ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ด
ของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง

นายธงชัย มหัจฉริยวงศ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF POLYMER ADDITION ON SLUDGE GRANULATION OF UASB SYSTEM IN TREATING HIGH STRENGTH WASTEWATER

Mr. Thongchai Mahajchariyawong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ด ของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง
โดย	นายธงชัย มหัจฉริยวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธงชัย มหัจฉริยวงศ์ : ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ดของระบบยูเอเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (EFFECT OF POLYMER ADDITION ON SLUDGE GRANULATION OF UASB SYSTEM IN TREATING HIGH STRENGTH WASTEWATER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 171 หน้า.

การศึกษาผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ดของระบบยูเอเอสบี โดยเป็นการศึกษาถึงความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Jar Test ซึ่งมีการศึกษาความเข้มข้นตั้งแต่ ไม่เติมโพลีเมอร์, เติมโพลีเมอร์ 1, 2, 4, 6 และ 8 มก./ก.เอสเอส หลังจากนั้นจะศึกษาถึงผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี ซึ่งเดินระบบโดยใช้ถังปฏิกรณ์ลักษณะเหมือนกันจำนวน 3 ถัง ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง โดยควบคุมให้มีการเติมปริมาณโพลีเมอร์โดยรวมในหนึ่งสัปดาห์เท่ากับถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่เติมแยกย่อยออกเป็นสองครั้ง ซึ่งการเติมโพลีเมอร์นั้นจะเติมในช่วงแรกของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ส่วนน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 2 - 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

การศึกษาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสมจากการทดลอง Jar Test นั้น พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีเมอร์เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส จึงเลือกใช้ค่าความเข้มข้นนี้ในการเดินระบบยูเอเอสบี สำหรับผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีนั้น พบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีความเสถียรของระบบมากที่สุด เนื่องจากการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 88 มก./ล. เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งเท่ากับ 456 มก./ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เท่ากับ 123 มก./ล. สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของทั้งสามถังปฏิกรณ์มีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จากการเดินระบบระยะยาวพบว่า เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีขนาด D_{50} ใหญ่ที่สุดเท่ากับ 177.4 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งเท่ากับ 140.3 ไมโครเมตร และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เท่ากับ 135.6 ไมโครเมตร และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีความหนาแน่นมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ และมีค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน (SMA) เท่ากับ 0.44 ก.ซีโอดี-มีเทน/ก.วีเอสเอส/วัน ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

ผลการทดลองสรุปได้ว่าการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบยูเอเอสบี เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งความถี่ที่เหมาะสมในการเติมโพลีเมอร์นั้น พบว่าการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยระบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรของระบบสูง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ธงชัย มหัจฉริยวงศ์
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

##4670319421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : UASB / ANAEROBIC TREATMENT / POLYMER / GRANULATION

THONGCHAI MAHAJCHARIYAWONG : EFFECT OF POLYMER ADDITION ON SLUDGE GRANULATION OF UASB SYSTEM IN TREATING HIGH STRENGTH WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 171 pp.

This research aims to study the effect of polymer addition on sludge granulation of UASB. The optimum polymer dosage was obtained from jar test experiment. The polymer concentrations employed in the experiment were 0, 1, 2, 4, 6 and 8 mg/g-SS respectively. The next experiment studied the polymer adding frequency which affects to the efficiency of the UASB system by operating with the same type of 3 reactors. The first reactor was not added with the polymer while the second and the third reactors were added with the polymer once and twice a week, respectively. The polymer dosage for the third reactor was controlled equally to the dosage used in the second reactor, but divided dosage into two times a week. All polymer addition was done during the start up period of the UASB system. The synthetic wastewater was used in the experiment with the organics loading rate in the range of 2-4 kg-COD/m^3/d.

The optimum of polymer dosage provided by the jar test method was 2 mg/g-SS, which was used for the UASB start up period. The polymer adding frequency which affects the efficiency of UASB system during the start up of the system indicates that the second reactor had the best performance due to less suspended solid wash out at 88 mg/l in comparison to the first and the third reactors at 456 and 123 mg/l, respectively. The COD treatment efficiencies for all reactors were higher than 90 percent. After a long term of operating, the D_{50} of the sludge granular of the second reactor was found the largest size at 177.4 μm in comparison to the first and the third reactors at 140.3 μm and 135.6 μm, respectively. In the mean time, the sludge granular in the second reactor was found the highest density, the SMA value was 0.44 g-COD methane/g-VSS/day at the organics loading rate of 4 kg-COD/m^3/d.

From the overall results, indicate that the polymer addition for start up of UASB system helps the sludge granular increase its size. The most promising for the polymer adding frequency in this research was once a week which enhanced the efficiency and stability of UASB operation.

Department Environmental Engineering .... Student's signature Thongchai Mahajchariyawong

Field of Study Environmental Engineering ...... Advisor's signature Chavalit RAtt

Academic year 2006 ....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุน ส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา ในโอกาสนี้คุณงามความดีที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้ท่านทั้งสอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ถ้าปราศจากบุคคลสำคัญ คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความกรุณาเสนอแนะหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ นอกจากนี้ยังได้ให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนให้เกิดความก้าวหน้าอย่างยิ่งในเชิงวิชาการและการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้พื้นที่และห้องปฏิบัติการในการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเห็นคุณค่าและสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท Dyna Fluid ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์โพลีเมอร์มาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และที่สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจให้มาตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฏ
สารบัญรูป.....ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 คำนำ.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ.....2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....3
2.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ.....4
2.2.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis).....5
2.2.2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis).....5
2.2.3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis).....6
2.2.4 กระบวนการสร้างมีเทน.....8
2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....8
2.3.1 แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic Bacteria).....8
2.3.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria).....9
2.3.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria).....10
2.3.4 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria).....11
2.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).....11
2.4.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี.....11
2.4.2 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี.....12
2.4.3 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....12
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....14
2.5.1 ปัจจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบ.....14
2.5.2 ปัจจัยเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมจุลินทรีย์.....15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.5.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นเดินระบบ…………………………..20
2.6 ข้อกำหนดและวิธีการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบี………………………………21
2..6.1 ปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์……………………………………………21
2.6.2 ค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์……………………21
2.6.3 การเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์…………………………………...21
2.6.4 การหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์………………………………………21
2.6.5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่นำมาบำบัด…………………22
2.6.6 สภาวะแวดล้อมของระบบ………………………………………………22
2.7 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์……………………………………………………………...22
2.7.1 ประเภทของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์………………………………………...22
2.7.2 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์………………………………………23
2.7.3 Extracellular Polymers………………………………………………...24
2.7.4 กระบวนการรวมเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์……………………………..25
2.7.5 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์………………………………………..28
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการยับยั้งการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์…………………………..28
2.9 Polymer………………………………………………………………………...29
2.10 การศึกษาที่ผ่านมา…………………………………………………………...32
2.10.1 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการยูเอเอสบี……………………......32
2.10.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนเม็ด…………………………33
บทที่ 3 การวางแผนการวิจัย…………………………………………………………38
3.1 แผนการวิจัย……………………………………………………………………38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง………………………………………39
3.2.1 ถังปฏิกิริยายูเอเอสบี……………………………………………………39
3.2.2 ถังพักน้ำเสีย……………………………………………………………39
3.2.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์…………………………………………39
3.2.4 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาณก๊าซ...39
3.3 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงานของระบบ……………………………..39
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์………………………………………………………42
3.4.1 สารอาหารหลัก…………………………………………………………..42
3.4.2 บัฟเฟอร์……………………………………………………………………42
3.4.3 สารอาหารเสริม…………………………………………………………..42

หน้า

3.5 ขั้นตอนและวิธีทดลอง……………………………………………………………...43
3.5.1 การศึกษาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test……..43
3.5.2 การศึกษาผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี……………………………………………………45
3.5.3 การศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี…………………………………………………...47
3.5.4 การศึกษาผลของการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบช่วง Post Test................48
3.6 การเดินระบบและการควบคุมระบบ……………………………………………..48
3.6.1 การเดินระบบ…………………………………………………………….48
3.6.2 การควบคุมระบบ……………………………………………………...…48
3.7 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง……………………………………………...50
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์……………………………………………………………51
4.1 การศึกษาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสม โดยวิธี Jar Test........................51
4.2 ผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี………...54
4.2.1 การกำจัดซีโอดี……………………………………………………....56
4.2.2 ของแข็งแขวนลอย……………………………………………………..60
4.2.3 ของแข็งแขวนลอยระเหย……………………………………………63
4.2.4 สภาพด่างทั้งหมด……………………………………………………66
4.2.5 กรดไขมันระเหย………………………………………………………68
4.2.6 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด………………………………71
4.2.7 พีเอช……………………………………………………………………...73
4.2.8 อุณหภูมิ…………………………………………………………………..76
4.3 ผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี……………77
4.3.1 การกำจัดซีโอดี…………………………………………………………...78
4.3.2 ของแข็งแขวนลอย……………………………………………………..79
4.3.3 ของแข็งแขวนลอยระเหย……………………………………………81
4.3.4 สภาพด่างทั้งหมด……………………………………………………82
4.3.5 กรดไขมันระเหย………………………………………………………84
4.3.6 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด………………………………86
4.3.7 พีเอช……………………………………………………………………...87
4.3.8 อุณหภูมิ…………………………………………………………….…...89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.4 ผลของการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบช่วง Post Test....90
4.5 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์....91
4.5.1 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์....91
4.5.2 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์....98
4.5.3 ความเร็วในการตกตะกอน....101
4.5.4 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน....102
4.6 การขยายตัวของชั้นตะกอน....103
4.6.1 เดินระบบระยะยาว....103
4.6.2 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม....107
4.6.3 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์....107
4.7 การกระจายตัวของมวลจุลินทรีย์ตามความสูงของถังปฏิกรณ์....109
4.8 ก๊าซชีวภาพ....110
4.8.1 เดินระบบระยะยาว....110
4.8.2 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม....111
4.9 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ....112
4.9.1 ของแข็งแขวนลอย....113
4.9.2 การขยายตัวของชั้นตะกอน....114
4.9.3 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์....115
4.10 การวิเคราะห์ผลของการเติมสารอาหารเสริมและโพลีเมอร์ช่วง Post Test....116
4.10.1 ของแข็งแขวนลอย....116
4.10.2 การขยายตัวของชั้นตะกอน....117
4.10.3 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์....118
4.11 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์....119
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....124
5.1 สรุปผลการทดลอง....124
5.2 ข้อเสนอแนะ....125
รายการอ้างอิง....126

หน้า

ภาคผนวก……………………………………………………………………………………131
ภาคผนวก ก ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย………………………………………...132
ภาคผนวก ข ข้อมูลขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์………………………………………151
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทำ Jar Test…………………………………………...…157
ภาคผนวก ง ข้อมูลการกระจายตัวของจุลินทรีย์ตามความสูงของถังปฏิกรณ์………...159
ภาคผนวก จ การหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เพื่อนำค่าไปใช้
ในการเติมโพลีเมอร์ช่วง Post Test…………………………………...…161
ภาคผนวก ฉ การหาค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน (SMA)……………...165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……………………………………………………………………171

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี……………………………………………...……12
ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก………………………………………17
ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ในการยับยั้งประสิทธิภาพ 50%..18
ตารางที่ 2.4 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ…………...19
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของสารอาหารทั้งหมด……………………………………………42
ตารางที่ 3.2 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1…………………...………...46
ตารางที่ 3.3 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2……………………………..46
ตารางที่ 3.4 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3……………………………..46
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์……...…50
ตารางที่ 4.1 การเติมโพลีเมอร์ (ช่วง Start Up ของการเดินระบบระยะยาว)…………………...55
ตารางที่ 4.2 การเติมสารอาหารเสริม (การเดินระบบช่วง Post Test)…………………………..77
ตารางที่ 4.3 การเติมโพลีเมอร์ (การเดินระบบช่วง Post Test)…………………..…………91
ตารางที่ 4.4 การหาค่าก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์…………………….....................122

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย……………………………………………………4
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ….7
รูปที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี……………………………………...13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์………………………………………..24
รูปที่ 2.5 บทบาทของประจุไฟฟ้า และ ECP ต่อการรวมตัวของจุลินทรีย์……………………25
รูปที่ 2.6 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Inert Nuclei Model……………………………………..27
รูปที่ 2.7 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Multi-Valence Positive Ion-Bonding Model……………...27
รูปที่ 2.8 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Polymer or Filament Bonding Model……………………..27
รูปที่ 2.9 โพลีเมอร์ชนิดต่างๆ………………………………………………………………30
รูปที่ 2.10 กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยโพลีเมอร์……………………………...31
รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินการวิจัย...38
รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ……………………………………………………………...40
รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งระบบยูเอเอสบี…………………………………………………41
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1………………………………………………...….44
รูปที่ 3.5 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์..47
รูปที่ 4.1 SV30 ที่ปริมาณโพลีเมอร์ต่างๆ……………………………………………………...52
รูปที่ 4.2 ความขุ่นที่ปริมาณโพลีเมอร์ต่างๆ……………………………………………..….52
รูปที่ 4.3 สภาพตะกอนจุลินทรีย์หลังจากทำ Jar Test………………………………………54
รูปที่ 4.4 การกำจัดซีโอดี (การเดินระบบระยะยาว)…………………………………………58
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (การเดินระบบระยะยาว)……………………………..59
รูปที่ 4.6 ของแข็งแขวนลอย (การเดินระบบระยะยาว)……………………………………..61
รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยระเหย (การเดินระบบระยะยาว)…………………………………64
รูปที่ 4.8 สภาพด่างทั้งหมด (การเดินระบบระยะยาว)……………………………………….67
รูปที่ 4.9 กรดไขมันระเหย (การเดินระบบระยะยาว)…………………………………………70
รูปที่ 4.10 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด (การเดินระบบระยะยาว)……………………73
รูปที่ 4.11 พีเอช (การเดินระบบระยะยาว)…………………………………………………...75
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิ (การเดินระบบระยะยาว)………………………………………………..76
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)……………………………79
รูปที่ 4.14 ของแข็งแขวนลอย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)………………………………………80
รูปที่ 4.15 ของแข็งแขวนลอยระเหย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)……………………….………82

หน้า

รูปที่ 4.16 สภาพด่างทั้งหมด (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)……………………………………..83
รูปที่ 4.17 กรดไขมันระเหย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)…………………………………………85
รูปที่ 4.18 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)……………………...87
รูปที่ 4.19 พีเอช (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)……………………………………………………..88
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิ (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)…………………………………………………89
รูปที่ 4.21 D_{50} ที่ระดับความสูงต่างๆจากก้นถังปฏิกรณ์ (ตลอดการเดินระบบ)…………………93
รูปที่ 4.22 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ตลอดการเดินระบบ)………………………………98
รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1 หลังการทดลอง………………………..99
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 2 หลังการทดลอง...................................99
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 3 หลังการทดลอง……………………..…100
รูปที่ 4.26 ความเร็วในการตกตะกอนของแต่ละถังปฏิกรณ์……………………………….101
รูปที่ 4.27 ค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน……………………………………..102
รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอน (การเดินระบบระยะยาว)………………………..105
รูปที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอน (วันที่ 107 ถึงวันที่ 165)…………………………108
รูปที่ 4.30 ความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี…………………………….....110
รูปที่ 4.31 ก๊าซชีวภาพ (การเดินระบบระยะยาว)…………………………………………..…111
รูปที่ 4.32 ก๊าซชีวภาพ (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)………………………………………………112
รูปที่ 4.33 ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)…………………………...113
รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ย (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)……………..114
รูปที่ 4.35 ขนาด D_{50} (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)…………………………………………115
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย………………………………………….116
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ย……………………………….117
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบขนาด D_{50} ……………………………………………………………118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

ปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบบำบัดยูเอเอสบี (UASB) มีการใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ สามารถลดพลังงานที่ต้องใช้ในการเติมออกซิเจนให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ สามารถได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลผลิตจากระบบ เป็นระบบที่สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading) ได้มาก ใช้เวลากักน้ำ (HRT) น้อย และยังมีโครงสร้างถังปฏิกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน จึงได้มีการพัฒนาระบบบำบัดแบบยูเอเอสบีอย่างต่อเนื่องโดยเน้นการสร้างระบบให้มีประสิทธิภาพสูงซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบคือ การสร้างตะกอนเม็ดในถังปฏิกรณ์ ลักษณะของน้ำเสียที่นำมาบำบัดและการเลือกตะกอนหัวเชื้อมาใช้สร้างตะกอนเม็ด

ตะกอนเม็ด (Granular Sludge) เป็นลักษณะเฉพาะตัวที่สำคัญของระบบบำบัดยูเอเอสบี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบอื่น โดยการสร้างตะกอนเม็ดที่ดีนั้นสามารถบอกได้ถึงประสิทธิภาพของการตะกอนของจุลินทรีย์ และอายุของจุลินทรีย์ในระบบ แสดงได้ว่าการพัฒนาตะกอนเม็ดนั้น มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของระบบบำบัดยูเอเอสบี

การสร้างตะกอนเม็ดยังคงเป็นปัญหาสำคัญประการแรก เนื่องการการสร้างตะกอนเม็ดนั้นใช้เวลานานหลายเดือน การลดเวลาในการสร้างตะกอนเม็ด การสร้างตะกอนเม็ดให้มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นนั้น เป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบบำบัดยูเอเอสบี

ในปัจจุบันได้มีการนำแร่ธาตุ สารเคมี และโพลีเมอร์หลายชนิดเติมลงในระบบบำบัดยูเอเอสบี เพื่อช่วยในสร้างตะกอนเม็ด แต่ความเข้มข้นและความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่เหมาะสมยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาในการสร้างตะกอนเม็ดให้มีประสิทธิภาพ โดยใช้โพลีเมอร์ประจุบวกชนิดหนึ่งช่วยในการสร้างตะกอนเม็ด โดยจะเป็นการศึกษาถึงความเข้มข้นและความถี่ที่เหมาะสมในการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบบำบัดยูเอเอสบี โดยน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบำบัดยูเอเอสบี ที่มีการเติมโพลีเมอร์ประจุบวกชนิด Praestol 852 BC ในการช่วยลดเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up)

2) เพื่อศึกษาถึงผลของความเข้มข้นและความถี่ที่เหมาะสมในการเติมโพลีเมอร์ ต่อการสร้างตะกอนเม็ดในระบบบำบัดยูเอเอสบีในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up)

3) เพื่อศึกษาถึงผลของการเดินระบบในระยะยาว ที่มีต่อการสร้างตะกอนเม็ดและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 2-4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

2) ระบบยูเอเอสบีที่ใช้เป็นระดับขนาดทดลองจำนวน 3 ชุดเหมือนกัน

3) ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง คือ ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่เติมลงในถังปฏิกรณ์ โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุดคือ

ชุดการทดลองที่ 1) ไม่เติมโพลีเมอร์

ชุดการทดลองที่ 2) ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ 1 ครั้งต่อสัปดาห์

ชุดการทดลองที่ 3) ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ 2 ครั้งต่อสัปดาห์

ทั้งนี้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่ใช้เติมลงในถังปฏิกรณ์ มาจากการทดลองแบบ Jar Test

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ

1) เพื่อทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างตะกอนเม็ด โดยใช้โพลีเมอร์ประจุบวกชนิด Praestol 852 BC ช่วยสร้าง ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up)

2) เพื่อทราบถึงความเข้มข้นและความถี่ ในการเติมโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในระบบบำบัดยูเอเอสบี

3) เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการบำบัดน้ำเสีย กับระบบบำบัดยูเอเอสบี

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatment System) หรือกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้ว จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิด มาช่วยกันย่อยสลายสารปนเปื้อน วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการทำให้สารปนเปื้อนในน้ำเสียและกากตะกอน เกิดการย่อยสลายจนได้สารที่คงที่และไม่ย่อยสลายต่อไป

การบำบัดแบบไร้อากาศที่ถูกนำมาใช้ตั้งแต่เมื่อ 50 ปีที่ผ่านมา คือการบำบัดน้ำเสียแบบ Septic Tank หรือที่รู้จักกันในชื่อของ บ่อเกรอะบ่อซึม ที่ใช้ตามบ้านเรือนที่อยู่อาศัยทั่วไป ที่มีปริมาณน้ำเสียหรือน้ำทิ้งไม่มากนัก เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือของเสียจากห้องน้ำห้องส้วม โดยบ่อเกรอะบ่อซึมจะเป็นที่กักเก็บของเสียนั้นในบ่อไว้ระยะหนึ่ง เพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายของเสียนั้นๆ จากนั้นจะมีการปล่อยน้ำใสไหลออกไปตามท่อที่แทรกอยู่ในชั้นดิน และปล่อยออกมาสู่ดิน ในหลักการก็คือจุลินทรีย์ในดินก็จะเป็นตัวที่ช่วย ย่อยสลายสารปนเปื้อนที่ยังอาจจะก่อให้เกิดโทษต่อคนและระบบนิเวศต่อไป ก่อนที่จะแพร่ไปสู่สภาพแวดล้อมอื่น อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจจะมีปัญหาในบริเวณที่มีดินประเภทดินเหนียว เพราะจะไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านดิน แต่จะทำให้น้ำไหลเอ่อขึ้นมาที่ผิวดิน และถูกชะล้างลงท่อระบายน้ำหรือไหลไปยังบริเวณอื่นๆ ที่ใกล้เคียงเมื่อเกิดฝนตก ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบของการปนเปื้อนของเสียและจุลินทรีย์ก่อโรค ในระบบนิเวศและมนุษย์ในบริเวณนั้นได้

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในโรงงานอุตสาหกรรม ได้เริ่มใช้ในปี ค.ศ. 1950 การบำบัดแบบไร้อากาศ ได้รับความนิยมมากขึ้นในประเทศต่างๆ หลังจากที่เกิดวิกฤติการณ์ของพลังงานในปี พ.ศ. 2516 หรือ ค.ศ. 1973 เพราะระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เป็นระบบที่ใช้พลังงานน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้อากาศ รวมทั้งยังได้พลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพจากระบบเหล่านี้ ในประเทศอังกฤษมีการใช้ระบบแบบนี้ประมาณครึ่งหนึ่ง ของการบำบัดน้ำเสียทั้งหมดมานานแล้ว (Van Haandel และ Lettinga, 1994) ในสมัยก่อนระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศต้องการน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูง แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบบำบัด ให้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ เหมือนกับระบบบำบัดที่ใช้อากาศได้

