2563	-	80.00	-	0.81	-	-	-	-
28	11/9/2563	8.00	68.00	4.17	1.11	55	25	366.7	666.7
29	12/9/2563	-	40.00	-	1.1	-	-	-	-
30	13/9/2563	8.00	44.00	3.2	1.48	20	20	466.7	483.3
31	14/9/2563	-	16.00	-	1.51	-	-	-	-
32	15/9/2563	4.00	28.00	4.29	0.96	225	15	466.7	616.7
33	16/9/2563	-	24.00	-	1.1	-	-	-	-
34	17/9/2563	15.48	85.16	4.58	0.87	220	355	500.0	616.7
35	18/9/2563	-	42.58	-	1.38	-	-	-	-
36	19/9/2563	15.48	54.19	4.23	0.85	370	55	500.0	533.3

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.5 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 4 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
36	19/9/2563	50.61	0.02	99.96	0.00	0.00	0.00	0.00	7.49	7.35
37	20/9/2563	-	5.34	89.44	-	0.91	-	0.00	-	7.35
38	21/9/2563	50.12	1.50	97.04	0.00	0.35	0.00	0.00	7.52	7.74
39	22/9/2563	-	0.12	99.76	-	0.00	-	0.00	-	7.12
40	23/9/2563	50.18	0.20	99.60	0.00	0.00	0.00	0.00	7.53	7.02
41	24/9/2563	-	0.97	98.06	-	0.78	-	0.00	-	7.21
42	25/9/2563	50.61	0.47	99.07	0.00	0.07	0.00	0.00	7.63	7.22
43	26/9/2563	-	0.06	99.88	-	0.06	-	0.00	-	7.08

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนไตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
44	27/9/2563	50.32	0.00	100.00	0.00	0.04	0.00	0.00	7.52	7.08
45	28/9/2563	-	1.32	97.39	-	0.61	-	0.00	-	7.60
46	29/9/2563	51.42	2.44	95.14	0.00	2.08	0.00	0.00	7.56	7.29
47	30/9/2563	-	0.51	99.02	-	0.48	-	0.00	-	7.10
48	1/10/2563	48.38	13.68	73.39	0.00	1.94	0.00	0.00	7.51	7.23
49	2/10/2563	-	6.09	87.41	-	4.33	-	0.00	-	7.15
50	3/10/2563	51.52	0.79	98.37	0.00	1.92	0.00	0.00	7.51	7.27
51	4/10/2563	-	0.00	100.00	-	0.02	-	0.00	-	7.17
52	5/10/2563	50.85	0.00	100.00	0.00	0.02	0.00	0.00	7.50	7.15
53	6/10/2563	-	0.00	100.00	-	0.02	-	0.00	-	7.17
54	7/10/2563	49.84	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.68	7.12
56	9/10/2563	49.21	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.84	7.43

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.6 ผลการวิเคราะห์ซีไอดี ทีไอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 4 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
36	19/9/2563	15.48	54.19	4.23	0.85	370	55	500.0	533.3
37	20/9/2563	-	50.32	-	1.39	-	-	-	-
38	21/9/2563	11.61	96.77	4.2	1.43	355	310	533.3	683.3
39	22/9/2563	-	58.06	-	0.84	-	-	-	-
40	23/9/2563	15.48	58.06	4.1	0.68	260	355	350.0	616.7
41	24/9/2563	-	30.97	-	0.8	-	-	-	-
42	25/9/2563	0.00	20.00	4.15	0.05	345	320	416.7	883.3
43	26/9/2563	-	32.00	-	0.81	-	-	-	-
44	27/9/2563	12.00	40.00	3.49	1.41	435	50	433.3	633.3
45	28/9/2563	-	40.00	-	0.95	-	-	-	-
46	29/9/2563	0.00	32.00	4.05	0.96	170	265	433.3	516.7
47	30/9/2563	-	28.00	-	0.95	-	-	-	-
48	1/10/2563	0.00	16.00	3.8	1.08	155	190	433.3	600.0
49	2/10/2563	-	12.00	-	1.09	-	-	-	-

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก./CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
50	3/10/2563	15.68	3.92	3.46	1.19	135	180	550.0	550.0
51	4/10/2563	-	35.28	-	1.47	-	-	-	-
52	5/10/2563	3.92	47.04	4.41	0.93	345	115	516.7	666.7
53	6/10/2563	-	8	-	0.81	-	-	-	-
54	7/10/2563	20	28	4.2	0.61	90	85	500.0	716.7
56	9/10/2563	24	28	3.84	0.76	150	170	483.3	750.0