ข้อดีของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ สามารถประมวลได้ดังนี้

1) เป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้ก๊าซออกซิเจน ซึ่งการใช้ก๊าซออกซิเจนทำให้มีค่าใช้จ่ายในปริมาณสูง แต่กระบวนการนี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งพบได้ในสิ่งแวดล้อมทุกระบบ

2) เป็นกระบวนการที่ผลิตกากตะกอนหรือเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดใหม่ ในปริมาณที่น้อยกว่ากระบวนการแบบใช้อากาศ ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน

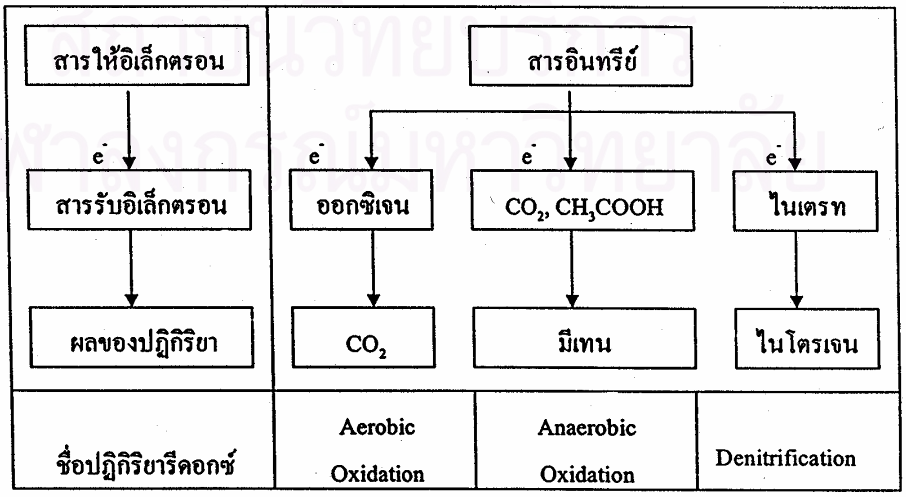
3) กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศจะผลิตก๊าซที่มีประโยชน์ คือก๊าซมีเทน ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

4) เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ปนเปื้อนปริมาณสูง

5) เป็นระบบที่สามารถรับการเติมสารปนเปื้อน ที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงได้

2.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

ปฏิกิริยาทั่วไปในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป มีพื้นฐานเดียวกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบ ออกซิเดชั่น – รีดักชั่น หรือ รีดอกซ์ ซึ่งมีลักษณะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน ทั้งนี้พลังงานเคมีเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ในการดำรงชีวิต แหล่งพลังงานเคมีคือสารอินทรีย์ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชั่น – รีดักชั่น สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพราะมีพลังงานในตัวสูง และสารอื่นๆในน้ำเสียจะเป็นสารรับอิเล็กตรอน โดยถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนปฏิกิริยาจะเป็นแบบใช้อากาศ แต่ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นสารอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต หรือ ซัลเฟต ปฏิกิริยาจะเป็นแบบไร้อากาศ โดยปฏิกิริยารีดอกซ์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542)

กระบวนการแบบไร้อากาศเป็นระบบที่ซับซ้อน มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่รวมกันหลายกลุ่ม ความสัมพันธ์ของจุลินทรีย์มีทั้งแบบแข่งขันกันและพึ่งพาอาศัยกัน สารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนรูปเนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หลายกลุ่มต่อกัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งเป็นการพึ่งพาอาศัยกัน แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เกิดมีจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่สามารถใช้ได้เหมือนกัน ก็จะมีความสัมพันธ์แบบแข่งขันกัน จุลชีพที่อาศัยอยู่รวมกันนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ และเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปต่างๆ เช่น มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แต่สารอินทรีย์ในระบบจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มใด ขึ้นกับปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมของระบบ รูปที่ 2.2 แสดงลำดับขั้นตอนของปฏิกิริยาชีวเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยกระบวนการแบบไร้อากาศจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิเตท (Acetogenesis)

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

2.2.1 กระบวนการไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้เป็นการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์จุลินทรีย์จำพวกสร้างกรด โดยอาศัยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ชนิดดังกล่าวปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลาย

การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะเกิดค่อนข้างช้า เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ค่าพีเอช ระยะเวลากักเซลล์ และอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของสารอินทรีย์ โดยถ้าสารอินทรีย์ชนิดนั้นมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรต่ำ จะต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าจะได้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ดังนั้นจึงพบว่าการย่อยสลายแป้ง โปรตีน และเซลลูโลสจะต้องใช้ระยะเวลาแตกต่างกันไป อันเนื่องมาจากเหตุผลดังกล่าว

2.2.2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้ผลผลิตของขั้นตอนไฮโดรไลซีส จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นอาหาร และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น อะซิติก (CH_3COOH) โพรไพโอนิก (CH_3CH_2COOH) และบิวทิริก ($CH_3CH_2CH_2COOH$) เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย

ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารอาหาร และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน

ภายใต้ความดันพาเชียลของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดโพรพิโอนิกและบิวทิริกภายใต้สภาวะความดันพาเชียลของไฮโดรเจนสูง

ขณะที่น้ำตาลจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านวิธี Emden - Meyerhof pathway ที่ภายใต้สภาวะ ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

แต่จะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริกไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

2.2.3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

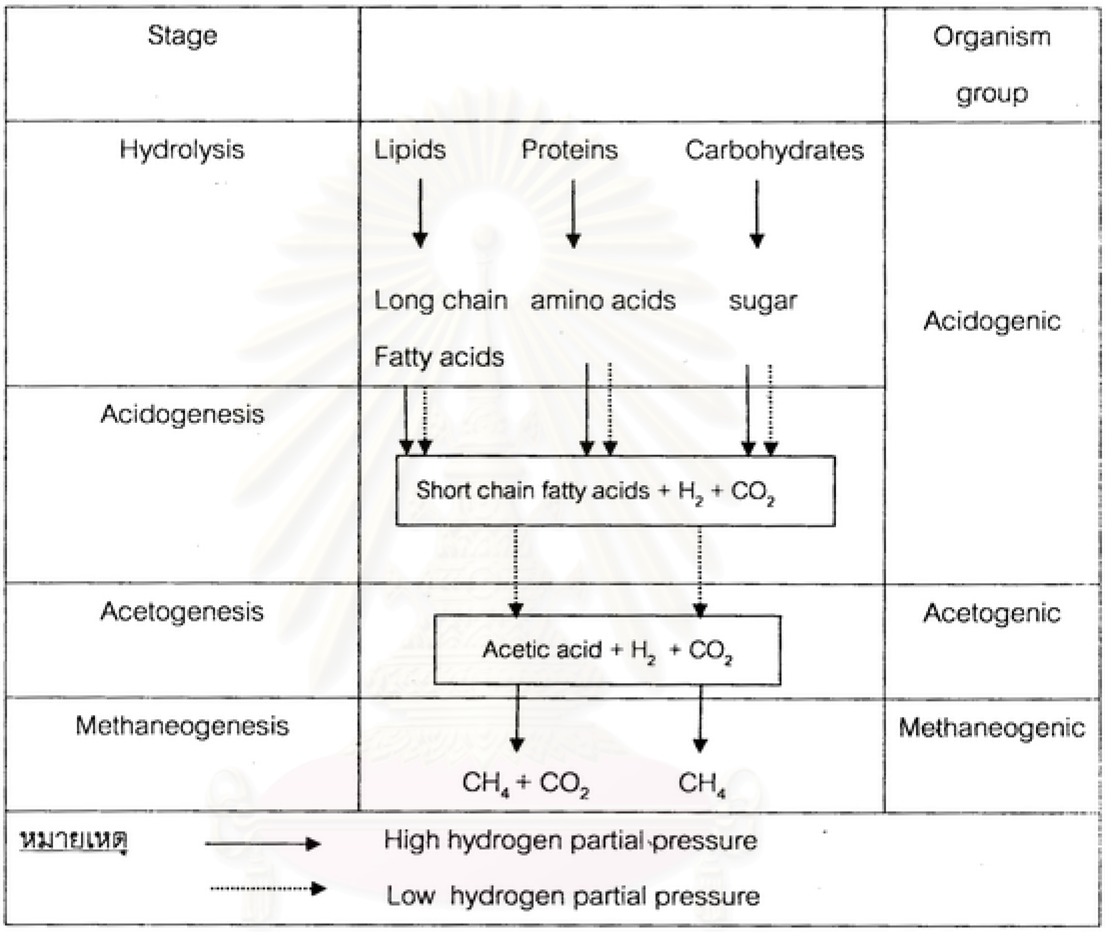
ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างอะซิติกจะมีบทบาทสำคัญ ในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทธานอล และเมทธิลามีน กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่อาจใช้เป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้ แบคทีเรียสร้างอะซิติกมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหย ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพรไพโอนิก สามารถกระทำได้ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกว่า $2x10^{-3}$ บรรยากาศ และต่ำกว่า $9x10^{-3}$ บรรยากาศ ตามลำดับ สมดุลเคมีแสดงดังสมการ

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3\ H_2$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2\ H_2$$

ขั้นตอนนี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะสภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยจะไม่สามารถถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Sam-soon และคณะ, 1987)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 กระบวนการสร้างมีเทน

ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้าย ที่มีความสำคัญในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลาย ก๊าซไฮโดรเจน ให้ไปอยู่ในรูปก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยบทบาทของแบคทีเรียผลิตมีเทน ซึ่งที่ความเฉพาะเจาะจงในชนิดสารอาหารที่จะนำมาใช้ได้ โดยชนิดของสารอาหารจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.2.4.1 กลุ่มคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 – type substrate)

สำหรับปฏิกิริยาสร้างมีเทนที่เกิดจากสารอาหารกลุ่มคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนใหญ่จะมีก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า hydrogenotrophic reactions และเรียกแบคทีเรียที่ใช้สารอาหารกลุ่มนี้ว่า hydrogenotrophic methanogens หรือ hydrogen utilizers โดยประมาณว่าร้อยละ 30 ของก๊าซมีเทน จะถูกสร้างขึ้นโดยผ่านทาง Hydrogenotrophic reactions

2.2.4.2 กลุ่มสารประกอบที่มีกลุ่มเมทิล ($-CH_3$) (Methyl substrates)

ก๊าซมีเทนที่ได้จากสารอาหารประเภทนี้ จะสร้างจากกลุ่มเมทิลในสารอาหาร ปฏิกิริยาเหล่านี้ บางโมเลกุลของสารตั้งต้นจะเป็นสารให้อิเล็กตรอน และถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่บางโมเลกุลจะถูกรีดิวซ์และใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอน

2.2.4.3 กรดอะซิติก (Acetoclastic substrates)

ก๊าซมีเทนจากสารอาหารประเภทนี้ จะสร้างจากกลุ่มเมทิลในโมเลกุลของกรดอะซิติก เช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า Acetoclastic reaction เป็นการแยกกรด (cleavage) กรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะผลิตมีเทนในระบบถึงร้อยละ 70 ของมีเทนทั้งหมด โดยเรียกแบคทีเรียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารว่า acetoclastic methanogens

2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

2.3.1 แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic Bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดของกระบวนการแบบไร้อากาศ กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียพวก obligate anaerobes มากกว่าพวก facultative ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียพวกแรกมีมากกว่า แบคทีเรีย obligate anaerobes ที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือกลุ่ม Clostridium แบคทีเรียกลุ่มนี้มีเมตาบอริซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวก polysaccharides หรือโปรตีนได้

ผลปฏิกิริยาที่ได้จึงมีหลายชนิดต่างๆไป นอกจากแบคทีเรียในกลุ่ม Propionibacteria ที่ผลิตกรดโพรไพโอนิก และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก

2.3.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

2.3.2.1 Homoacetogenic Bacteria

เป็นแบคทีเรียที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา ผ่านวิธีที่เรียกว่า Acetyl – CoA pathway แบคทีเรียชนิดนี้ เช่น Acetobacteria Woodii และ Clostridium Aceticum สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโทโทรปิก (Autotrophic) คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก อีกทั้งเจริญเติบโตแบบเฮเทอโรโทรปิก (Heterotrophic) ก็ได้ โดยการหมักน้ำตาลดังสมการข้างล่าง

$$2CO_2 + 4H_2 \xrightarrow{\text{Autotrophic bacteria}} CH_3COOH + 2H_2O$$

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Heterotrophic bacteria}} 3CH_3COOH$$

จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียพวก Clostridium มีอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดทั่วไป (Acedogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียกลุ่มนี้มีเมตาบอริซึมหลายแบบ

2.3.2.2 H_2 – producing Bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหยที่ไม่ใช่กรดอะซิติก หรือ แอลกอฮอล์ เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนขึ้นมา ซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ดี แบคทีเรียชนิดนี้จะเจริญเติบโตไม่ดีเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา ถ้าสะสมจะทำให้มีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนสูง ทำให้ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกนี้จะลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่สามารถเจริญได้ดีถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนก็จะช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

แบคทีเรียชนิดนี้จะอยู่ในกลุ่ม Synthrophomonus และกลุ่ม Synthrophobacter โดยแบคทีเรีย Synthrophomonus Wolfei จะช่วยย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรีย

Synthrophomonas Wolinii จะย่อยกรดโพรไพโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

2.3.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria)

แบคทีเรียสร้างทีเทนไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรป ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เป็นสารอาหารของแบคทีเรียไม่กี่ชนิดเท่านั้น

ในขั้นตอนนี้ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนต้องอาศัยแบคทีเรีย 2 ประเภท โดยแบคทีเรียเหล่านี้สามารถเจริญได้ดีในช่วงพีเอชแคบๆเท่านั้น (ประมาณ 6.8 – 7.2) และอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญของแบคทีเรียสร้างมีเทน จะอยู่ในช่วง 30 – 35 องศาเซลเซียส

2.3.3.1 Hydrogenotrophic Methanogen Bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้สามารถสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 32.4 \text{ kcal}$$

แบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้ ทั้งนี้เนื่องจากกรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้ง่าย

$$HCOOH \longrightarrow CO_2 + H_2$$

ปฏิกิริยาดังกล่าวมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างเร็ว ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 6 ชั่วโมง และเป็นการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนออกจากระบบ ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานของ Acidogenic Bacteria ในขั้นตอนการสร้างกรดอีกทางหนึ่งด้วย

2.3.3.2 Acetoclastic Methanogen Bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก โดยใช้กรดอะซิติกเป็นทั้งแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 + 6.71 \text{ kcal}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า พลังงานที่ได้มีค่าไม่เพียงพอในการดำรงชีวิตของเซลล์ การเปลี่ยนกรดอะซิติกให้เป็นมีเทน อาจเกิดขึ้นได้โดยแบคทีเรียใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน วิธีการสร้างพลังงานแบบนี้เรียกว่า Chemosmosis

$$CH_3COOH + 4H_2 \longrightarrow 2CH_4 + 2H_2O + 39.01 \text{ kcal}$$

ปฏิกิริยานี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 – 3 วัน แต่เป็นปฏิกิริยาที่มีความสำคัญในการสร้างมีเทน

2.3.4 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria)

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดในธรรมชาติทั่วๆไป ไม่ว่าจะเป็นพืชชั้นสูง สาหร่าย รา และเซลล์ของพวกโปรคาริโอตหลายชนิด สามารถใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์ แต่ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน จำกัดอยู่แต่ในแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียไม่ใช้อากาศจัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรป ดำรงชีพและเจริญเติบโต โดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมี ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการรีดิวซ์ซัลเฟต ทำให้ซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต จะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ในการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนโมเลกุลหรือสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ในกรณีที่สารให้อิเล็กตรอนคือไฮโดรเจนโมเลกุลหรืออะซิเตต ขั้นตอนดังกล่าวนี้จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ เช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนตามปกติ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่มีซัลเฟต จึงมักพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนเสมอ

2.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

2.4.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

โครงการพัฒนาถังปฏิกิริยาแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เริ่มต้นในปี 1970 โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ ซึ่งดำเนินการวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ Centrale Suiker Maat-chappij (CSM) และมหาวิทยาลัย Delft University of Technology รวมถึงมหาวิทยาลัย Wageningen และ Amsterdam ผลการวิจัยและพัฒนาในช่วงปี 1974 และ 1977 นำมาซึ่งการเริ่มต้นก่อสร้างถังปฏิกิริยาในขั้นโรงงานต้นแบบ และในปี 1978 ถังปฏิกิริยายูเอเอสบี ก็เริ่มถูกนำไปใช้ในเชิงพานิชย์ โดยถูกใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียโรงงาน

น้ำตาล ซึ่งมีประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 88 ที่อัตราการรับภาระ 16.25 กก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน ปัจจุบันถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก

2.4.2 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบีได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสภาวะความขาดแคลนพลังงาน ในปัจจุบันทวีความรุนแรงขึ้น รวมทั้งมีการแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น พวก Methanogens ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวกไร้อากาศมากขึ้น การใช้ระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อดีข้อเสียดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

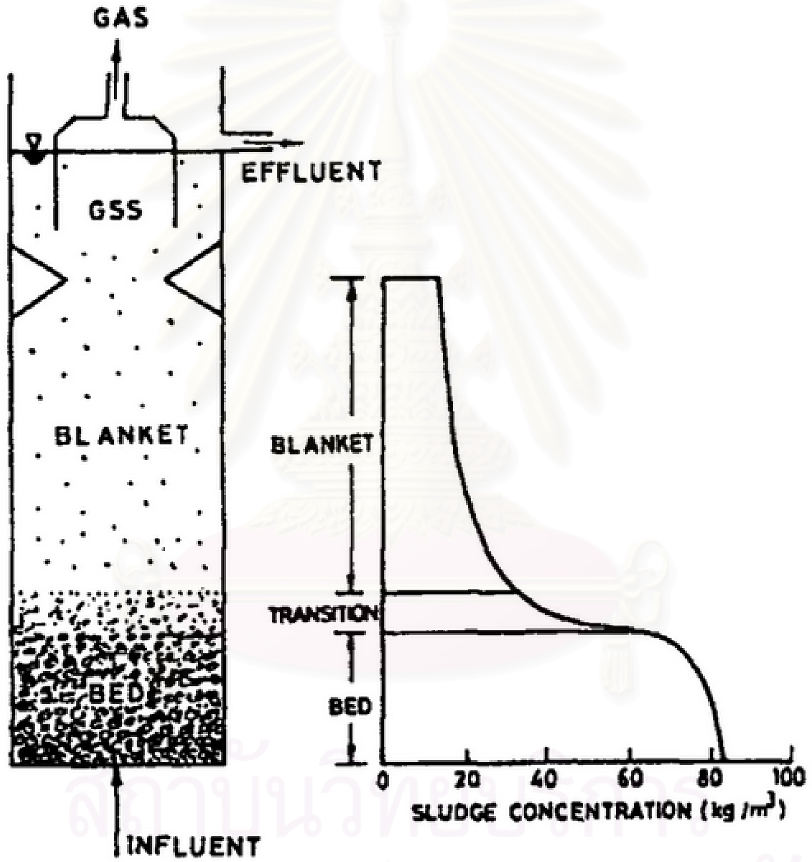
ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีความต้องการพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศ	1. ต้องมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวน
2. ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง	2. ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด มิฉะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ
3. เกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อย	3. ต้องพยายามรักษาตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และควบคุมการล้างออก
4. สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงขึ้น	4. ต้องใช้เวลาในการ start - up ระบบ ค่อนข้างนาน
5. ผลผลิตที่ได้คือ ก๊าซชีวภาพ (ก๊าซมีเทน) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้	5. แบคทีเรียโดยเฉพาะพวกผลิตมีเทน มีความสามารถเจริญเติบโตได้ดี ในช่วงสภาวะเหมาะสมที่แคบ เช่นพีเอชประมาณ 6.8 - 7.2

2.4.3 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบการทำงานแบบยูเอเอสบี เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการฉีดน้ำเสียจากด้านล่างสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยไม่ต้องมีสารตัวกลางหรือวัสดุอื่นใดมาช่วยในการพยุงมวลจุลินทรีย์ และลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม หรือทรงกระบอกก็ได้ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.3 คือ

1) ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมด้วยระบบป้อนน้ำเสีย (Feed Inlet System) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา

2) ส่วนที่แยกน้ำ, ก๊าซ และตะกอนแขวนลอย ซึ่งอยู่ส่วนบนของถังหมัก โดยมีอุปกรณ์แยกก๊าซ, น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ออกจากกัน ประกอบด้วยแผ่นเอียงทำมุมประมาณ 45 – 60 องศา นอกจากนี้ยังช่วยในการป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจาย โดยก๊าซชีวภาพหลุดออกไปจากถังหมัก ในการทำงานของระบบยูเอเอสบี จะมีการเติมเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่น และรวมเป็นเม็ดตะกอน ทำให้มีความเร็วในการจมตัวลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์สูง รวมเป็นชั้นที่เรียกว่า Sludge Bed ส่วนกลุ่มที่ความหนาแน่นต่ำ และมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่า จะลอยอยู่เป็นชั้นของตะกอนแขวนลอย เรียกว่า Sludge Blanket



รูปที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี (Narnoli และ Mehrotra, 1997)

เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดเซลล์และก๊าซขึ้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้น(ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์) และความเร็วของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ลอยสู่ด้านบน ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนแขวนลอย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อน้ำเสียเคลื่อนที่จนถึงส่วนบนของถัง ซึ่งมีอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสีย และตะกอนแขวนลอย ทำให้ก๊าซที่

เกิดขึ้นถูกแยกเก็บไปยังส่วนบน และไหลไปตามท่อสู่ที่เก็บก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์จะตกลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะไหลออกทางด้านบน

จะเห็นได้ว่า ปัจจัยสำคัญของระบบยูเอเอสบี คือ การเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะเป็นเกล็ดหรือเม็ด ซึ่งมีความหนาแน่น และน้ำหนักมาก เพื่อที่จะตกตะกอนได้ดี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของระบบนี้ เพราะถ้าไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอน จะทำให้เกิดการหลุดออก (Wash Out) ของตะกอนจุลินทรีย์ได้ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรืออาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้การป้องกันน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดเป็นช่อง (Channeling) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะมิฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบลดลงได้

วัตถุประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์แยก 3 สถานะ คือ ก๊าซ, น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ (GSS Device) สำหรับระบบยูเอเอสบีโดย Lettinga และ Hulshoff Pol (1991) มีดังนี้

1) เพื่อแยก และนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกรณ์

2) เพื่อป้องกันการหลุดออก (Wash Out) ของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น

3) เพื่อให้สลัดจ์ตกตะกอนกลับไปด้านล่างของถังปฏิกรณ์

4) เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket) ขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็วเข้าไปในส่วนตกตะกอน

5) เพื่อเป็นการทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพที่ดี

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

2.5.1 ปัจจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบ

1) อัตราการรับสารอินทรีย์ 10 – 20 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ 30°C และมากกว่านี้ เมื่อระบบอยู่ในระยะช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิค

2) ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 – 100000 มก.ซีโอดี/ลิตร

3) การกวนผสมต้องมีอัตราการผลิตก๊าซ 60 ลบ.ม./วัน-ตร.ม. จึงจะพอเพียงสำหรับการกวนผสมตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสูง 2 – 3 เมตร และควรมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า 2 ลบ.ม./ชม. ความสูงเหนือตะกอนจุลินทรีย์จนถึงใต้ส่วนแยกสามสถานะ ควรมีพื้นที่ว่างสูงมากกว่า 1 เมตร

4) ควรมีการฉีดพ่น 1 หัวฉีดต่อ 5 ตารางเมตรของพื้นที่ก้นถัง

5) ความสูงของถังหมักที่เหมาะสม คือ 4 – 6 เมตร

6) ส่วนตกตะกอนต้องมีประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 99% ผนังจึงต้องการความลาดเอียง 50 องศา เพื่อควบคุมตะกอนจุลินทรีย์ให้ไหลย้อนกลับ

7) Gas Collector ต้องสามารถเก็บรักษาก๊าซ ป้องกันการหนีในช่วงแยกตัวจากตะกอนจุลินทรีย์ได้ดี

8) การแยกจุลินทรีย์ที่สร้างกรด และจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนออกจากกัน เป็นสิ่งที่เหมาะสม

2.5.2 ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมจุลินทรีย์

2.5.2.1 อุณหภูมิ

ระบบยูเอเอสบีสามารถแบ่งช่วงการทำงานในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 3 ช่วง คือ

1) ช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) ช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50 – 65 องศาเซลเซียส

2) ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิค (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20 – 45 องศาเซลเซียส

3) ช่วงการทำงานของไซโคฟิลิค (Phychrophilic) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิค จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิค แต่นิยมให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิคในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เนื่องจากพบว่าพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ส่วนช่วงไซโคฟิลิค ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยมากและในส่วนของการย่อยสลาย (Hydrolysis) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด

2.5.2.2 พีเอช, สภาพความเป็นด่าง, กรดอินทรีย์ระเหย

ค่าของพีเอช, สภาพความเป็นด่างและ กรดอินทรีย์ระเหย มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 6.5 – 7.5 ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบคทีเรียชนิดที่สร้างกรดมักสามารถปรับตัวในช่วงพีเอชกว้างกว่าคือประมาณ 5 – 8.5 ดังนั้น ค่าพีเอชจึงมีความสำคัญต่อแบคทีเรียผลิตมีเทนมากกว่า กรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตโดยพวกแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acidogenesis) ปกติควรมีค่าอยู่ในระบบประมาณ 200- 400 มิลลิกรัม/ลิตร สภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต จะเป็นตัวแสดงให้

ทราบถึงกำลังของบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ของระบบ ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำไม่เพียงพอ ปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสภาพดังกล่าวของระบบจะไม่เกิดขึ้น ถ้ามีกำลังของบัฟเฟอร์มากพอ โดยทั่วไปในการบำบัดแบบไร้อากาศควรจะมีค่าสภาพความเป็นด่าง ประมาณ 2000 – 5000 มก./ล. และอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. ของกรดอะซิติก) ต่อสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (มก./ล. ของแคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งเป็นการแสดงค่ากำลังของบัฟเฟอร์ทางหนึ่ง โดยถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์ต่ำอาจทำให้ระบบ มีประสิทธิภาพลดลงได้

สารเคมีที่ใช้ในการควบคุมพีเอช ได้แก่ การเติมไบคาร์บอเนต หรือคาร์บอเนตให้แก่ระบบ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เติมให้ระบบ เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี เป็นการเติมไบคาร์บอเนตให้แก่ระบบโดยตรง แต่ราคาจะสูงกว่าสารอื่น

2.5.2.3 สารอาหารเสริม (Nutrient)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้อากาศ มีข้อดีอย่างหนึ่ง คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมาน้อยกว่าแบบใช้อากาศ ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำกว่า McCarty(1964) กล่าวว่า จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD:N:P = 100:1.1:0.2 ในปัจจุบันพบว่าแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ต้องการธาตุอาหารบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ มิฉะนั้นระบบไม่อาจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดีซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆ ตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ เช่น เหล็กรวมกับซัลไฟด์เป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยเติม Yeast Extract ให้แก่ระบบโดยตรง

2.5.2.4 ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation – Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเป็นผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (ให้อิเล็กตรอน) และปฏิกิริยารีดักชั่น(รับอิเล็กตรอน) ความสามารถในการให้ และรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสอง อาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชั่น – รีดักชั่น โพเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆว่า โออาร์พี (ORP)

2.5.2.5 สารพิษ (Toxic Substance)

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ เพราะจะไปรบกวนการทำงานของแบคทีเรียในระบบ หรือยังยั้งการเจริญเติบโต โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ ความรุนแรงของพิษย่อมขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆด้วย สารที่เป็นพิษต่อระบบ ได้แก่

2.5.2.5.1 พิษของอิออนบวกและโลหะหนัก

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ได้แก่ โซเดียม (Na^{+}) โปตัสเซียม (K^{+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้โดยปกติในระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะ จะเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินความจำเป็น จะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ปกติอิออนที่มีวาเลนซีสูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวก ที่มีวาเลนซีต่ำ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก (McCarty, 1964)

ชนิดอิออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยังยั้งมาก
Na^{+}	100 -200	3500 - 5500	8000
K^{+}	200 - 400	2500 - 4500	12000
Ca^{2+}	100 - 200	2500 -4500	8000
Mg^{2+}	75 - 150	1000 -1500	3000

พิษของอิออน สามารถลดความเป็นพิษลงได้ (Antagonism) เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na+ มีความเข้มข้น 3500 มก./ล. สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้ามี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมอยู่ระหว่าง 50 – 1000 มก./ล. แต่ในทางตรงกันข้ามอิออนบางชนิด จะไปเพิ่มความเป็นพิษให้มากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน (Synergism)

การยับยั้งจากโลหะหนัก (Heavy Metal) มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ Mosey และ Hughes (1975) ศึกษาพบว่า Cu^{2+} มีผลต่อระบบมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของซัลไฟด์พอเหมาะเพราะว่าซัลไฟด์ สามารถรวมกับโลหะหนักเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ดีโลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับแบคทีเรีย แม้จะในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ในการยับยั้งประสิทธิภาพ 50% (Mosey และ Hughes, 1975)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Fe^{+}	1 – 10
Zn^{2+}	10^{-4}
Cd^{2+}	10^{-7}
Cu^{+}	10^{-12}
Cu^{2+}	10^{-16}

2.5.2.5.2 พิษของกรดอินทรีย์ระเหย

กรดอินทรีย์ระเหยถ้าถูกสร้างขึ้นมามากเกินไป เช่น ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ หรืออาหารเข้ามามาก แบคทีเรียที่ผลิตกรดจะผลิตกรดอินทรีย์ระเหยออกมามาก หากว่าระบบมีกำลังของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดผลิตมีเทนได้

2.5.2.5.3 พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียของระบบไร้อากาศ มาจากการย่อยสลายพวกโปรตีน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^{+}) และแอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการ

$$NH_4^{+} \longleftrightarrow NH_3 + H^{+}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยปริมาณของแอมโมเนียมอิออนนี้ ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ที่พีเอชประมาณ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1% ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมอิออน 99% แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะไปทางขวามือมากขึ้น ทำให้เกิดแอมโมเนียมาก ซึ่งแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมอิออน โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียคือมากกว่า 150 มก./ล. ดังนั้นการรักษาพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่า จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน ซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า ตารางที่ 2.4 แสดงผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งรวมทั้งแอมโมเนียและแอมโมเนียมอิออน ต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 2.4 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Kugelman และ McCarty, 1965)

แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)	ผลต่อระบบ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 – 1000	ยังไม่เกิดผลชัด
1500 – 3000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูง
> 3000	เป็นพิษโดยตรง

2.5.2.6 ผลของซัลเฟต

การที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมาก จะทำให้มีแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้ โดยกลุ่มของ Sulfate – Reducing Bacteria (SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculum จะสามารถใช้ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายได้ โดยซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการ

$$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+ \longrightarrow HS^- + 4H_2O \qquad \Delta G' = -152.2 \text{ KJ/mol}$$

โดยแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะแย่งอาหารอาหารกันกับพวกผลิตมีเทน (Methanogenic Bacteria) โดยสามารถใช้อะซิเตท และไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร และจากค่า $\Delta G'$ แสดงให้เห็นว่า สามารถชนะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนได้ ทำให้ผลผลิตที่เป็นก๊าซมีเทนลดน้อยลง นอกจากนี้การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ถ้ามีปริมาณมากเกินไป อย่างไรก็

ตาม ถ้าจะพิจารณาในแง่การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารของแบคทีเรียที่ รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะทำงานสัมพันธ์กันกับแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน โดยจะช่วยทำให้ Hydrogen Partial Pressure มีค่าต่ำเสมอ ทำให้เป็นการลดการสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนทางหนึ่ง ดังนั้น แบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟตได้จึงมีบทบาทต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และมีผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติกจากกรดโพรไพออนิกด้วย

2.5.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นเดินระบบ

1) ขั้นตอนในการเพิ่มอัตราการรับสารอินทรีย์ ถ้าไม่เหมาะสมอาจเกิดสภาพ Over Load ซึ่งจะเกิดการสูญเสียตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ

2) ระยะเวลาเก็บกักของตะกอนจุลินทรีย์ที่ยาวนาน เป็นการแสดงถึงความสามารถในการตกตะกอน ความเข้มข้นและชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ที่ดี ซึ่งระยะเวลาเก็บกักของตะกอนจุลินทรีย์เป็นดัชนีที่ดีที่สุด ในการควบคุมการเดินระบบกำจัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะเป็นการป้องกันความล้มเหลวที่เกิดจากการสูญเสียตะกอนจุลินทรีย์ออกจากระบบ จึงต้องให้มีระยะเวลาเก็บกักของตะกอนจุลินทรีย์ ยาวนานกว่าระยะเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้น 1 เท่าตัว

3) ระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียจะสัมพันธ์กับขนาดของถังหมัก และอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ยังมีผลต่อระยะเวลาเก็บกักของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี แต่ถ้าหากตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ มีความสามารถในการตกตะกอนสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะขึ้นกับระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในระบบ

4) การกวนผสมและอัตราการไหลของน้ำเสีย จะมีผลต่อการสัมผัสกันของอาหารกับตะกอนจุลินทรีย์ ในระบบยูเอเอสบีการกวนผสมจะขึ้นกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบที่ส่วนล่างของถังหมัก ทำให้สามารถแบ่งพื้นที่ของถังหมักตามการกวนผสมได้เป็น 3 ส่วน คือ ชั้นตะกอนล่าง, ชั้นตะกอนลอย และชั้นตะกอนหนัก ในชั้นตะกอนล่างจะมีการกวนผสม 2 อย่าง คือ แบบที่กระแสน้ำผ่าน และแบบมีการไหลย้อนกลับ ส่วนในชั้นตะกอนลอยจะมีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ และในชั้นตะกอนหนักจะมีการไหลแบบราบเรียบไปทางเดียว (Plug Flow)

5) แนวทางในการเริ่มต้นเดินระบบที่ถูกต้อง จะทำให้การเริ่มต้นเดินระบบประสบความสำเร็จในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

2.6 ข้อกำหนดและวิธีการเริ่นต้นเดินระบบยูเอเอสบี

ข้อกำหนดที่มีความสำคัญที่สุดในการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีคือ จำเป็นต้องเพาะเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดขึ้นมาให้ได้เสียก่อน (Hulshoff Pol และคณะ, 1983a) โดยข้อกำหนดและวิธีการมีดังนี้

2.6.1 ปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์

ปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ ต้องมีความเหมาะสมกับขนาดของระบบยูเอเอสบี สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่เป็นพวก thick type (>40 กก./ลบ.ม.) ค่าที่เหมาะสมคือ 12 – 15 กก.วีเอสเอส/ลบ.ม. ของถังหมัก สำหรับอุณหภูมิระยะมีโซฟิลิค แต่โดยทั่วไปแล้วตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้จะเท่ากับ 10 – 15 กก.วีเอสเอส/ลบ.ม.ของถังหมัก

2.6.2 ค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ขณะเริ่มต้นเดินระบบควรเลือกตะกอนจุนทรีย์ที่มี ค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนต่ำมาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ ค่าความสามารถจำเพาะที่เหมาะสมคือ 0.05 – 0.1 กก.ซีโอดี/กก.วีเอสเอส/วัน โดยทั่วไปแล้วจะเริ่มต้นที่ 0.05 กก.ซีโอดี/กก.วีเอสเอส/วัน

2.6.3 การเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ในการพิจารณาเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในแต่ละช่วง ให้ถือหลักเกณฑ์ดังนี้คือ จะต้องมีการย่อยสลายกรดไขมันระเหยและกำจัดซีโอดี ได้ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป ซึ่งจะอยู่ในช่วง steady stage ของแต่ละช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ จึงจะพิจารณาเพิ่มได้

2.6.4 การหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์

ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ พบว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักเบาจะหลุดออกมากับน้ำทิ้งจากระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องปกติ เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่ลอยออกมานี้เป็นตะกอนที่มีน้ำหนักเบา มีความเร็วในการจมตัวของตะกอนที่ต่ำ ตะกอนพวกนี้จะหลุดออกไปตลอดเวลา จนเหลือแต่ตะกอนที่มีความเร็วในการจมตัวสูง ซึ่งจะพัฒนาไปเป็น ตะกอนจุนทรีย์ลักษณะเม็ดต่อไป

2.6.5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่นำมาบำบัด

เพื่อให้กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี ควรมีความเข้มข้นต่ำ หรือ ปานกลาง (Low or Medium Waste Strength) โดยทั่วไปแล้ว ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นที่สูง จำเป็นที่จะต้องนำน้ำเสียมาเจือจาง (Dilution) ให้มีความเข้มข้นน้อยลงก่อน

2.6.6 สภาวะแวดล้อมของระบบ

สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี ต้องมีความเหมาะสมสำหรับระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ดังนี้

1) ปริมาณอาหารเสริมที่จำเป็น ต้องมีอย่างเพียงพอ สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2) อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด มี 2 ระยะ ได้แก่ ระยะมีโซฟิลิค อุณหภูมิ 20 – 38 องศาเซลเซียส และระยะเทอร์โมฟิลิค อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Wiegant และ Lettinga, 1985) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและมีช่วงกว้าง ย่อมมีผลต่อลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

3) พีเอชของน้ำเสียต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ 6.5 – 7.8 (Hulshoff Pol และคณะ, 1983a)

4) ชนิดของน้ำเสียมีผลต่อระบบบำบัด โดยเฉพาะองค์ประกอบที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ สารประกอบทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไม่ได้ สารประกอบที่เป็นตัวยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น เมื่อมีแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่า 1000 มก./ลิตร

2.7 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์

2.7.1 ประเภทของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากการที่แบคทีเรียในถังหมักยูเอเอสบีแบ่งเป็น 2 ชั้น คือชั้นบน แบคทีเรียมีลักษณะเป็นตะกอนเบา ส่วนชั้นล่างมีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งเกิดจากแบคทีเรียเกาะติดกันแน่น จึงมีความแน่นของจำนวนเซลล์แบคทีเรียต่อปริมาตรในชั้นล่างนี้ สูงกว่าในชั้นบนที่มีลักษณะเป็นตะกอนเบามาก ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ จึงถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นมีเทนในชั้นของตะกอนเม็ดเป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี จึงขึ้นกับปริมาณและลักษณะสมบัติของแบคทีเรียชนิดเม็ด

ลักษณะของเม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ ส่วนประกอบของน้ำเสีย สิ่งแวดล้อมในระบบ และการเริ่มต้นเดินระบบ โดยเม็ดตะกอนอาจมีหลายชนิดดังนี้

1) Sarcina Granules

เป็นเม็ดตะกอนที่มีรูปร่างกลมเกาะกันเป็นกลุ่ม เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย methanosarcina เกิดขึ้นเมื่อระบบรับปริมาณสารอินทรีย์สูงมากไป (Over Loading) เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก จึงถูกล้างออกจากระบบได้ง่าย และยังมีความสามารถในการผลิตมีเทนต่ำมาก

2) Rod-type Granules

เป็นเม็ดตะกอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นท่อนสั้นๆเป็นส่วนใหญ่ โดยมีขนาดประมาณ 3 มม. และมี VS สูงถึง 90% ซึ่งตรวจพบในถังยูเอเอสบีที่รับน้ำเสียบางประเภท เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานแป้งมัน เป็นต้น แบคทีเรียพวกนี้จัดเป็นพวก Methanothrix Soehgenii

3) Filamentous Granules

เป็นเม็ดตะกอนซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีเส้นยาว (Filamentous Bacteria) เป็นส่วนใหญ่ เม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดใหญ่ถึง 5 มม. ภายในมักเป็นพวก Inert Carrier Material จึงมีค่า VS ต่ำกว่าเม็ดตะกอนสองพวกแรก

4) Spinky Granules

ในกรณีที่น้ำเสียมีสารแคลเซียมสูง เม็ดแบคทีเรียในระบบยูเอเอสบีจะประกอบด้วย $CaCO_3$ มากกว่าร้อยละ 60 โดยมีลักษณะเป็นหนามแหลม เม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. และหนา 0.5 มม. แบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใยยาว เม็ดตะกอนประเภทนี้มี Activity ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากประกอบด้วย $CaCO_3$ ที่จะพอกบนผิวเม็ดแบคทีเรีย

2.7.2 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากที่มีการศึกษา โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี โดย McLeod, Guiot และ Costerton (1990) พบว่าโครงสร้างภายในเม็ดตะกอนแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้

1) โครงสร้างชั้นนอก

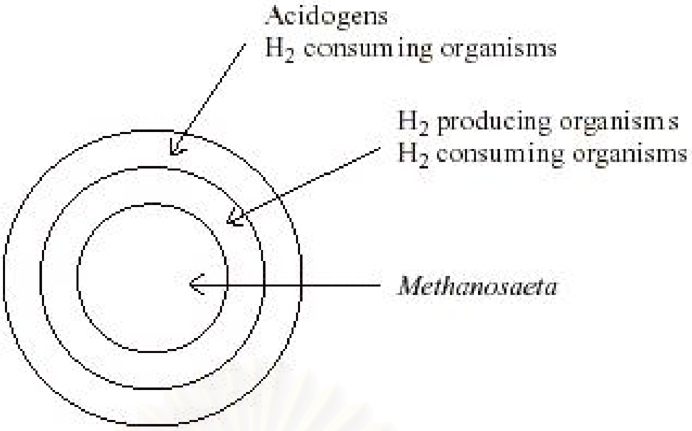
ประกอบด้วยแบคทีเรีย จำพวก Acidogens , H_2 Consuming Organisms

2) โครงสร้างชั้นกลาง

ประกอบด้วยแบคทีเรีย จำพวก H_2 Producing Organisms และ H_2 Consuming Organisms

3) โครงสร้างชั้นใน

ประกอบด้วยแบคทีเรียประเภท Aceticlastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (McLeod, Guiot และ Costerton, 1990)

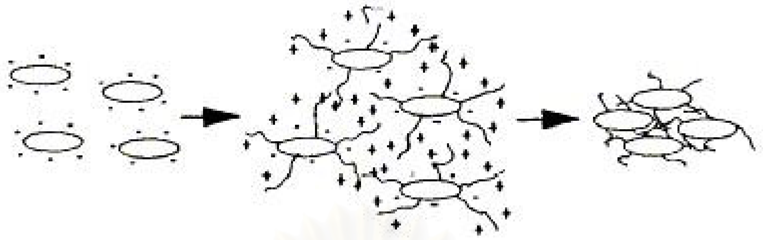
โครงสร้างและขนาดของชั้นในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แต่ละชั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยสลายสารอาหาร และการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต จะพบจุลินทรีย์กลุ่ม Acidogenics ที่บริเวณผิวนอกสุดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทั้งนี้เพราะ นอกจากการที่สารอาหารมีค่าความเข้มข้นสูงบริเวณรอบนอกเม็ดตะกอนแล้ว ยังมีสาเหตุมาจาก อัตราการเกิดปฏิกิริยา Acidogenesis ที่บริเวณรอบนอกของเม็ดตะกอนมีค่าสูงกว่าปฏิกิริยา Acetogenesis และปฏิกิริยา Methanogenesis ด้วยเช่นกัน อะซิเตทที่ถูกผลิตขึ้นมาจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลาง และชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่อไป

2.7.3 Extracellular Polymers

Extracellular Polymer (ECP) เป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ และเป็นสารพื้นฐานของโครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ECP ที่ห่อหุ้มอยู่รอบเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ มีส่วนประกอบหลักเป็น polysaccharide ส่วน ECP ของเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกเป็นส่วนประกอบของ Peptidoglycan ECP สามารถเกิดได้หลายทาง เช่น การสลายตัวของเซลล์หรือจากสารอินทรีย์ที่ถูกขับทิ้งออกมานอกเซลล์ ECP ประกอบไปด้วยโพลีเมอร์ของ Saccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก โดยที่ ECP มีหน้าที่ในการดักจับสารอาหารละลาย และยังเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะกับเซลล์อื่นๆอีกด้วย

จากรายงานการวิจัย พบว่า แบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะถูกล้อมรอบด้วย ECP โดยที่มีปริมาณของ ECP อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ระหว่างร้อยละ 0.6 – 20 ของวีเอสเอส โดยทั่วไปแบคทีเรียที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย มักมีคุณสมบัติเป็นประจุลบ และเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างเซลล์ แต่ ECP ที่ห่อหุ้มอยู่รอบผิวเซลล์เป็นประจุบวก ส่งผลให้เซลล์เหล่านั้นเกิดการดูดติดกัน และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณ ECP ที่มีมากเกินอาจ

ส่งผลกระทบต่อการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เช่นกัน เนื่องจากจะเกิดการผลักกันของประจุบวกที่มีมากเกินไป



รูปที่ 2.5 บทบาทของประจุไฟฟ้า และ ECP ต่อการรวมตัวของจุลินทรีย์ (Schmidt และ Ahring , 1995)

ปริมาณ ECP ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เจริญ พบว่า ที่ความเข้มข้นของ ECP ในช่วงอุณหภูมิ Thermophilic มีค่าต่ำกว่าในช่วง Mesophilic รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับสารอาหารในน้ำเสียอีกด้วย โดยพบส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสกัดได้จากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมธาตุเหล็ก และ Yeast Extract ลงไปในน้ำเสีย

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่า ECP เป็นผลผลิตที่เกิดจาดแบคทีเรียกลุ่มใด แต่พบผลผลิตที่เป็น polysaccharide จากแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic และ Acetogenic ในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่แบคทีเรียกลุ่ม Acidogenic เป็นแบคทีเรียที่มีอิทธิพลต่อการสร้าง ECP

2.7.4 กระบวนการรวมเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีต้องใช้เวลานาน ดังนั้น Liu และคณะ (2003) ได้รวบรวมกลไกและแบบจำลองในกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสบี ดังรูปที่ 2.6 ถึง 2.8 เพื่อให้เกิดความเข้าใจและมีการพัฒนา เพื่อให้การเริ่มต้นเดินระบบใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนย้ายทางฟิสิกส์ ทำให้มีการชนกัน สัมผัสกันระหว่างแบคทีเรีย หรือการดึงดูด ของแบคทีเรียบนผิวนิวคลิไอ (Nuclei) แรงที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้ ได้แก่

- Hydrodynamic Force (แรงดันของน้ำ)
- Diffusion Force (แรงจากการแพร่)
- Gravity Force (แรงโน้มถ่วงของโลก)
- Thermodynamic Force เช่น การเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน
- Cell Mobility (การเคลื่อนที่ของเซลล์)

ขั้นตอนที่ 2 แรงดึงดูดที่ทำให้รักษาเสถียรภาพ และเซลล์สัมผัสกัน แรงดึงดูดเหล่านี้ ได้แก่

Physical Forces

- Van Der Walls Forces
- แรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกัน
- Thermodynamic Forces รวมถึงพลังงานอิสระของผิวด้วย เช่น แรงตึงผิว
- Hydrophobicity
- สายใยแบคทีเรียที่สามารถเชื่อมเซลล์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน

Chemical forces

- การประสานของ Hydrogen
- การก่อตัวของ Ionic Pairs
- การก่อตัวของ Ionic Triplet
- อนุภาคของการเชื่อมระหว่างกันและอื่นๆ

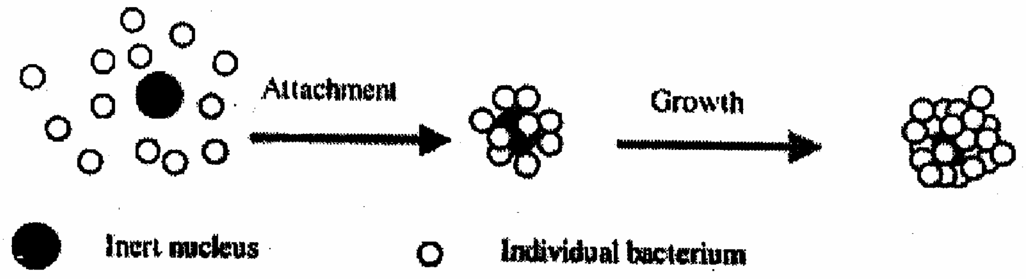
Biochemical Forces

- การทำให้พื้นเซลล์แห้ง
- การละลายเยื่อหุ้มเซลล์
- การให้สัญญาณและการรวมกลุ่มในแบคทีเรีย

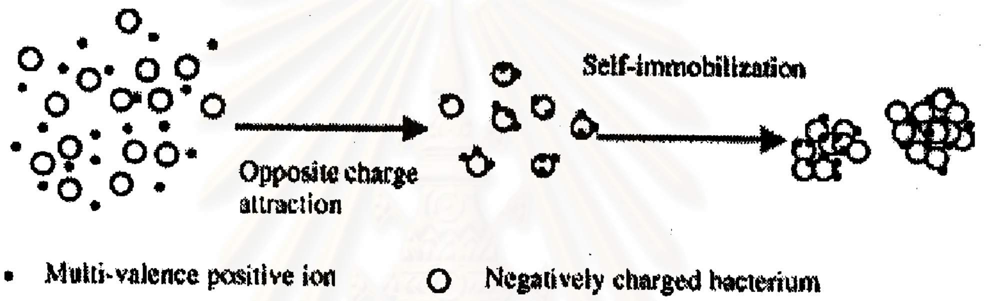
ขั้นตอนที่ 3 Microbial Force ในการทำให้การรวมตัวใหญ่ขึ้นเต็มที่

- ผลผลิตของ Extracellular Polymer โดยแบคทีเรีย เช่น Exopolysaccharides
- การเติบโตจากการรวมตัวของเซลล์
- การเปลี่ยนแปลง Metabolic และความสามารถทางพันธุกรรมที่ลดลงโดยสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เซลล์มีปฏิสัมพันธ์กันสะดวกขึ้น และเป็นผลให้โครงสร้าง Microbial เรียงตัวกันสูง

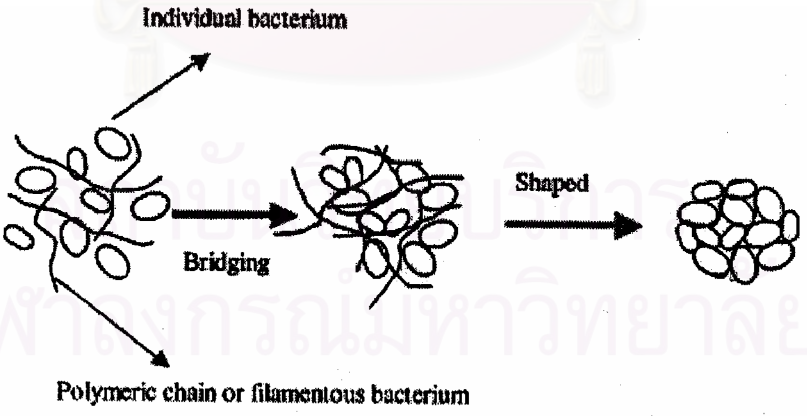
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Inert Nuclei Model (Liu และคณะ , 2003)



รูปที่ 2.7 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Multi-Valence Positive Ion-Bonding Model (Liu และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.8 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ Polymer or Filament Bonding Model (Liu และคณะ , 2003)

2.7.5 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol และคณะ (1983a) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยได้สรุปขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

เป็นขั้นตอนเริ่มต้นของระบบ เมื่อทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นแล้ว ชั้นตะกอนด้านล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสีย และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ รวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

2) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 – 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอย เนื่องจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ทำให้เกิดปริมาณก๊าซที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากยังคงอยู่ในระบบ และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่อาจมีขนาดใหญ่ได้ถึง 5 มม. ถือว่าเป็นการคัดเลือกพันธุ์จุลินทรีย์ของระบบ

3) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 3 – 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ขั้นตอนนี้ อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมากกว่าอัตราการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งเมื่อระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ระบบจะสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่า ระบบอาจมีความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการยับยั้งการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนแบบระบบยูเอเอสบี ก็มีข้อเสียหรือข้อจำกัดคือ การเลี้ยงเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ให้มีขนาดเหมาะสมทำได้ยาก การสร้างเม็ดตะกอนทำได้โดยการสร้างสภาวะทางกายภาพและเคมี ให้เหมาะแก่การรวมตัวของจุลินทรีย์ให้แน่นและตกตะกอนได้ดี ดังนั้นควรทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการยับยั้งการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี (สุบัณฑิต, 2548) ซึ่งมีดังนี้คือ

1) มีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์ สูงกว่าแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน
2) มีปริมาณซัลเฟตสูงในถังยูเอเอสบี
3) มีการให้น้ำเสียในอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ต่ำในถังยูเอเอสบี
4) ปริมาณสารอาหารที่จำเป็น ต่อการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนไม่เหมาะสม
5) ส่วนประกอบคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ที่ไม่เพียงพอ
6) ปริมาณของแข็งในน้ำเสียที่ไม่เพียงพอ
7) การมีสารพิษปะปนในน้ำเสีย

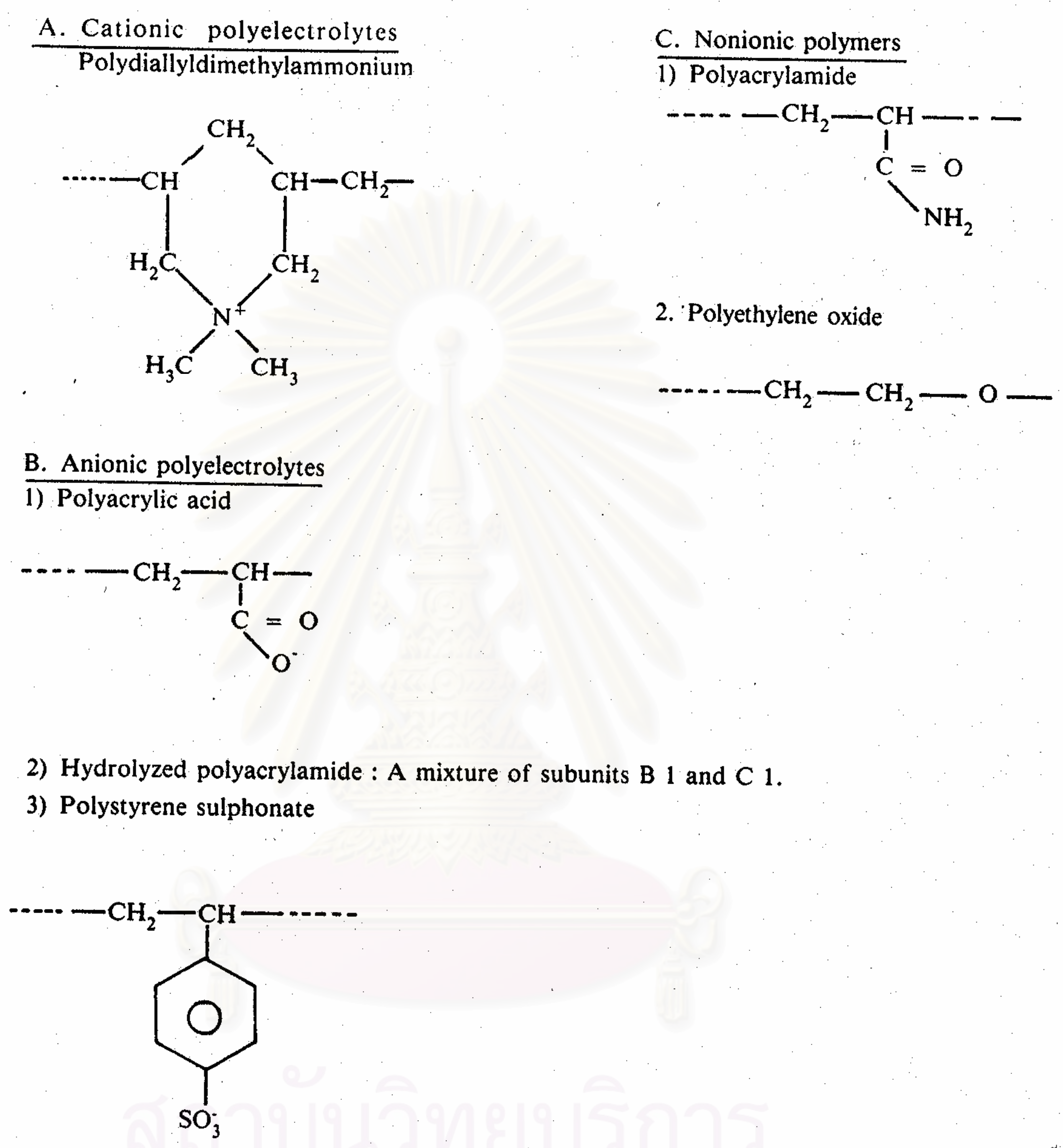
2.9 Polymer

โพลีเมอร์เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งนิยมใช้เป็นโคแอกกูแลนท์เอดในกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งโพลีเมอร์เป็นลูกโซ่ของสารโมโนเมอร์หลายๆตัวเรียงกันอย่างมีระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ โดยโพลีเมอร์จะมี 3 ชนิด คือ โพลีเมอร์ประจุบวก(Cationic Polymer) โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer) และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ (Non-Ionic Polymer) ประจุของโพลีเมอร์นั้นเกิดจาก Functional Group ต่างๆหลายชนิด รูปที่ 2.9 แสดงโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ

โพลีเมอร์นั้นใช้ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging ตามรูปที่ 2.10 จากทฤษฎีนี้ โมเลกุลสามารถเกาะติดบนอนุภาคได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดนั้นเกิดจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ถือว่าเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวจะสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น โดยใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม การใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะเกิดผลเสีย เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปจับอยู่บนอนุภาคเดียวกัน จนไม่มีที่ว่างบนอนุภาคให้โพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นมาจับ

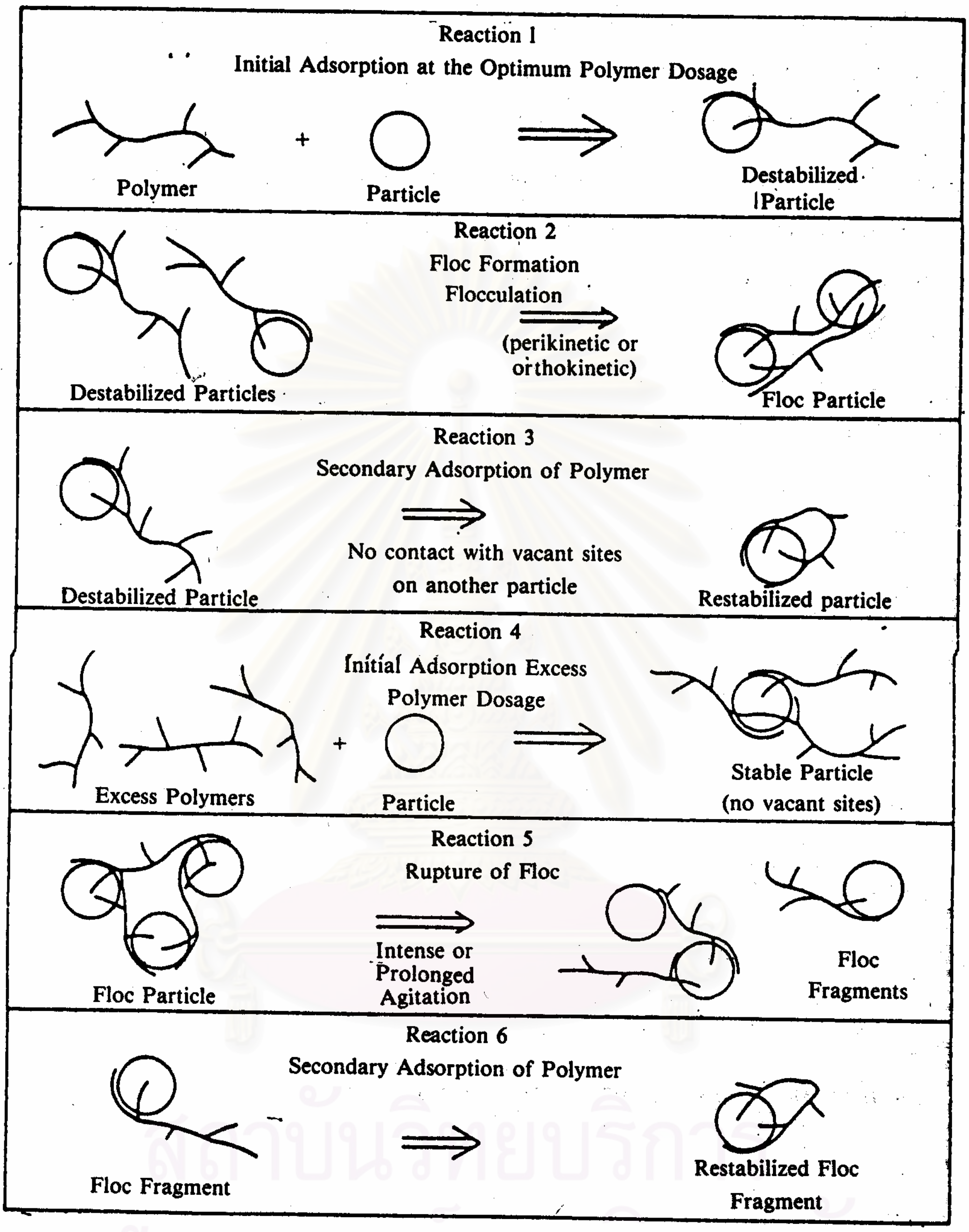
ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ Praestol 852 BC ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ประจุบวกซึ่งใช้ในกระบวนการ Dewatering และ Thickening ทั้งสำหรับน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม Praestol 852 BC นี้มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ และมีโครงสร้างเป็น Polyacrylamide ลักษณะเป็นเม็ดสีขาว มีประสิทธิภาพในทุกช่วง pH

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.9 โพลีเมอร์ชนิดต่างๆ (Weber , 1972)



รูปที่ 2.10 กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยโพลีเมอร์ (Weber , 1972)

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 การศึกษาที่ผ่านมา

2.10.1 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการยูเอเอสบี

Lettinga, Roersma และ Grin (1980) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสีย ด้วยระบบยูเอเอสบีในเนเธอร์แลนด์ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ปริมาตร 120 ลิตร โดยใช้ Granular Sludge จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลเป็นหัวเชื้อ เวลากักน้ำเสีย 12 ชั่วโมง ระยะเวลาในการทดลอง 17 เดือน ในช่วงอุณหภูมิ 18 – 20 องศาเซลเซียส น้ำเสียชุมชนมีค่าซีโอดี 248 – 581 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีมีค่า 72 เปอร์เซ็นต์ และลดบีโอดีได้ 62 เปอร์เซ็นต์

Lalit (1991) ทำการทดลองระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดี 500 มก./ล. โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 140 ลิตร และสูง 4 เมตร ใช้เวลากักน้ำเสีย 8 – 24 ชั่วโมง พบว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.56 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้ 85 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 128 ลิตร/กก.ซีโอดี ที่ถูกกำจัด ใช้ระยะเวลาทดลอง 6 เดือน

Krispa (1992) ทำการศึกษาระบบยูเอเอสบี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดี 500 มก./ล. ใช้ระยะเวลากักน้ำเสีย 3 – 6 ชั่วโมง ระยะเวลาการทดลอง 6 เดือน พบว่า ที่เวลากักน้ำเสีย 3 ชั่วโมง ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ 92 เปอร์เซ็นต์ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 141 ลิตร/กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด

Draaijer และคณะ (1992) ศึกษาระบบยูเอเอสบีเป็นระยะเวลา 12 เดือน โดยถังปฏิกรณ์ของระบบมีขนาด 1200 ลบ.ม. รับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี 563 มก./ล. ปริมาณ 5000 ลบ.ม./วัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่า ระบบสามารถลดค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และของแข็งแขวนลอยลงได้ เท่ากับ 74, 75 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Kiriyama, Tanaka และ Mori (1992) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองที่มีค่าซีโอดี 300 มก./ล. ซึ่งทำการติดตั้ง Membrane Module เพื่อรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ พบว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.4 – 2.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีความสามารถในการลดซีโอดีลง 70 – 80 เปอร์เซ็นต์

Schelinkhout และ Cellazos (1992) ได้ทำการทดลองระบบยูเอเอสบีในระดับ Pilot Scale โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 35 ลบ.ม. ต่อเข้ากับ Facultative Pond ขนาดพื้นที่ 107 ตร.ม. พบว่า ระบบสามารถลดค่าซีโอดีลงได้ 66 – 72 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าบีโอดีลงได้ 79 – 80 เปอร์เซ็นต์ และลดของแข็งแขวนลอยลงได้ 69 – 70 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลากักน้ำเสีย 5 – 19 ชั่วโมง

Lettinga และคณะ (1993) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียในชุมชนโดยใช้ยูเอเอสบีขนาด 120 ลิตรเช่นเดิมและเวลาเก็บกักเท่ากับ 32 – 40 ชั่วโมง แต่ได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 12 –18 องศาเซลเซียส ซีโอดีน้ำเสียชุมชนอยู่ในช่วง 420 – 920 มก./ล. และใช้หัวเชื้อจาก Digester Sewage

Sludge มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 48 – 70 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าบีโอดีได้ 30 – 45 เปอร์เซ็นต์ ช่วงเวลาในการดำเนินระบบ 3 เดือน