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.7 ผลการวิเคราะห์ไนเตรท ไนเตรท์ แอมโมเนีย และพีเอชในถังปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่
ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 2 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)							พีเอช	
		ไนเตรท			ไนเตรท์		แอมโมเนีย			
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
56	9/10/2563	49.21	0.00	100	0.00	0.00	0.00	0.00	7.84	7.43
57	10/10/2563	-	17.47	64.50	-	0.00	-	0.00	-	7.79
58	11/10/2563	49.55	24.96	49.28	0.00	10.08	0.00	0.00	7.95	7.64
59	12/10/2563	-	26.98	45.55	-	0.00	-	0.00	-	7.57
60	13/10/2563	48.93	31.15	37.13	0.00	8.00	0.00	0.00	7.71	7.69
61	14/10/2563	-	36.44	25.53	-	0.00	-	0.00	-	7.71
62	15/10/2563	49.23	16.92	65.41	0.00	1.64	0.00	0.00	8.07	7.38
63	16/10/2563	-	4.53	90.79	-	7.93	-	0.00	-	7.65
64	17/10/2563	47.59	8.42	82.89	0.00	2.57	0.00	0.00	8.08	7.75
66	19/10/2563	47.31	0.00	100.00	0.00	14.54	0.00	0.00	8.08	7.84
67	20/10/2563	-	13.06	72.40	-	4.72	-	0.00	-	7.58
68	21/10/2563	49.00	5.00	89.43	0.00	7.37	0.00	0.00	8.09	7.65
69	22/10/2563	-	0.95	98.06	-	10.03	-	0.00	-	7.57
70	23/10/2563	47.19	0.83	98.31	0.00	0.66	0.00	0.00	8.07	7.66
72	25/10/2563	49.84	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.05	7.50
73	26/10/2563	-	0.85	98.29	-	0.08	-	0.00	-	7.49
74	27/10/2563	51.00	0.06	99.88	0.00	0.06	0.00	0.00	8.03	7.61

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

ตาราง ง-5.8 ผลการวิเคราะห์ซีไอดี ทีไอซี ออกซิเจนละลาย ของแข็งแขวนลอย และสภาพต่างในถัง ปฏิกรณ์ชนิดเบดเคลื่อนที่ที่บรรจุเม็ดพลาสติกชีวภาพ PBS แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาพักน้ำ 2 ชั่วโมง

วัน	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดี (มก./ล.)		ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		MLSS (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สภาพต่าง (มก.CaCO ₃ /ล.)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			น้ำเข้า	น้ำออก
56	9/10/2563	24.00	28.00	3.84	0.76	150	170	483.3	750.0
57	10/10/2563	-	28.00	-	1.6	-	-	-	-
58	11/10/2563	20.00	28.00	3.59	1.54	60	150	416.7	600.0
59	12/10/2563	-	32.00	-	1.57	-	-	-	-
60	13/10/2563	19.60	39.20	3.97	1.78	10	80	500.0	633.3
61	14/10/2563	-	39.20	-	1.89	-	-	-	-
62	15/10/2563	23.52	70.56	4.08	1.75	180	35	550.0	650.0
63	16/10/2563	-	54.88	-	1.65	-	-	-	-
64	17/10/2563	19.60	82.32	3.39	1.92	60	10	566.7	683.3
66	19/10/2563	19.20	50.96	4.2	1.32	40	100	566.7	616.7
67	20/10/2563	-	49.92	-	1.76	-	-	-	-
68	21/10/2563	0.00	49.92	4.48	1.36	30	105	566.7	600.0
69	22/10/2563	-	76.80	-	1.5	-	-	-	-
70	23/10/2563	30.72	80.64	3.65	1.34	320	30	566.7	683.3
72	25/10/2563	13.79	122.80	3.49	0.34	240	65	516.7	783.3
73	26/10/2563	-	119.07	-	1.22	-	-	-	-
74	27/10/2563	-	77.71	4.17	0.89	160	125	583.3	750.0

หมายเหตุ : (-) ไม่ได้ทำการวัดอย่าง

บรรณานุกรม

- Ashter, S. A., 2016. Introduction to bioplastics engineering. William Andrew.
- 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.
- Bill, K. A., Bott, C. and Murthy, S. (2009). Evaluation of alternative electron donors for denitrifying moving bed biofilm reactors (MBBRs). Water Science and Technology, 60(10), 2647-2657.
- Calderer, M., Gibert, O., Martí, V., Rovira, M., De Pablo, J., Jordana, S., Duro, L., Guimerà, J. and Bruno, J. (2010). Denitrification in presence of acetate and glucose for bioremediation of nitrate-contaminated groundwater. Environmental technology, 31(7), 799-814.
- Chu, L. and Wang, J. (2011). Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor. Chemical Engineering Journal, 170(1), 220-225.
- Chu, L. and Wang, J. (2013). Denitrification performance and biofilm characteristics using biodegradable polymers PCL as carriers and carbon source. Chemosphere, 91(9), 1310-1316.
- Fan, Z., Hu, J. and Wang, J. (2012). Biological nitrate removal using wheat straw and PLA as substrate. Environmental Technol, 33(19-21), 2369-2374.
- Gerardi, M. H., 2002. Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process. New York. John Wiley and Sons, Inc.
- Gibert, O., Pomierny, S., Rowe, I. and Kalin, R. M. (2008). Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). Bioresource technology, 99(16), 7587-7596.
- Grady Jr, C. L., Daigger, G. T., Love, N. G. and Filipe, C. D., 2011. Biological wastewater treatment. CRC press.
- Hiraishi, A. and Khan, S. T. (2003). Application of polyhydroxyalkanoates for denitrification in water and wastewater treatment. Applied Microbiology and Biotechnology,

61(2), 103-109.