สมพงษ์ นิลประยูร (2536) ศึกษาระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 24.4 ลิตร สูง 3 เมตร ที่ระยะเวลากักน้ำเสีย 4.5 – 24 ชั่วโมง ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบเท่ากับ 0.22 – 1.59 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์มีค่า 0.13 – 0.69 ม./ชม. พบว่า ระบบมีความสามารถลดค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และของแข็งแขวนลอยลงได้ 76.4 – 88.1, 76.9 – 92.9 และ 59.7 – 84.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Lettinga (1996) ได้ทำการใช้สลัดจ์ชนิดเดียวกันบำบัดน้ำเสียชุมชนในถังยูเอเอสบี ขนาด 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ซีโอดีน้ำเสียชุมชน 520 – 590 มก./ล. ใช้เวลาเก็บกัก 9 ชม. ทดลองเป็นเวลา 1 เดือน สามารถลดซีโอดีได้ 57 – 59 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าบีโอดีได้ 50 – 60 เปอร์เซ็นต์

Ruiz และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีค่าซีโอดี 693 มก./ล. โดยถังปฏิกรณ์มีขนาด 2 ลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเท่ากับ 24 ชั่วโมง ระบบสามารถลดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยลงได้ 85 เปอร์เซ็นต์ และที่ระยะเวลากักน้ำเสียเท่ากับ 5 ชั่วโมง ระบบสามารถลดค่าซีโอดี และของแข็งแขวนลอยลง 53 และ 63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Chernocharo และ Cardoso (1999) ได้ทำการทดลองระบบยูเอเอสบีที่ติดตามด้วยระบบ Anaerobic Filter โดยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีมีขนาด 416 ลิตร ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี 239 มก./ล. ความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 1.0 – 1.5 ม./ชม. พบว่า ระบบสามารถลดค่าซีโอดีและบีโอดีลงได้ 85 – 95 เปอร์เซ็นต์

2.10.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนเม็ด

Hulshoff Pol และคณะ (1983b) ได้ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด ในระดับห้องปฏิบัติการและได้รายงานว่า ในการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการทางพลศาสตร์ แต่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2 – 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ของตะกอนจุลินทรีย์ จะเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด และเมื่อมีการเพิ่มตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในถังหมักเล็กน้อย จะมีผลให้ Methanogenic Activity เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดที่เพิ่มให้ จะเป็นตัวนำในการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด และพบว่าแคลเซียมที่ความเข้มข้น 150 มก./ล. จะทำให้การตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดดีขึ้น ที่สำคัญเขากล่าวว่า จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่า น้ำเสียที่ได้จากการกลั่นสุรา (Distillery Waste) และ Corn-Starch Waste เมื่อใช้เดินระบบยูเอเอสบี สุดท้ายจะเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดได้แต่ก็มีปัญหา

Gail และ Barford (1985) ได้ศึกษาลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังยูเอเอสบี เปรียบเทียบกับถังปฏิกิริยาแบบไหลขึ้น ซึ่งใช้โพลีอิเล็กโตรไลท์ (Polyelectrolyte) ช่วยในการตกตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานทำผลไม้เป็นสารอาหาร มีค่าซีโอดี 7500 มก./ล. ผลปรากฏว่าตะกอนจุลินทรีย์ในถังยูเอเอสบี มีลักษณะเป็นเส้นใยประสานกันอย่างแน่นหนา ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ในถังไหลขึ้น มีลักษณะเป็นแท่ง (Rod-Shaped) เกาะกันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยเพิ่มขนาดปริมาตรตะกอนจุลินทรีย์ และป้องกันการเกิดตะกอนจุลินทรีย์แบบเส้นใย

Wiegant และ de Man (1985) ได้รายงานว่าการเพิ่มอัตรารับสารอินทรีย์แต่ละครั้งเป็นสาเหตุทำให้ความเร็วของน้ำเร็วขึ้น อัตราการเกิดแก๊สเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดความปั่นป่วนในถังหมัก ทำให้อนุภาคเล็กๆหลุดออกไปจากถังหมัก

de Man และ Zeevalkink (1986) ได้รายงานถึงความเหมาะสมของการใช้ระบบยูเอเอสบีกับน้ำเสียของโรงงานนม และได้กล่าวว่าถ้าลักษณะทางกายภาพและเคมีตลอดจนชนิดของน้ำเสียเหมาะสม จะเกิดขบวนการสร้างตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดขึ้นในถังหมัก เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถที่ดีในการตกตะกอนในถังหมัก

พีรพงษ์ พิทยากร (2530) ได้นำระบบยูเอเอสบีมาใช้บำบัดน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นต่ำและพีเอชสูง โดยใช้น้ำเสียของโรงงานผลิตเครื่องดื่มสำเร็จรูปจากน้ำนมถั่วเหลือง และเครื่องดื่มอัดลมต่างๆ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกไม่มีถังสร้างกรดและชุดที่สองมีถังสร้างกรด โดยถังยูเอเอสบีมีขนาด 14.3 ลิตร ความสูง 2.75 เมตร ถังสร้างกรดมีขนาด 16 ลิตร ความสูง 2 เมตร การทดลองชุดที่สองมี ค่าซีโอดีระหว่าง 923 – 1260 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 57 – 94 % การทดลองชุดที่สองมีค่าซีโอดีระหว่าง 797 – 1209 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 89 – 95 % ทั้งสองชุดการทดลองใช้เวลากักน้ำเสีย 24 ชั่วโมง

Guiot และคณะ (1988) ได้รายงานว่า การเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด เป็นการเพิ่มความสมดุลระหว่าง Acetogen และ Methanogen Activities เพราะทำให้เกิดการส่งถ่าย H_2 ระหว่างกันในกระบวนการ Metabolites มากขึ้น

Schulze, Fiebig และ Dellweg (1988) ได้รายงานถึงความสำเร็จในการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดของระบบยูเอเอสบีที่มี Gelatine เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียและเป็นแหล่งของคาร์บอน แต่ในสภาพของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ NH^+_4 สูง จะได้ตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเล็กและมีความหนาแน่นต่ำ

สมศักดิ์ ศรีวะโลสกุล (2534) ได้ศึกษาการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในช่วงเดินระบบถังหมักในระบบยูเอเอสบี ซึ่งใช้น้ำกากส่าจากโรงงานสุรา พบว่าระบบไบโอเทนไม่พบการเกิดตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด เนื่องจากความผิดพลาดในการควบคุมระบบทำให้เกิด

สภาพไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการสูญเสียตะกอนจุลินทรีย์ออกจากระบบในปริมาณมาก แต่ระบบยูเอเอสบีสามารถตรวจพบ ตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดที่ก้นถังหมักในวันที่ 113

Chen และ Lun (1993) ได้ศึกษากลไกการเกิดตะกอนเม็ดในระบบยูเอเอสบี พวกเขาสันนิษฐานว่า ขั้นตอนแรกของการเกิดตะกอนเม็ดคือ การเกิดนิวเคลียส (Formation of Nuclei) โดยแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในการเกิดนิวเคลียส ได้แก่ Methanosarcina และ Methanothrix หลังจากนั้นความเข้มข้นของกรดอะซิติกจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดเลือกสายพันธุ์ และแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆจะเข้ามาเจริญเติบโตร่วมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกสายพันธุ์ที่เป็นแบบต้องเจริญร่วมกัน (Syntrophic Microorganisms)

Noyola และ Moreno (1994) ได้ศึกษาการใช้ตะกอนจากระบบแอกทิเวทเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) เป็นแหล่งเชื้อ (Seed) ในการสร้างตะกอนเม็ด พวกเขาพบว่า ตะกอนดังกล่าวสามารถใช้เป็นแหล่งเชื้อในการสร้างตะกอนเม็ดได้

Ramos และคณะ (1994) ได้ศึกษาการเกิดตะกอนเม็ดจากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน พวกเขาพบว่า อัตราเร็วน้ำไหลขึ้นมีผลอย่างมากต่อการเกิดตะกอนเม็ด โดยความเร็วที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตร/ชั่วโมง

Yan-Ling, Xing-Lian และ Hu-Hui (1995) ได้ศึกษาการสร้างตะกอนเม็ดในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตหมึกพิมพ์ พวกเขาพบว่าระบบจะมีการสร้างตะกอนเม็ด ไม่ว่าจะมีการเติมคาร์โบไฮเดรตหรือไม่มีการเติมคาร์โบไฮเดรต แต่การเติมคาร์โบไฮเดรตเป็นสารอาหารจะช่วยให้เกิดการสร้างเม็ดตะกอนอย่างรวดเร็วมากขึ้น

Imai และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงผลของการเติม Water absorbing polymer (WAP) ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยเขาสรุปว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเติมคือ 750 มก./ล. ซึ่งเขาได้เติมลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ พบว่าการเติม WAP ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดตะกอนเม็ดดีขึ้น

Yan และ Tay (1997) ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี ทำการทดลองโดยใช้ค่าซีโอดี 2000 มก./ล. ในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบ (Start-Up) นั้นจะให้ค่าอัตรารับภาระสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัด ซีโอดี (Specific Methanogenic Activity : SMA) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเริ่มต้นเดินระบบและมีค่าคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 เดือน โดยในเดือนแรก กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะเป็นไปอย่างช้า และเริ่มเร็วมากขึ้นในช่วงเดือนที่ 3 ของการทดลอง เม็ดตะกอนส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแบคทีเรียจำพวก Methanothrix ที่มีความสามารถในการกำจัดซีโอดีสูง คือมีค่า SMA เท่ากับ 1.72 g CH_4-COD/g VSS-d สามารถตกตะกอนได้ดี มีค่า SVI เท่ากับ 9.5 มล./ก.เอสเอส และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.6 มม.

Francese และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของความเร็วของน้ำไหลขึ้นที่มีต่อการเกิดตะกอนเม็ด พวกเขาพบว่า ตะกอนเม็ดเกิดขึ้นหลังจากดำเนินการทดลอง 15 –35 วัน โดยมีค่าความเร็วไหลขึ้นในช่วง 0.5 – 2.0 เมตร/ชั่วโมง นอกจากนั้นยังพบว่าตะกอนมีลักษณะทางกายภาพและแอกทิวิตี้แตกต่างกันขึ้นกับความเร็วของน้ำไหลขึ้น

Gonzalez และคณะ (1998) ได้ศึกษา ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) สัดส่วนอาหารหลักต่อธาตุอาหารเสริม (COD:N:P) และสัดส่วนของอาหารหลักต่อค่าความเป็นด่าง (COD:Alkalinity) ที่มีผลต่อการเกิดตะกอนเม็ด พวกเขาสังเกตพบว่ามีการเกิดตะกอนเม็ด หลังจากทำการทดลอง 30 วัน ขนาดของตะกอนเม็ดเฉลี่ยใหญ่ขึ้นเมื่อมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากขึ้น นอกจากนั้นพวกเขาพบว่า หลังจากที่ตะกอนเม็ดเกิดสมบูรณ์แล้วสารอาหารเสริมอาจไม่ต้องเติม และสัดส่วนของความเป็นด่างต่ออาหารหลักสามารถลดค่าลงได้โดยที่ประสิทธิภาพของระบบไม่ลดลง

El-Mamouni, Leduc และ Guiot (1998) ได้ศึกษาผลของการเติม Percol 763 และ ไคโตซานลงในระบบบำบัดยูเอเอสบี เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ไม่เติมโพลีเมอร์ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ควบคุม โดยการทดลองเป็นการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซีโอดี 200 ก./ล. ที่ HRT 24 ชม. ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้นเขาได้ทดลองโดยวิธี Jar Test เขาพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเติม Percol 763 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น Acrylamide Polymer คือ 2 มก./ก.เอสเอส สำหรับไคโตซานซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น Polysaccharideใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 25 มก./ก.เอสเอส โดยความถี่ในการเติมโพลีเมอร์นั้นเขาเลือกเติมสัปดาห์ละครั้งเป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์ พบว่าถังที่มีการเติมโพลีเมอร์ไคโตซานจะมีประสิทธิภาพการเกิดตะกอนเม็ดที่ดีกว่า Percol 763 และไม่เติมโพลีเมอร์เลยตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนเม็ดที่เหนือกว่าของไคโตซาน อาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้าง Polysaccharide ของไคโตซาน ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกับ Extracellular Polymeric Substance (ECP) ซึ่งเป็นสารพื้นฐานในโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ

Teo, Xu และ Tay (2000) ได้ทดลองสร้างตะกอนเม็ดในห้องทดลองเพื่อยืนยันทฤษฎีที่เสนอโดย Tay และคณะ พวกเขาพบว่า Proton Translocating Activity บนผิวของแบคทีเรียเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดตะกอนเม็ด นอกจากนั้นพบว่า ตะกอนเกิดขึ้นหลังจากทดลอง 45 วัน

Sharma และ Singh (2001) ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารเทรซ (Trace Nutrients) ต่อการเกิดตะกอนเม็ด พวกเขาพบว่า การเติมเหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ ช่วยให้เกิดตะกอนเม็ดได้ดีขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้เกิดตะกอนเม็ดแย่ลง

Yu, Fang และ Tay (2001a) ได้ศึกษาผลของการเติม $AlCl_3$ ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี ซึ่งเขาทำการทดสอบโดยถังปฏิกรณ์ใบแรกไม่เติม $AlCl_3$ ส่วนถังปฏิกรณ์ใบที่สองเติมที่ความ

เข้มข้น 300 มก./ล. ลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าการเติม $AlCl_3$ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างตะกอนเม็ดในระบบยูเอเอสบี

Yu, Tay และ Fang (2001b) ได้ศึกษาผลของแคลเซียมในการเกิดตะกอนเม็ดในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี โดยทดลองเติม $CaCl_2.2H_2O$ หลายค่า ตั้งแต่ 150 ถึง 800 มก./ล. ซึ่งเขาได้เติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าการเติมแคลเซียม 150 ถึง 300 มก./ล. จะเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดตะกอนเม็ดได้ดีที่สุด

Show และคณะ (2004) ได้ศึกษาการสร้างตะกอนเม็ดในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นซีโอดี 5,000 มก./ล. โดยเติมโพลีเมอร์ประจุบวกชนิดหนึ่งช่วยในการสร้างตะกอนเม็ดซึ่งมีสูตรทางการค้าว่า AA 184 H ซึ่งโพลีเมอร์ชนิดนี้ใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นตัวปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ เขาได้ทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีจำนวน 6 ถัง ถังแรกไม่เติมโพลีเมอร์เลย ถังที่ 2 ถึงถังที่ 6 เติมโพลีเมอร์ 20 , 40 , 80 , 160 และ 320 มก./ล. ตามลำดับ โดยเขาเติมโพลีเมอร์ลงไปครั้งเดียวพร้อมกับการใส่ตะกอนหัวเชื้อลงไปในถังปฏิกรณ์ พบว่าการเติมโพลีเมอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนเม็ด และการเติมโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมากที่สุด ทั้งการตกตะกอน ความแข็งแรงของตะกอนเม็ด และการสร้างก๊าซมีเทน

จากข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมาทั้งหมด พบว่าโพลีเมอร์ประจุบวกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนเม็ดในระบบยูเอเอสบี โดยที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2 – 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะช่วยทำให้เกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดขึ้น แต่ความเข้มข้นและความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่เหมาะสมยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงความเข้มข้นและความถี่ที่เหมาะสมในการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบยูเอเอสบี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การวางแผนการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษา ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ดของระบบบำบัดยูเอเอสบีโดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ทำการติดตั้งชุดทดลองและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ห้องปฏิบัติการ 1701 ชั้นที่ 17 ตึกมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบีจำนวน 3 ถังที่มีลักษณะเหมือนกัน แผนการดำเนินการวิจัยนั้นได้แสดงดังรูปที่ 3.1

การเตรียมการทดลอง

1. การเตรียมอุปกรณ์
2. การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

↓

การดำเนินการทดลอง

1. ทำการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย
2. ทำการเก็บตัวอย่างและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
3. ทำการวิเคราะห์ข้อมูล

รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ถังปฏิกิริยายูเอเอสบี

ในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.4 ซม. มีความสูงส่วนย่อยสลาย 1.06 เมตร จำนวน 3 ถัง มีปริมาตรกักเก็บน้ำทั้งหมด 2.43 ลิตร ด้านบนมีชุดอุปกรณ์แยกสามสถานะ ซึ่งทำจากท่อพีวีซี ส่วนด้านข้างของถังปฏิกรณ์มีวาล์วเก็บตัวอย่างตะกอนตามความสูงของถัง จำนวน 5 ตำแหน่ง ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ตามแบบรูปที่ 3.2

3.2.2 ถังพักน้ำเสีย

1) ถังพักน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เป็นถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร จำนวน 3 ถัง
2) ถังพักน้ำเสียออกจากระบบ เป็นถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร จำนวน 3 ถัง

3.2.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์

เครื่องสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ จะเป็นเครื่องสูบน้ำชนิด Metering Pump สูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ถัง จำนวน 3 เครื่อง

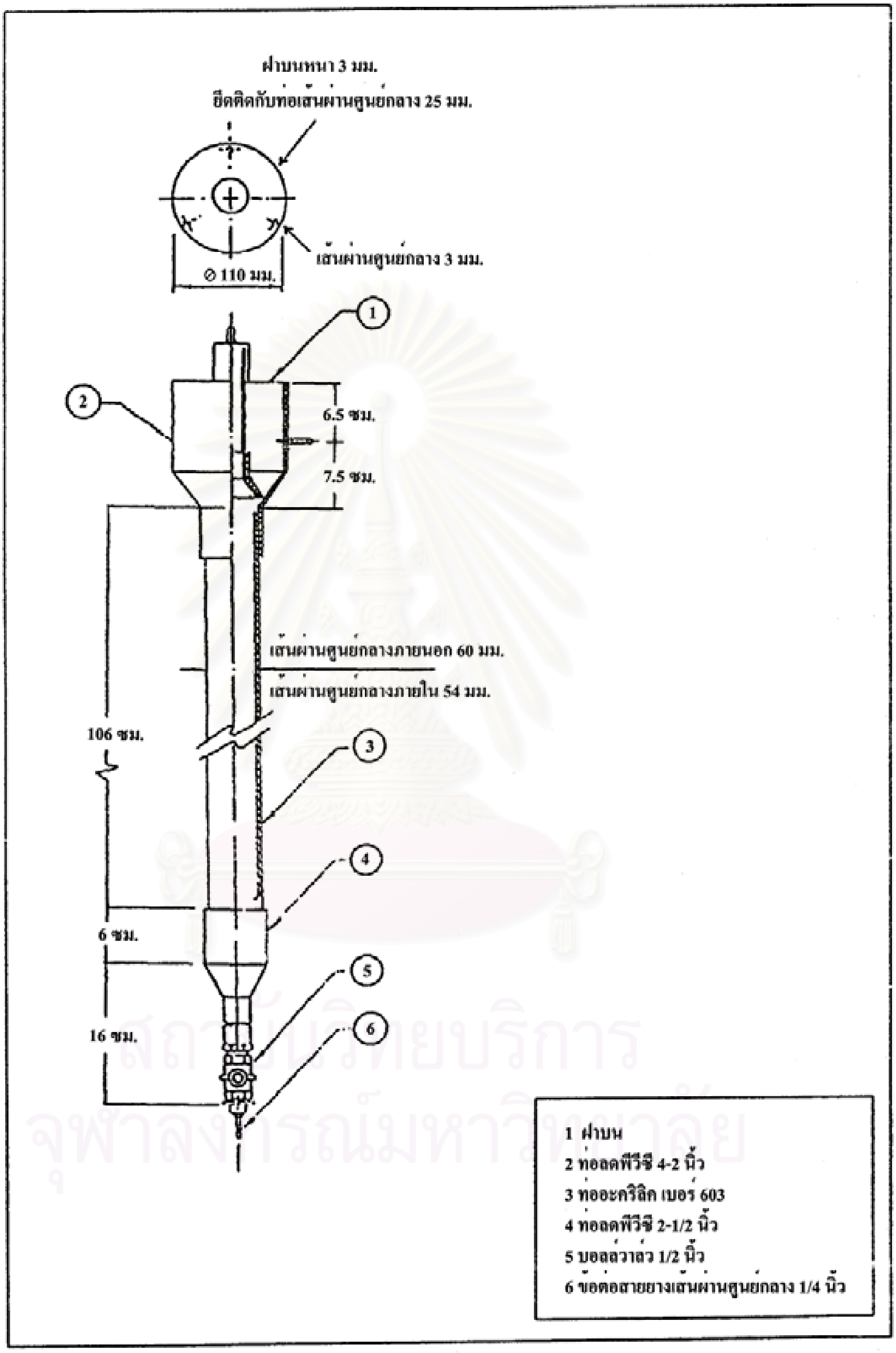
3.2.4 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาณก๊าซ

อุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซจำนวน 3 ชุด ท่อนำก๊าซจากระบบยูเอเอสบี จะต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บก๊าซ โดยใช้หลักแทนที่น้ำ และทำการปรับ pH น้ำให้ต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณก๊าซที่วัดได้คือก๊าซทั้งหมดที่เกิดจากระบบ

3.3 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงานของระบบ

ทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี บริเวณริมระเบียงชั้น 17 อาคารมหามกุฎ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งทำการติดตั้งระบบยูเอเอสบี ดังรูปที่ 3.3 โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1) น้ำเสียในถังพักน้ำเสียเข้า จะถูกสูบเข้าทางตอนล่างของถังปฏิกรณ์ แบบไหลต่อเนื่อง
2) น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ จะไหลออกทางตอนบน ไปยังถังพักน้ำทิ้ง
3) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ จะไหลผ่านอุปกรณ์แยกสามสถานะ ไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซ



รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งระบบยูเอเอสบี

3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.4.1 สารอาหารหลัก

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ส่วนที่เป็นสารอาหารหลักในแต่ละวันนั้น จะเตรียมน้ำเสียแล้วเก็บไว้ในถังพลาสติกซึ่งเป็นถังพักน้ำเสีย ซึ่งความเข้มข้นซีโอดีที่ใช้ สร้างมาจากน้ำตาลทรายขาว โดยเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้มีค่า COD:N:P เท่ากับ 350:5:1 ไนโตรเจนใช้จากยูเรีย สูตรคือ $(NH_2)_2CO$ ส่วนฟอสฟอรัส ใช้จาก KH_2PO_4 ซึ่งค่า BOD ของน้ำเสียนั้นจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ ของค่า COD (อรทัย, 2545)

3.4.2 บัฟเฟอร์

การเตรียมบัฟเฟอร์ให้กับน้ำเสียสังเคราะห์ จะใช้ $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์เพื่อรักษา pH ของน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบ ให้ไม่ต่ำกว่า 6.7 โดยเลือกใช้ COD:$NaHCO_3$ เท่ากับ 1:1.2

3.4.3 สารอาหารเสริม

3.4.3.1 การใส่สารอาหารเสริมในครั้งแรก ไปพร้อมกับตะกอนหัวเชื้อในช่วงเริ่มต้นเดินระบบนั้น จะใช้สัดส่วนของ Vanderbilt Media Solution (Dararat, 1996) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

3.4.3.2 การใส่สารอาหารเสริมในการทดลองช่วง Post Test ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.5 ต่อไปนั้น จะเป็นการใส่สารอาหารเสริมเพิ่มเติมนอกจากสารอาหารหลัก ที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โดยจะเป็นการเลือกเติม Ca, Ni, Co มาจากสารเคมี $CaCl_2(H_2O)_2$, $NiCl_2(H_2O)_6$ และ $CoCl_2(H_2O)_6$ ตามลำดับ โดยใช้สัดส่วนมาจาก Vanderbilt Media Solution เหมือนกัน

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของสารอาหารทั้งหมด

สารอาหาร	ความเข้มข้น(มก./ล.)	สารอาหาร	ความเข้มข้น(มก./ล.)
$AlCl_3(H_2O)_6$	0.5	$NiCl_2(H_2O)_6$	0.5
KI	10	$ZnCl_2$	0.5
$MnCl_2(H_2O)_4$	10	NH_4Cl	1200
$Na_2MoO_4(H_2O)_2$	0.5	$CaCl_2(H_2O)_2$	748
NH_4VO_3	0.5	$MgSO_4(H_2O)_3$	405
$CoCl_2(H_2O)_6$	10		

3.5 ขั้นตอนและวิธีทดลอง

3.5.1 การศึกษาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสม โดยวิธี Jar Test

การหาความเข้มข้นในการเติมโพลีเมอร์ที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ใช้วิธี Jar Test ตาม Standard Method โดยใช้ความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อ 2400 มก.วีเอสเอส/ล. ซึ่งลดความเข้มข้นลงมา 10 เท่า จากความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อที่นำมาคือ 24000 มก.วีเอสเอส/ล. เนื่องจากความเข้มข้นนั้นมีมากเกินไป เป็นอุปสรรคต่อการทำ Jar Test โดย 2400 มก.วีเอสเอส/ล. จะมีค่าเท่ากับ 3700 มก.เอสเอส/ล.

สำหรับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้เติม มีการศึกษาปริมาณโพลีเมอร์ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ไม่เติมโพลีเมอร์, เติมโพลีเมอร์ 1, 2, 4, 6 และ 8 มก./ก.เอสเอส ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของโพลีเมอร์ 0, 3.7, 7.4, 14.8, 22.2 และ 29.6 มก./ล. ตามลำดับ

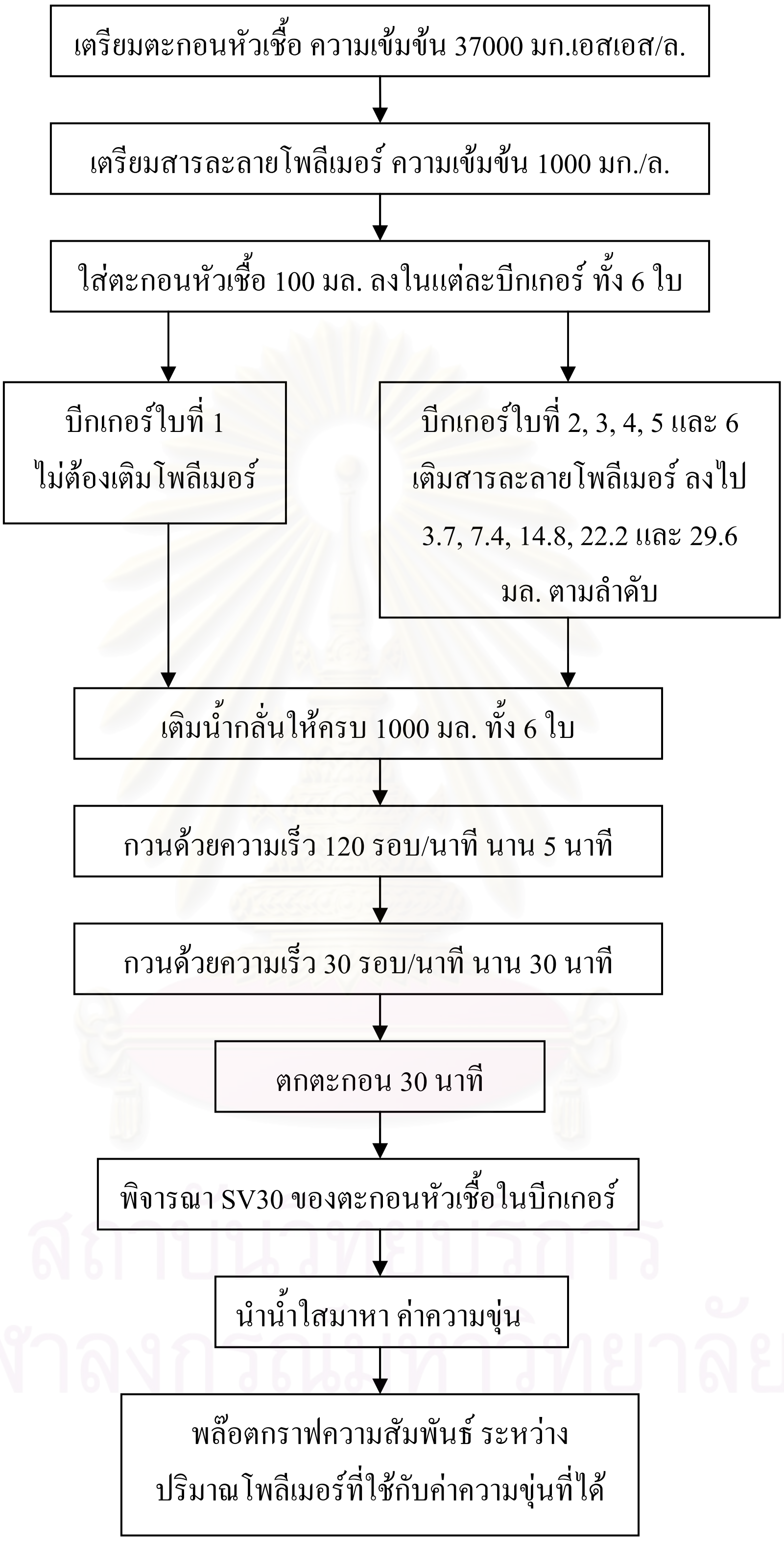
โพลีเมอร์ที่นำมาใช้นั้นจะนำไปละลายน้ำก่อน ให้มีความเข้มข้นโพลีเมอร์ 1000 มก./ล. แล้วนำมาเตรียมเติมให้ได้ตามสัดส่วนที่กล่าวไว้แล้วตามย่อหน้าบน

ทำการใส่ตะกอนหัวเชื้อความเข้มข้น 24000 มก.วีเอสเอส/ล. ลงไป 1 ใน 10 ของบีกเกอร์ หรือเท่ากับ 100 มล. แล้วเติมสารละลายโพลีเมอร์ลงไปในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นให้ครบ 1000 มล. จะได้ตะกอนหัวเชื้อที่ลดความเข้มข้นเท่ากับ 2400 มก.วีเอสเอส/ล. ซึ่งเท่ากับ 3700 มก.เอสเอส/ล. ทำเช่นเดียวกันทุกความเข้มข้นโพลีเมอร์

หลังจากนั้นจะทำการกวนเร็วด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที นาน 5 นาที ตามด้วยกวนช้าด้วยความเร็ว 30 รอบ/นาที นาน 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำใสมาวัดความขุ่น และพิจารณา SV30 ของ Flocculated Biomass แล้วเปรียบเทียบผลและเลือกปริมาณโพลีเมอร์ที่เหมาะสม

เมื่อเราได้ค่าความเข้มข้นโพลีเมอร์ที่เหมาะสมแล้ว จะใช้ค่าความเข้มข้นนั้นดำเนินการตลอดช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในการทดลอง การทดลองที่ 3.5.1 นี้ แสดงขั้นตอนเป็นแผนผังดังรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 การศึกษาผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

การเริ่มต้นของการศึกษานี้เริ่มจากการนำตะกอนหัวเชื้อ จากถังย่อยสลายแบบไร้อากาศของโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง มาปรับสภาพเชื้อให้คุ้นเคยกับสภาพแวดล้อม โดยนำตะกอนหัวเชื้อมาเก็บรักษาไม่ให้ถูกแสงแดด และมีการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์และสารอาหารเสริม เพื่อกระตุ้นให้ตะกอนหัวเชื้อปรับตัวเข้ากับระบบแบบไร้อากาศอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาเตรียมความพร้อมของตะกอนหัวเชื้อเป็นเวลา 1 เดือน หลังจากตะกอนหัวเชื้อในระบบพร้อมที่จะดำเนินการแล้ว จะป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง โดยค่อยๆเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบในช่วง 2 เดือนแรก จนถึงช่วงสิ้นสุดการเดินระบบ

หลังจากตะกอนหัวเชื้อในระบบพร้อมที่จะดำเนินการแล้ว จะทำการป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ(Start Up)ในช่วง 2 เดือนแรก จนถึงช่วงสิ้นสุดการเดินระบบ โดยจะค่อยๆเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ตามแต่ความสามารถที่ระบบจะรับได้ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ การพิจารณาเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในแต่ละช่วงให้ถือหลักเกณฑ์ดังนี้คือ จะต้องมีการกำจัดซีโอดีได้ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป และมีปริมาณหลุดออกของของแข็งแขวนลอยที่ไม่มากจนเกินไป

ขั้นตอนการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในงานวิจัยนี้ของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เป็นดังตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ซึ่งแสดงการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 3.5 จะแสดงการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยเป็นการแสดงในรูปแบบของกราฟ

การทดลองในหัวข้อที่ 3.5.2 นี้ จะเป็นการเดินระบบระยะยาว ใช้เวลา 19 สัปดาห์หรือดำเนินระบบในวันที่ 1 ถึงวันที่ 133 ของการทดลอง โดยช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up) จะมีการเติมโพลีเมอร์ เพื่อศึกษาผลของการเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบ และศึกษาถึงความถี่ที่เหมาะสมที่ใช้ในการเติมโพลีเมอร์ โดยทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์จะมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ซึ่งปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้มาจากการทดลองหาความเข้มข้นโพลีเมอร์ที่เหมาะสม ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.5.1

ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่แตกต่างกันมีดังนี้คือ ถังปฏิกรณ์ที่หนึ่งไม่มีการเติมโพลีเมอร์ ถังปฏิกรณ์ที่สองมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง ถังปฏิกรณ์ที่สามมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง โดยควบคุมให้มีการเติมปริมาณโพลีเมอร์โดยรวมในหนึ่งสัปดาห์เท่ากับถังปฏิกรณ์ที่สอง แต่เติมแยกย่อยออกเป็นสองครั้ง โดยจะเติมโพลีเมอร์โดยตรงเข้าไปในระบบผ่านทางน้ำเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 3.2 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1

วันที่เดินระบบ	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ซีโอดี (มก./ลิตร)	อัตราการสูบน้ำเสีย (ลิตร/วัน)	เวลากักน้ำ (วัน)	ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)
1 - 30	2	1000	4.86	0.5	0.09
31 - 99	3	1500	4.86	0.5	0.09
100 - 165	4	2000	4.86	0.5	0.09

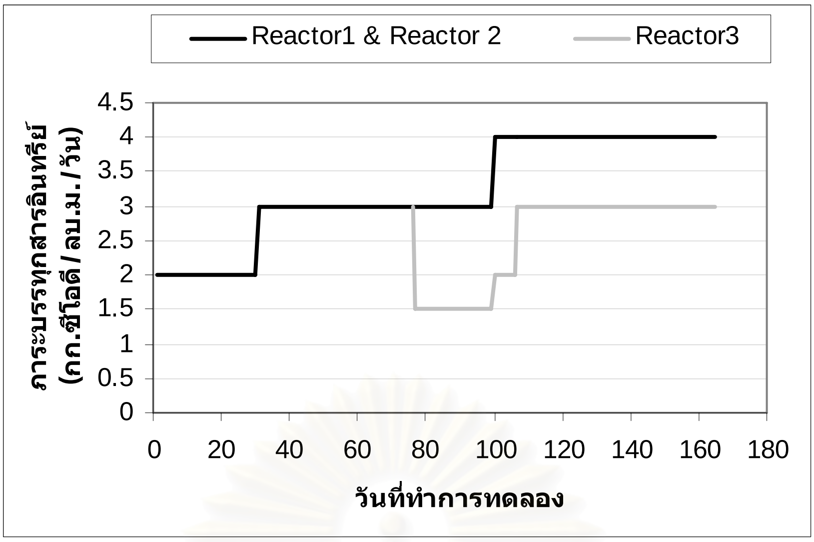
ตารางที่ 3.3 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2

วันที่เดินระบบ	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ซีโอดี (มก./ลิตร)	อัตราการสูบน้ำเสีย (ลิตร/วัน)	เวลากักน้ำ (วัน)	ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)
1 - 30	2	1000	4.86	0.5	0.09
31 - 99	3	1500	4.86	0.5	0.09
100 - 165	4	2000	4.86	0.5	0.09

ตารางที่ 3.4 การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3

วันที่เดินระบบ	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ซีโอดี (มก./ลิตร)	อัตราการสูบน้ำเสีย (ลิตร/วัน)	เวลากักน้ำ (วัน)	ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)
1 - 30	2	1000	4.86	0.5	0.09
31 - 76	3	1500	4.86	0.5	0.09
77 - 99	1.5	1500	2.43	1	0.045
100 - 106	2	2000	2.43	1	0.045
107 - 165	3	2000	3.65	0.67	0.066

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในงานวิจัยนี้ ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 สามารถเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เป็นปกติ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ถึง 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่ามีปัญหาหลุดออกของของแข็งแขวนลอยเป็นจำนวนมาก จึงลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลง ทำให้การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์เป็นดังรูปที่ 3.5

3.5.3 การศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

การทดลองนี้มีถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง เป็นการทดลองที่เดินระบบต่อเนื่องมาจากการเดินระบบระยะยาว โดยดำเนินระบบในวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ของการทดลอง ซึ่งปัจจัยต่างๆของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ จะใช้เหมือนกับตอนก่อนสิ้นสุดการเดินระบบระยะยาวในหัวข้อที่ 3.5.2 การเดินระบบช่วง Post Test นี้ เป็นการทดลองที่ใช้เวลาในการศึกษาประมาณ 2 สัปดาห์ โดยทำเพื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการเติม Ca, Ni และ Co ลงในระบบช่วงท้ายของการทดลอง ว่าการเติมสารอาหารเสริมเหล่านี้ จะมีผลทำให้ระบบดีขึ้นกว่าเดิมได้มากน้อยเพียงใด โดยจะเป็นการเติมลงไปในทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ซึ่งการเติม Ca, Ni, Co นั้นจะใช้จากสารเคมี $CaCl_2(H_2O)_2$, $NiCl_2(H_2O)_6$ และ $CoCl_2(H_2O)_6$ ตามลำดับ โดยเป็นการเลือกเติมที่ใช้สัดส่วนมาจาก Vanderbilt Media Solution ซึ่ง $CaCl_2(H_2O)_2$ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ความเข้มข้น 98 – 103 เปอร์เซ็นต์ ส่วน $NiCl_2(H_2O)_6$ มีลักษณะเป็นผลึกสีเขียว ความเข้มข้น 99 เปอร์เซ็นต์ และ $CoCl_2(H_2O)_6$ มีลักษณะเป็นผลึกสีม่วงแดง ความเข้มข้น 98 – 102 เปอร์เซ็นต์

3.5.4 การศึกษาผลของการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบช่วง Post Test

การทดลองนี้จะเป็นการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบยูเอเอสบีอีกครั้ง เพื่อศึกษาเพิ่มเติมว่าถ้ามีการเติมโพลีเมอร์หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาว จะมีความเหมาะสมหรือไม่และเป็นไปได้เพียงใด โดยเป็นการทดลองที่เดินระบบต่อเนื่อง มาจากการเดินระบบในการศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี โดยดำเนินระบบในวันที่ 153 ถึงวันที่ 165 ของการทดลอง ซึ่งปัจจัยต่างๆของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ จะใช้เหมือนกับตอนก่อนสิ้นสุดการเดินระบบในหัวข้อที่ 3.5.3 ซึ่งปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้นั้น ได้มาจากการทดลองหาความเข้มข้นโพลีเมอร์ที่เหมาะสม ดังได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.5.1 ส่วนวิธีการเติมโพลีเมอร์นั้นจะเติมเข้าไปในระบบโดยตรงผ่านเครื่องสูบน้ำเสีย เช่นเดียวกับการเติมโพลีเมอร์ในช่วงที่มีการศึกษาเรื่องผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

3.6 การเดินและการควบคุมระบบ

3.6.1 การเดินระบบ

ระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีการป้อนน้ำเสียเข้าระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยตรง ซึ่งการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างโดยตรง มีข้อเสียที่สำคัญคือ ในกรณีที่น้ำเสียในถังพักน้ำเสียหมดลง จะทำให้มีการสูบอากาศเข้าสู่ระบบได้ ซึ่งจะเป็นการนำออกซิเจนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ ทำให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องหาทางป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น โดยจะต้องมีปริมาณน้ำเสียในถังพักให้เพียงพอต่อการทำงานของระบบ และการเติมน้ำเสียของงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีเติมน้ำเสียใหม่ทุกวัน เพื่อป้องกันน้ำเสียไม่เพียงพอ และป้องกันปัญหา pH น้ำเสียเข้าต่ำลงจนเกินไปด้วย

3.6.2 การควบคุมระบบ

การควบคุมระบบสำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ของระบบให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในขอบเขตการทดลอง เพื่อควบคุมการทดลองให้ได้ผลที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยจะทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังนี้

3.6.2.1 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ

ในงานวิจัยนี้เมื่อเริ่มทำการเดินระบบ จะต้องทำการวัดอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำให้ได้ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้หมั่นสังเกต ปริมาณน้ำในถังพักน้ำเสียเข้าระบบที่หมดในแต่ละวัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้ว

เมื่อทำการทดลองไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง อัตราการสูบน้ำเสียของเครื่องสูบน้ำจะลดลง เพราะเกิดเมือกสารอินทรีย์หรือแบคทีเรียเกาะติดด้านในของสายยางที่ใช้

3.6.2.2 สภาพแวดล้อมทางกายภาพ

ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่สำคัญ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบคือ แสงสว่างและอุณหภูมิ เนื่องจากถ้าแสงสว่างสามารถส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ จะทำให้เกิดตะไคร่น้ำขึ้นบริเวณผนังด้านในของถังปฏิกรณ์ โดยตะไคร่น้ำนี้จะสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนออกมาภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลรบกวนการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องป้องกันไม่ให้แสงสว่างส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ โดยการใช้ฟอยและถุงพลาสติกสีดำ คลุมรอบถังปฏิกรณ์ด้านนอกที่ทำจากอะคริลิกใส และจะต้องคลุมในลักษณะที่สามารถแกะหรือเปิดออกได้ง่าย เพื่อให้สามารถตรวจลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ได้โดยง่าย

การควบคุมอุณหภูมิ จะทำในกรณีที่สภาพอากาศมีอุณหภูมิลดลงกว่า สภาพอากาศปกติทั่วไป ซึ่งอุณหภูมิที่ลดต่ำมากจะมีผลกระทบโดยตรง ต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทมีโซฟิลิค โดยจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาสมอยู่ระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส และเนื่องจากสภาพอากาศของกรุงเทพ โดยทั่วไปแล้วจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทมีโซฟิลิคอยู่แล้ว ดังนั้นปัจจัยด้านอุณหภูมิจึงไม่มีผลกระทบมากนัก

3.6.2.3 อุปกรณ์ต่างๆของระบบ

การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบให้ทำงานได้อย่างปกติ เป็นสิ่งที่สำคัญอีกด้านหนึ่ง โดยสิ่งที่จำเป็นจะต้องทำ ได้แก่ การล้างทำความสะอาดถังพักน้ำเสีย การตรวจสอบไม่ให้มีการอุดตัน ของตะกอนภายในท่อสายยาง การตรวจสอบความเสื่อมที่อาจเกิดขึ้นกับสายยาง เช่นการเกิดรูรั่ว ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนสายยางใหม่ เพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียให้เท่ากับที่กำหนด ตลอดจนตรวจสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ที่ใช้สูบน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ

3.7 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์

จุดเก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ความถี่	วิธีการวิเคราะห์
1.ถังพักน้ำเสีย	Soluble ซีโอดี	3 ครั้ง/สัปดาห์	Close Reflux
	พีเอช	3 ครั้ง/สัปดาห์	pH meter
	อุณหภูมิ	3 ครั้ง/สัปดาห์	Thermo meter
	สภาพด่างทั้งหมด	3 ครั้ง/สัปดาห์	Direct titration
	กรดไขมันระเหย	3 ครั้ง/สัปดาห์	Direct titration
2.ถังปฏิกรณ์	การขยายตัวชั้นตะกอน	3 ครั้ง/สัปดาห์	ไม้บรรทัด
	ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน	ก่อนและหลังการทดลอง	Specific Methanogenic Activity
	การกระจายขนาดสลัดจ์	1 เดือน/ครั้ง	Particle size analyzer
	โครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	สิ้นสุดการทดลอง	Scanning Electron Microscope
3.น้ำออก	ของแข็งแขวนลอยระเหย	สิ้นสุดการทดลอง	Standard Method
	ซีโอดี	3 ครั้ง/สัปดาห์	Close Reflux
	พีเอช	3 ครั้ง/สัปดาห์	pH meter
	อุณหภูมิ	3 ครั้ง/สัปดาห์	Thermo meter
	สภาพด่างทั้งหมด	3 ครั้ง/สัปดาห์	Direct titration
	กรดไขมันระเหย	3 ครั้ง/สัปดาห์	Direct titration
	ของแข็งแขวนลอย	1 ครั้ง/สัปดาห์	Standard Method
	ของแข็งแขวนลอยระเหย	1 ครั้ง/สัปดาห์	Standard Method
4.อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ	ปริมาณก๊าซทั้งหมด	1 ครั้ง/สัปดาห์	อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซ
	ปริมาณก๊าซมีเทน	สิ้นสุดการทดลอง	การคำนวณ

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การศึกษาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสม โดยวิธี Jar Test

การศึกษานี้ใช้บีกเกอร์ในการทำ Jar Test ทั้งหมด 6 ใบ โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เติมลงไปในการทำ Jar Test โดยปริมาณโพลีเมอร์มีตั้งแต่ ไม่เติมโพลีเมอร์, เติมโพลีเมอร์ 1, 2, 4, 6 และ 8 มก./ก.เอสเอส ซึ่งเป็นบีกเกอร์ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

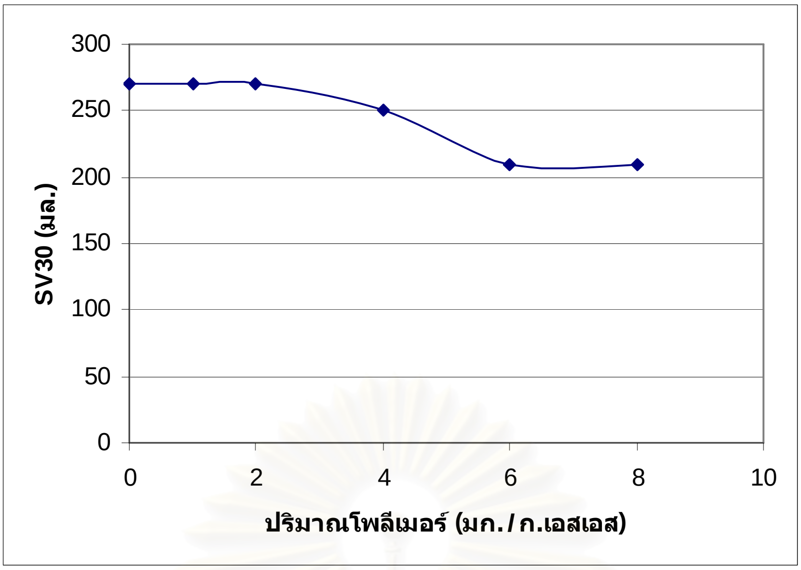
หลังจากตกตะกอน 30 นาทีในบีกเกอร์ ทำการสังเกตการจมตัวของตะกอนหรือ SV30 โดยสังเกตในบีกเกอร์ เนื่องจากไม่ต้องการรบกวนการจับตัวของตะกอน พบว่า SV30 ของตะกอนในบีกเกอร์ใบที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 270 มล. บีกเกอร์ใบที่ 4 มีค่า SV30 เท่ากับ 250 มล. บีกเกอร์ใบที่ 5 และ 6 มีค่า SV30 เท่ากับ 210 มล. แสดงดังรูปที่ 4.1

ส่วนน้ำใสในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบ นำไปหาค่าความขุ่น พบว่าบีกเกอร์ใบที่ 1 ซึ่งไม่ได้เติมโพลีเมอร์ มีค่าความขุ่นเท่ากับ 60 NTU บีกเกอร์ใบที่ 2 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 28 NTU บีกเกอร์ใบที่ 3 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 6.5 NTU บีกเกอร์ใบที่ 4 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 4 NTU บีกเกอร์ใบที่ 5 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 3 NTU และบีกเกอร์ใบที่ 6 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 2.5 NTU แสดงดังรูปที่ 4.2

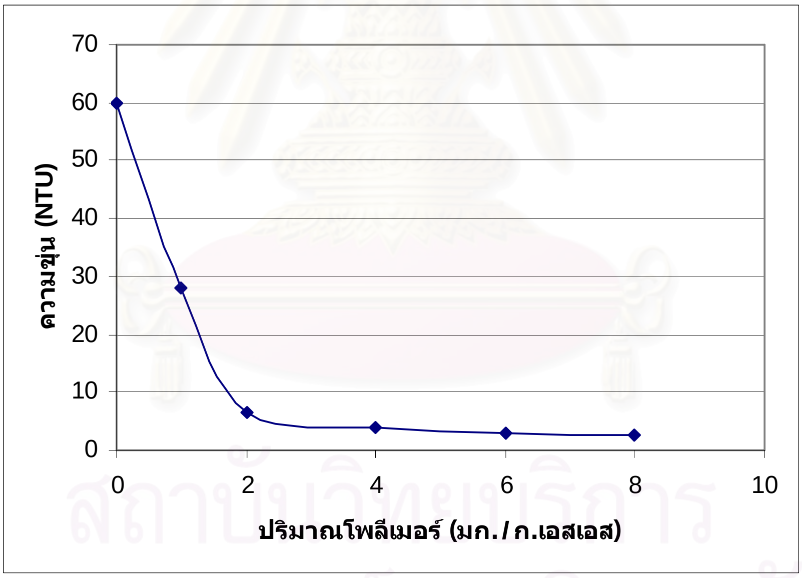
จากรูปที่ 4.1 พบว่า SV30 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากสังเกตภายในบีกเกอร์เพราะไม่ต้องการรบกวนการจับตัวของตะกอน โดยค่า SV30 มีค่าน้อยลงซึ่งแปรผกผันกับปริมาณโพลีเมอร์ที่มากขึ้น พบว่าการเติมปริมาณโพลีเมอร์ที่มากขึ้นทำให้การจมตัวของตะกอนดีขึ้น

ในส่วนของความขุ่นจากรูปที่ 4.2 พบว่าความขุ่นของส่วนน้ำใสของบีกเกอร์ใบที่ 3 ซึ่งเติมปริมาณโพลีเมอร์เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส นั้น เป็นค่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (Optimum Dose) จึงเลือกค่าปริมาณโพลีเมอร์เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส เป็นค่าที่ใช้ในการดำเนินการตลอดช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

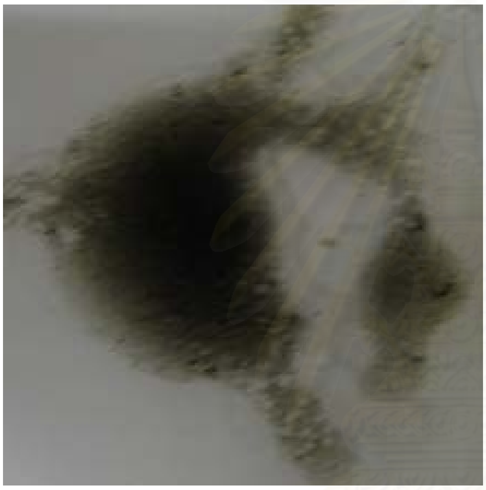


รูปที่ 4.1 SV30 ที่ปริมาณโพลีเมอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความขุ่นที่ปริมาณโพลีเมอร์ต่างๆ

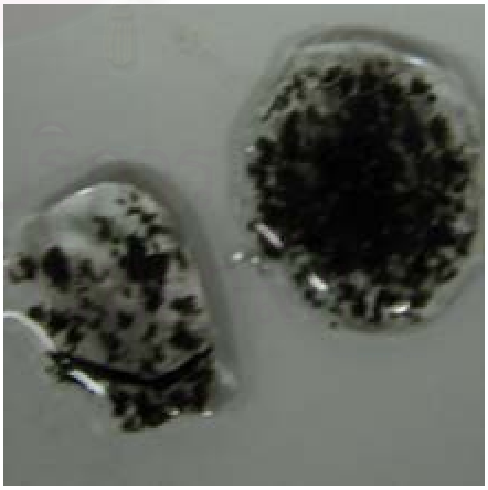
ก.



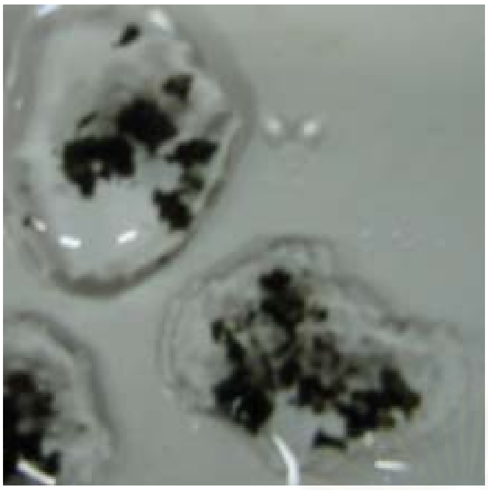
ข.

ค.

ง.



จ.



ฉ.

ช.

ก. บีกเกอร์ทั้ง 6 ใบ หลังตกตะกอน 30 นาที

ข. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์

ค. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์ 1 มก./ก.เอสเอส

ง. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์ 2 มก./ก.เอสเอส

จ. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 4 ที่เติมโพลีเมอร์ 4 มก./ก.เอสเอส

ฉ. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 5 ที่เติมโพลีเมอร์ 6 มก./ก.เอสเอส

ช. ตะกอนจุลินทรีย์ในบีกเกอร์ใบที่ 6 ที่เติมโพลีเมอร์ 8 มก./ก.เอสเอส

รูปที่ 4.3 สภาพตะกอนจุลินทรีย์หลังจากทำ Jar Test

4.2 ผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

การทดลองในหัวข้อนี้ จะเป็นการเดินระบบระยะยาวโดยเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นไปเรื่อยๆตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ(Start Up)ในช่วง 2 เดือนแรก จนถึงช่วงสิ้นสุดการเดินระบบ โดยจะค่อยๆเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ตามแต่ความสามารถที่ระบบจะรับได้ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีจำนวน 3 ถัง โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ซึ่งปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้นั้น ได้มาจากการทดลองหาความเข้มข้นโพลีเมอร์ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test ซึ่งได้ค่า Optimum Dose เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส

ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่แตกต่างกันนั้น คือ ตัวแปรที่แตกต่างกันของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ที่หนึ่งไม่มีการเติมโพลีเมอร์ ถังปฏิกรณ์ที่สองมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง

ส่วนถังปฏิกรณ์ที่สามมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง โดยควบคุมให้มีการเติมปริมาณโพลีเมอร์โดยรวมในหนึ่งสัปดาห์เท่ากับถังปฏิกรณ์ที่สอง แต่เติมแยกย่อยออกเป็นสองครั้ง ส่วนวิธีการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบนั้น จะใช้เครื่องสูบน้ำเสียสูบสารละลายโพลีเมอร์เข้าไปในระบบโดยตรง

ตะกอนหัวเชื้อที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ นำมาจากถังย่อยสลายแบบไร้อากาศของโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง จะมีความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อเท่ากับ 24000 มก.วีเอสเอส/ล. โดยจะใส่ตะกอนหัวเชื้อลงไปถังปฏิกรณ์ เป็นจำนวน 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรส่วนย่อยสลายของถังปฏิกรณ์ จึงทำให้ความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 12000 มก.วีเอสเอส/ล. ซึ่งเท่ากับ 18500 มก.เอสเอส/ล. หรือเท่ากับ 18.5 ก.เอสเอส/ล. เท่ากันทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ต้องเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง เมื่อเติมโพลีเมอร์ที่ค่า Optimum Dose ซึ่งเท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส เพราะฉะนั้นในน้ำหนึ่งลิตรมีตะกอนหัวเชื้อ 18.5 ก.เอสเอส ต้องเติมโพลีเมอร์ 37 มก. แต่ระบบมีส่วนย่อยสลายซึ่งมีปริมาตร 2.43 ลิตร ต้องเติมโพลีเมอร์ 90 มก./ถังปฏิกรณ์ เป็นจำนวนสัปดาห์ละครั้ง

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ต้องเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง โดยเติมโพลีเมอร์เป็นจำนวน 45 มก./ถังปฏิกรณ์ เป็นจำนวน 2 ครั้งในหนึ่งสัปดาห์ ระบบก็จะได้รับปริมาณโพลีเมอร์เท่ากับ 90 มก./ถังปฏิกรณ์ในหนึ่งสัปดาห์ เท่ากับถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่มีความถี่ในการเติมที่บ่อยกว่า

ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเติมโพลีเมอร์นั้น ในงานวิจัยนี้จะเติมในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการเริ่มต้นเดินระบบ(Start Up) โดยเติมมากกว่า Show และคณะ (2004) ที่เติมโพลีเมอร์ประจุบวกซึ่งมีสูตรทางการค้าว่า AA 184 H โดยเขาเติมโพลีเมอร์ลงไปครั้งเดียวพร้อมกับการใส่ตะกอนหัวเชื้อลงไปในถังปฏิกรณ์ ซึ่งพบว่าการเติมโพลีเมอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ตารางที่ 4.1 แสดงการเติมโพลีเมอร์

ตารางที่ 4.1 การเติมโพลีเมอร์ (ช่วง Start Up ของการเดินระบบระยะยาว)

วันที่เติมโพลีเมอร์	ปริมาณโพลีเมอร์ (มก./ถังปฏิกรณ์)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
2	-	90	45
5	-	-	45
9	-	90	45
12	-	-	45

4.2.1 การกำจัดซีโอดี

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 1026.7 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 596.7 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 41.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 1089.2 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 520 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 51.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 1590.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 99.9 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 93.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 2021.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 26.7 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.7 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 1026.7 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 553.3 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 45.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 1089.2 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 516.9 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 52.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 1590.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 76.5 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 95.2 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงเท่ากับ 2021.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 22.9 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.9 เปอร์เซ็นต์

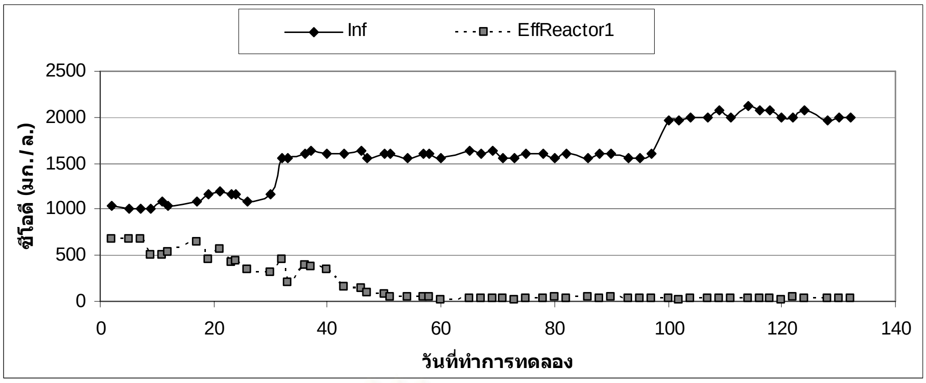
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลิตร/วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 1026.7 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 626.7 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 38.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงนี้ในวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 เท่ากับ 1089.2 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่า ซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 584.6 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 45.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงนี้ในวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 เท่ากับ 1594 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 98.4 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 93.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงนี้ใน

วันที่ 77 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 1582.2 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 24 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลิตร/วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงนี้ในวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 เท่ากับ 1973.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 24 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.8 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบตลอดช่วงนี้ในวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 2033.3 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 27.3 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.6 เปอร์เซ็นต์

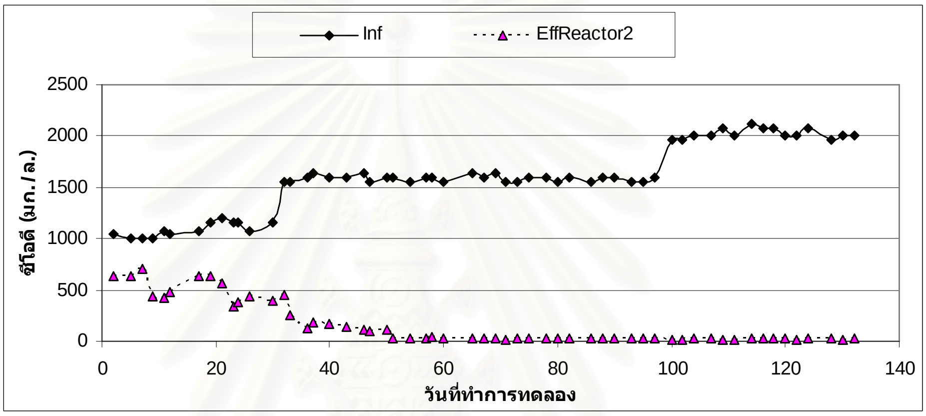
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้น ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง มีประสิทธิภาพดีสุดเท่ากับ 45.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 41.7 เปอร์เซ็นต์ สุดท้ายเป็นถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้งมีประสิทธิภาพ 38.9 เปอร์เซ็นต์

ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าดีที่สุดซึ่งเท่ากับ 52.1 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือถังปฏิกรณ์ที่ 1 เท่ากับ 51.7 เปอร์เซ็นต์ สุดท้ายคือถังปฏิกรณ์ที่ 3 เท่ากับ 45.9 เปอร์เซ็นต์

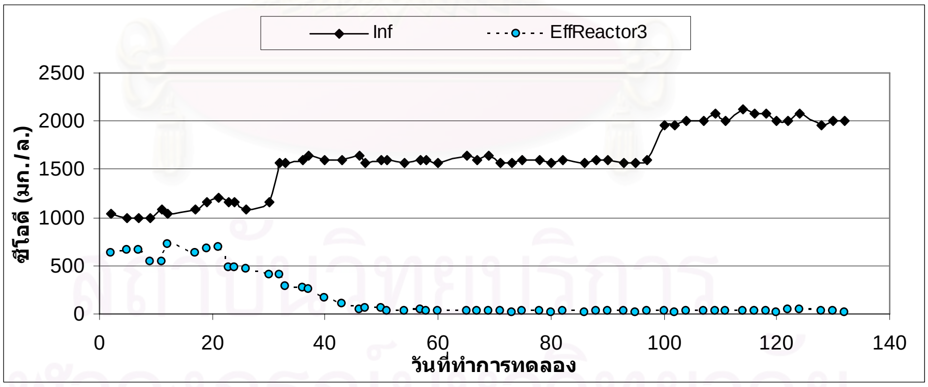
ในการเดินระบบระยะยาวตั้งแต่วันที่ 31 ถึงวันที่ 133 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน พบว่าทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกัน โดยสามารถกำจัดซีโอดีได้เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ได้ในช่วงวันที่ 46 ของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบยูเอเอสบีสามารถเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบได้ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง แต่ผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์นั้น ในเรื่องของประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีไม่มีข้อแตกต่างกันมากนัก การเติมโพลีเมอร์เพียงสัปดาห์ละครั้งจึงมีความเหมาะสมมากกว่า



ก. การกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1



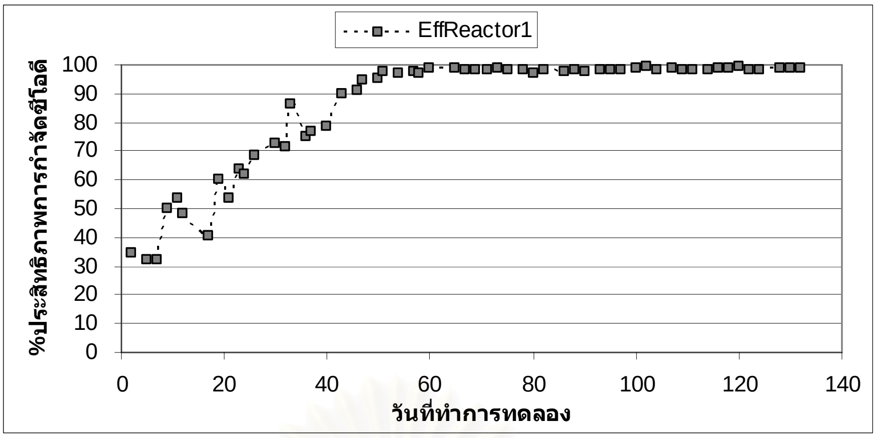
ข. การกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 2



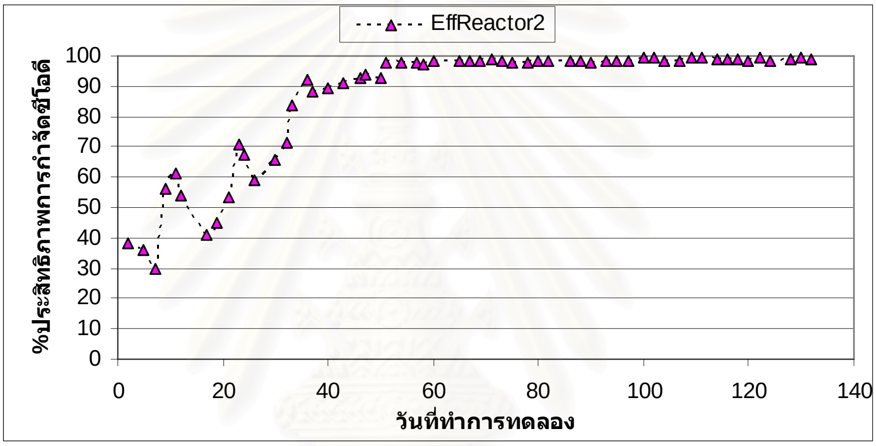
ค. การกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.4 การกำจัดซีโอดี (การเดินระบบระยะยาว)

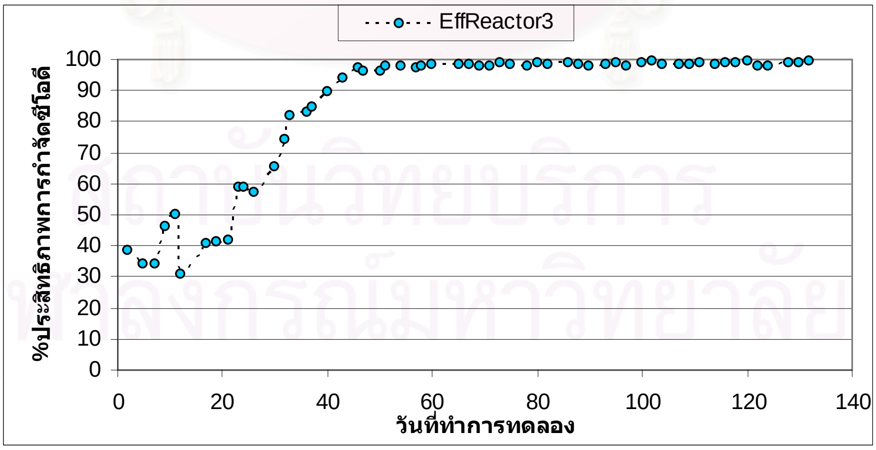
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (การเดินระบบระยะยาว)

4.2.2 ของแข็งแขวนลอย

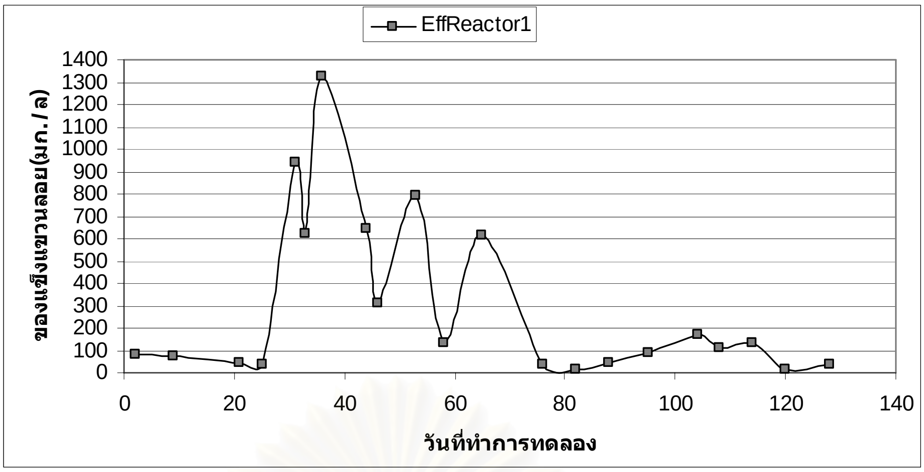
ในการทดลองนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล โดยทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ใช้น้ำเสียเดียวกันมีลักษณะเป็นน้ำใส เมื่อเตรียมมาใหม่จะไม่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยอยู่เลย งานวิจัยนี้จึงมีแต่ของแข็งแขวนลอยที่หลุดจากระบบมากับน้ำออก โดยส่วนใหญ่มาจากตะกอนหัวเชื้อที่ใส่ลงไปตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 79.4 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 60.8 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 464.9 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 94.2 มก./ล.

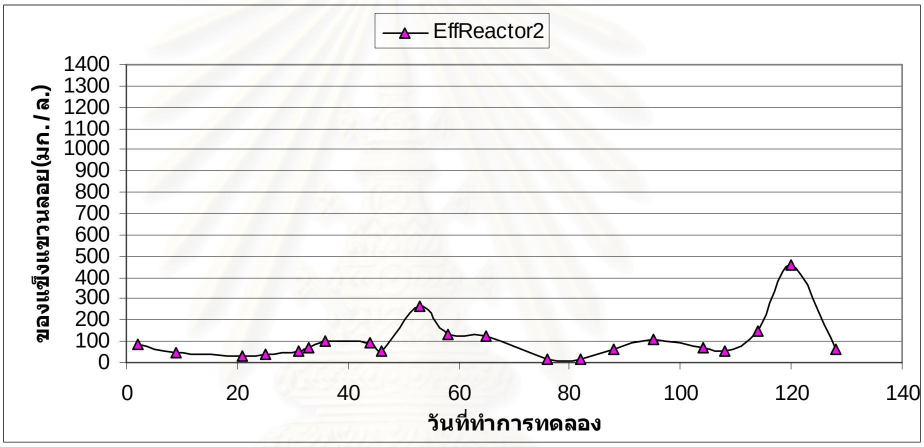
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 66.4 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 50.2 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 91.4 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 159.4 มก./ล.

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 66 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30เท่ากับ 50.9 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 เท่ากับ 242.5 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 100.7 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 เท่ากับ 178 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 567.7 มก./ล.

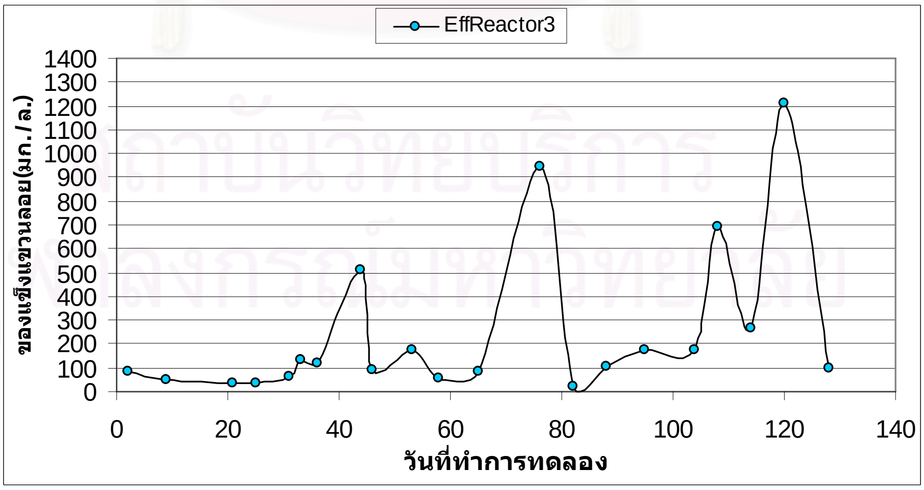
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.6 ของแข็งแขวนลอย (การเดินระบบระยะยาว)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.6 พบว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์ มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 79.4 มก./ล. ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้งมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เท่ากับ 66.4 มก./ล. และ 66 มก./ล. ตามลำดับ

ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่หลุดออกจากระบบ มีมากที่สุดในถังปฏิกรณ์ที่ 1 เท่ากับ 60.8 มก./ล. ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 50.2 มก./ล. และ 50.9 มก./ล. ตามลำดับ

ในการเดินระบบระยะยาวตั้งแต่วันที่ 31 ถึงวันที่ 133 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ช่วงที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 มก./ล. ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 65 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ซึ่งเกิดจากการที่ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดเล็ก จากการที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์เพื่อช่วยในการรวมตัวของตะกอนเหมือนถังปฏิกรณ์อื่น หลังจากวันที่ 76 ระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 1 เริ่มปรับตัวได้และมีปริมาณการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยที่น้อยลง โดยในช่วงท้ายๆของการเดินระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยที่น้อยกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ต่างกับถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยแล้วน้อยกว่าถังอื่นๆ แต่ในช่วงท้ายของการเดินระบบ กลับมีปริมาณการหลุดออกของแข็งแขวนลอยที่มากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 พอสมควร

ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 69 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยที่น้อย ซึ่งใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่ในวันที่ 70 ถึงวันที่ 76 ระบบมีปัญหาของแข็งแขวนลอยหลุดออกเป็นจำนวนมาก จนไม่สามารถเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จึงทำการลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลงมาที่ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ระบบจึงกลับมาเดินได้เป็นปกติ โดยของแข็งแขวนลอยหลุดจากระบบน้อยลง หลังจากนั้นในช่วงที่ระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน อีกครั้ง ในช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ก็กลับมามีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยอีกเป็นปริมาณที่มาก คือเท่ากับ 567.7 มก./ล.

ปัญหาอีกหนึ่งประการจากการทดลองนี้ ที่ทำให้ของแข็งแขวนลอยหลุดออกมาจากระบบเป็นจำนวนมากนั่นคือ การที่ถังปฏิกรณ์ทั้งสามมีช่วงความสูงของส่วนย่อยสลายและส่วนของ GSS (Gas-Solid Separator) ที่ไม่เพียงพอ ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบมากับน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก

การทดลองนี้พบว่าระบบยูเอเอสบีสามารถเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการหลุดออกของของแข็งแขวนลอย โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเดินระบบ

4.2.3 ของแข็งแขวนลอยระเหย

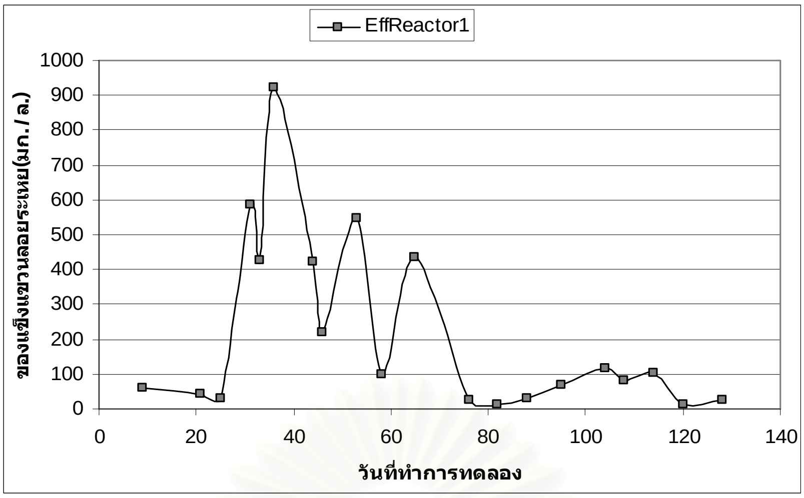
ในการทดลองนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล โดยทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ใช้น้ำเสียเดียวกันมีลักษณะเป็นน้ำใส เมื่อเตรียมมาใหม่จะไม่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยอยู่เลย งานวิจัยนี้จึงมีแต่ของแข็งแขวนลอยระเหยที่หลุดจากระบบมากับน้ำออก ส่วนใหญ่มาจากตะกอนหัวเชื้อที่ใส่ลงไปตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 62 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 45.1 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 315.7 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 68.4 มก./ล.

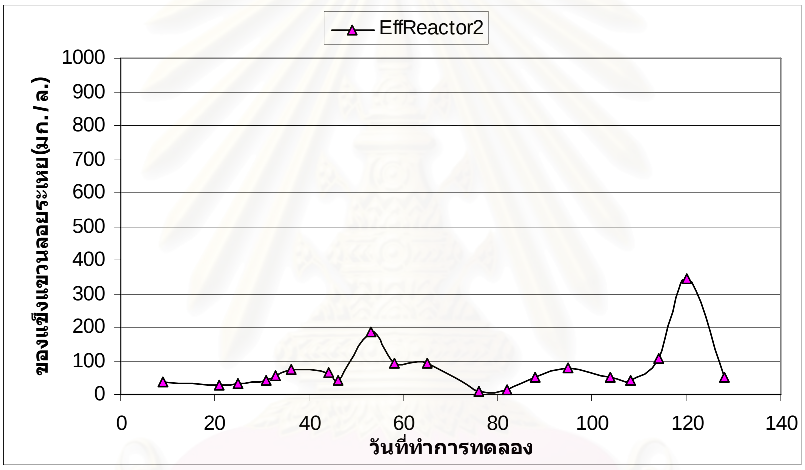
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 37.8 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 32.9 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 67.3 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 119 มก./ล.

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 38 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 เท่ากับ 32.5 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 เท่ากับ 168.9 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 74.3 มก./ล. มีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 เท่ากับ 132 มก./ล. และมีปริมาณเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 394.7 มก./ล.

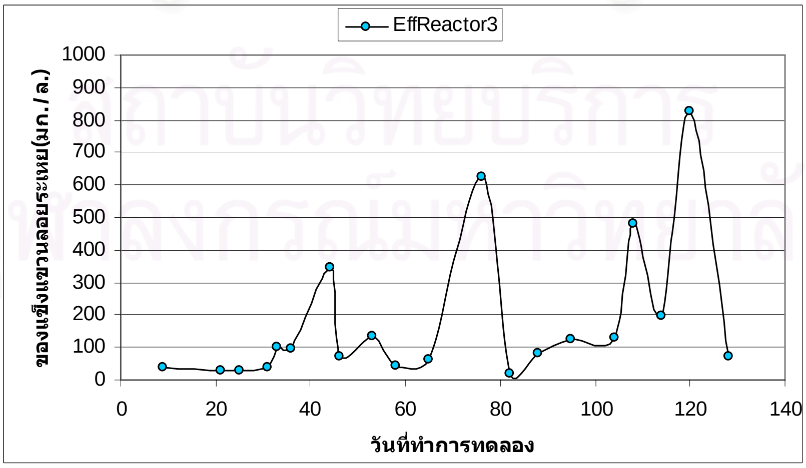
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยระเหย (การเดินระบบระยะยาว)

ผลการทดลองของของแข็งแขวนลอยระเหย โดยภาพรวมแล้วมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของของแข็งแขวนลอย จากรูปที่ 4.7 พบว่าของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์ มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 62 มก./ล. ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เท่ากับ 37.8 มก./ล. และ 38 มก./ล. ตามลำดับ

ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่หลุดออกจากระบบ มีมากที่สุดในถังปฏิกรณ์ที่ 1 เท่ากับ 45.1 มก./ล. ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 32.9 มก./ล. และ 32.5 มก./ล. ตามลำดับ

ในการเดินระบบระยะยาวตั้งแต่วันที่ 31 ถึงวันที่ 133 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ช่วงที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 มก./ล. ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 65 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ซึ่งเกิดจากการที่ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดเล็ก จากการที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์เพื่อช่วยในการรวมตัวของตะกอนเหมือนถังปฏิกรณ์อื่น หลังจากวันที่ 76 ระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 1 เริ่มปรับตัวได้ และมีปริมาณการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยที่น้อยลง โดยในช่วงท้ายของการเดินระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยที่น้อยกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ต่างกับถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยแล้วน้อยกว่าถังอื่นๆ แต่ในช่วงท้ายของการเดินระบบ กลับมีปริมาณการหลุดออกของแข็งแขวนลอยระเหยที่มากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 พอสมควร

ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 69 มีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยที่น้อย ซึ่งใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่ในวันที่ 70 ถึงวันที่ 76 ระบบมีปัญหาของแข็งแขวนลอยระเหยหลุดออกเป็นจำนวนมาก จนไม่สามารถเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จึงทำการลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลงมาที่ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ระบบจึงกลับมาเดินได้เป็นปกติ โดยมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยที่ต่ำ หลังจากนั้นในช่วงที่ระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน อีกครั้งในช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ก็กลับมามีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหยอีกเป็นปริมาณที่มาก คือเท่ากับ 394.7 มก./ล.

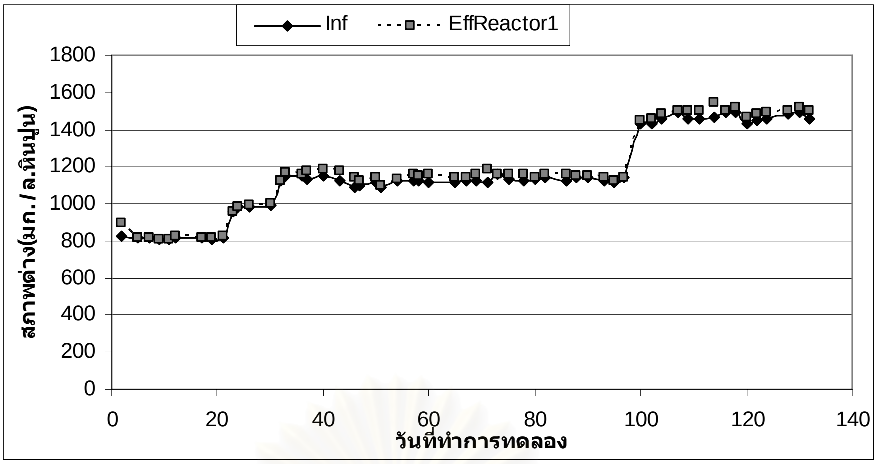
พบว่าระบบยูเอเอสบีสามารถเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยระเหย โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเดินระบบ

4.2.4 สภาพด่างทั้งหมด

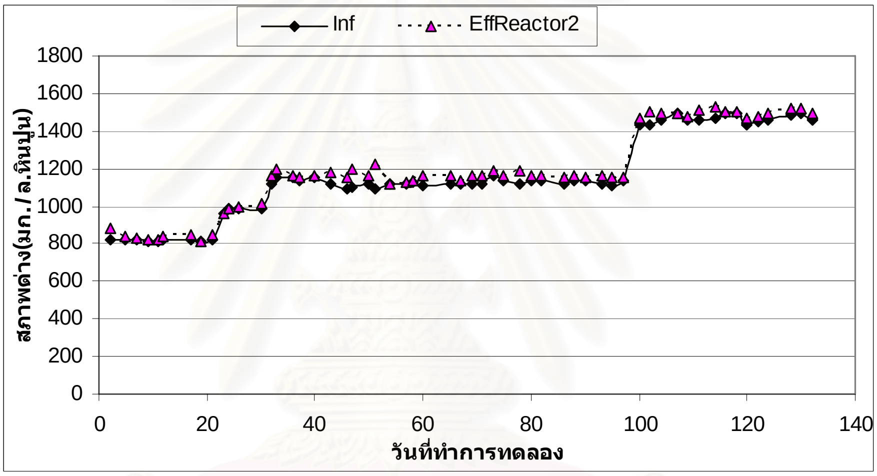
ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 817.5 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 830 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 867.3 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 875.4 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1125.4 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1151 มก./ล.หินปูน และมีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1463.9 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1494.9 มก./ล.หินปูน

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 817.5 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 838.3 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 867.3 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 885.2 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1125.4 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1162.8 มก./ล.หินปูน และมีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1463.9 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1495.9 มก./ล.หินปูน

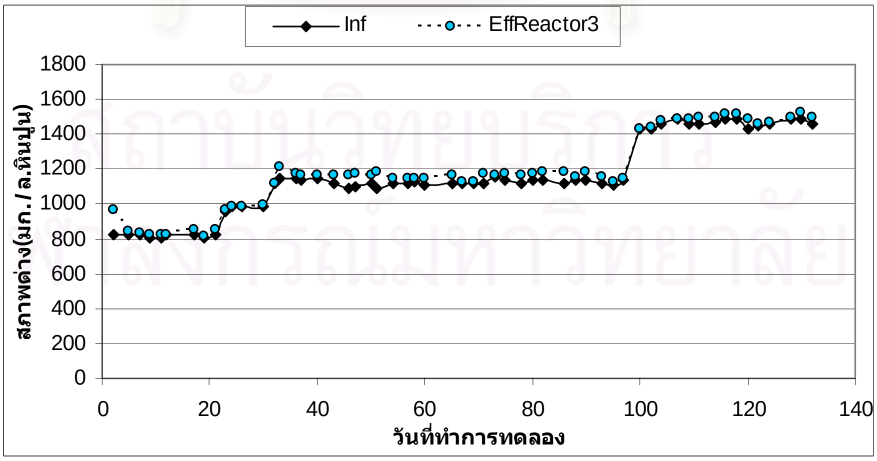
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 817.5 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 851.2 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 867.3 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 888.2 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1123.3 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1161.2 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1129.9 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1166 มก./ล.หินปูน มีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1441.7 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1450.7 มก./ล.หินปูน และมีสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1469.4 มก./ล.หินปูน ในน้ำออกเท่ากับ 1495.2 มก./ล.หินปูน



ก. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.8 สภาพด่างทั้งหมด (การเดินระบบระยะยาว)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.8 น้ำเสียเข้าระบบของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์เป็นน้ำเสียเดียวกัน จึงมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเท่ากัน ส่วนสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำออกตลอดการทดลอง ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำออก มีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยสภาพด่างทั้งหมดของน้ำออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเสียเข้าระบบ เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัดในระบบ จะเป็นการเพิ่มสภาพด่างไบคาร์บอเนตและคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับระบบด้วย ดังสมการต่อไปนี้

$$CH_3COO + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3$$

$$CH_3CH_2COO + 2H_2O + H \longrightarrow 1.75CH_4 + 1.25CO_2 + 1.5H_2O$$

4.2.5 กรดไขมันระเหย

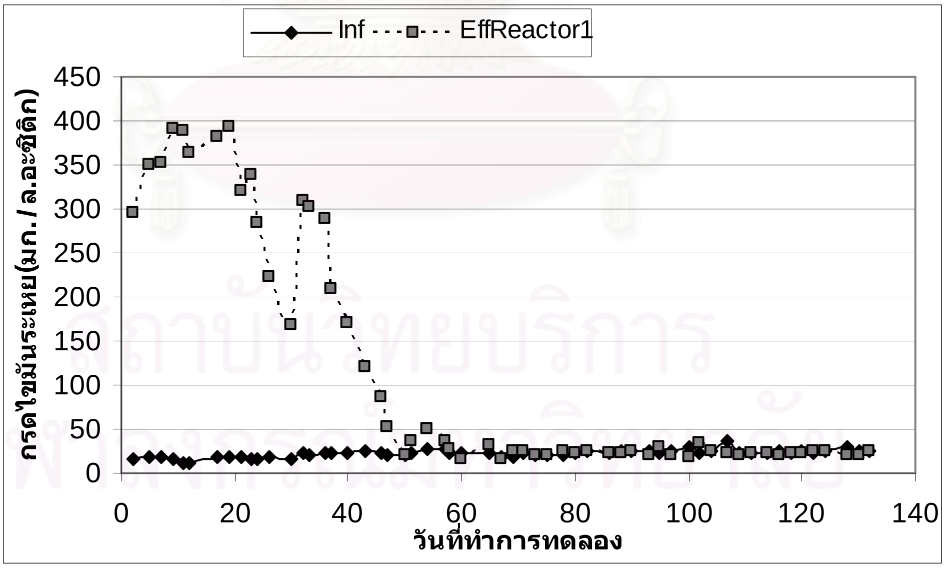
ในการทดลองนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล โดยทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ใช้น้ำเสียเดียวกันมีลักษณะเป็นน้ำใส เมื่อเตรียมมาใหม่ยังไม่ค่อยเกิดการหมักของน้ำตาล จึงไม่ค่อยมีปริมาณของกรดไขมันระเหย ในน้ำเสียเข้าระบบในช่วงที่ทำการเก็บตัวอย่าง โดยมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำเสียเข้าระบบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะมีมากขึ้นเรื่อยๆหลังจากทิ้งไว้ในถังพักน้ำเสียช่วงเวลาหนึ่ง

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกหาได้เท่ากับ 15 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 356.5 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 15.8 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 326.8 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 22.5 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 71.5 มก./ล.กรดอะซิติก และมีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 25.5 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 23 มก./ล.กรดอะซิติก