- Hu, R., Zheng, X., Zheng, T., Xin, J., Wang, H. and Sun, Q. (2019). Effects of carbon availability in a woody carbon source on its nitrate removal behavior in solid-phase denitrification. Journal Environmental Manage, 246, 832-839.
- Khan, S. T., Horiba, Y., Takahashi, N. and Hiraishi, A. (2007). Activity and community composition of denitrifying bacteria in poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)-using solid-phase denitrification processes. Microbes and environments, 22(1), 20-31.
- Kulkarni, V. S. and Shaw, C. 2016. Surfactants, Lipids, and Surface Chemistry. Essential Chemistry for Formulators of Semisolid and Liquid Dosages.5-19.
- Luo, G., Xu, G., Gao, J. and Tan, H. (2016). Effect of dissolved oxygen on nitrate removal using polycaprolactone as an organic carbon source and biofilm carrier in fixed-film denitrifying reactors. Journal Environmental Science (China), 43, 147-152.
- Matthew Preisser, K. N., Tzahi Cath,. Effects of a Nitrification/Denitrification Inhibition Compound on. Biological Wastewater Treatment.
- Metcalf and Eddy, 2014. Wastewater Engineering : Treatment and Resource Recovery. New York : McGraw-Hill.
- Ni, B.-J., Pan, Y., Guo, J., Viridis, B., Hu, S., Chen, X. and Yuan, Z. 2016. Denitrification Processes for Wastewater Treatment. Metalloenzymes in Denitrification.368-418.
- Oh, J. and Silverstein, J. (1999). Acetate Limitation and Nitrite Accumulation during Denitrification. Journal of Environmental Engineering, 125(3), 234-242.
- Raza, Z. A., Abid, S. and Banat, I. M. (2018). Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. International Biodeterioration & Biodegradation, 126, 45-56.
- Rudnik, E. 2019. Properties and applications. Compostable Polymer Materials.49-98.
- S. P. Burghate and N. W. Ingole. (2013). Biological Denitrification – A Review. Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology, Vol.3.No.1, 009-028.
- Shen, Z., Zhou, Y., Hu, J. and Wang, J. (2013). Denitrification performance and microbial diversity in a packed-bed bioreactor using biodegradable polymer as carbon

- source and biofilm support. Journal of Hazardous Materials, 250-251, 431-438.
- Srinandan, C., D'souza, G., Srivastava, N., Nayak, B. B. and Nerurkar, A. S. (2012). Carbon sources influence the nitrate removal activity, community structure and biofilm architecture. Bioresource technology, 117, 292-299.
- Wang, J. and Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. Biotechnology advances, 34(6), 1103-1112.
- Wu, W., Yang, F. and Yang, L. (2012). Biological denitrification with a novel biodegradable polymer as carbon source and biofilm carrier. Bioresour Technol, 118, 136-140.
- Wu, W., Yang, L. and Wang, J. (2013). Denitrification using PBS as carbon source and biofilm support in a packed-bed bioreactor. Environmental Science and Pollution Research, 20(1), 333-339.
- Xu, Y., Qiu, T.-L., Han, M.-L., Li, J. and Wang, X.-M. (2011). Heterotrophic Denitrification of Nitrate-Contaminated Water Using Different Solid Carbon Sources. Procedia Environmental Sciences, 10, 72-77.
- Xu, Z., Song, L., Dai, X. and Chai, X. (2018). PHBV polymer supported denitrification system efficiently treated high nitrate concentration wastewater: Denitrification performance, microbial community structure evolution and key denitrifying bacteria. Chemosphere, 197, 96-104.
- Xu, Z., Dai, X. and Chai, X. (2019). Effect of temperature on tertiary nitrogen removal from municipal wastewater in a PHBV/PLA-supported denitrification system. Environmental Science and Pollution Research, 26(26), 26893-26899.
- Yuan, Q., Wang, H., Hang, Q., Deng, Y., Liu, K., Li, C. and Zheng, S. (2015). Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent. Environmental Science and Pollution Research, 22(18), 13970-13979.
- พัชรียา รุ่งกิจวัฒนานุกูล, 2553. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลาง : ผลของอัตราสารอินทรีย์. Thesis วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วนิดา ห่อคำ, 2554. การกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลาง. Thesis มหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศศิพงศ์ สุนทรเต็ม, 2555. การเตรียมวัสดุคอมโพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์ โพลีแลกติกแอซิด/

พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต. Thesisวิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวมัลลิกา พัวพวง
วัน เดือน ปี เกิด	5 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	ชัยภูมิ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	180/400 หมู่บ้านสินทรัพย์นคร ถนนพหลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสาย ไหม กรุงเทพฯ 10220



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY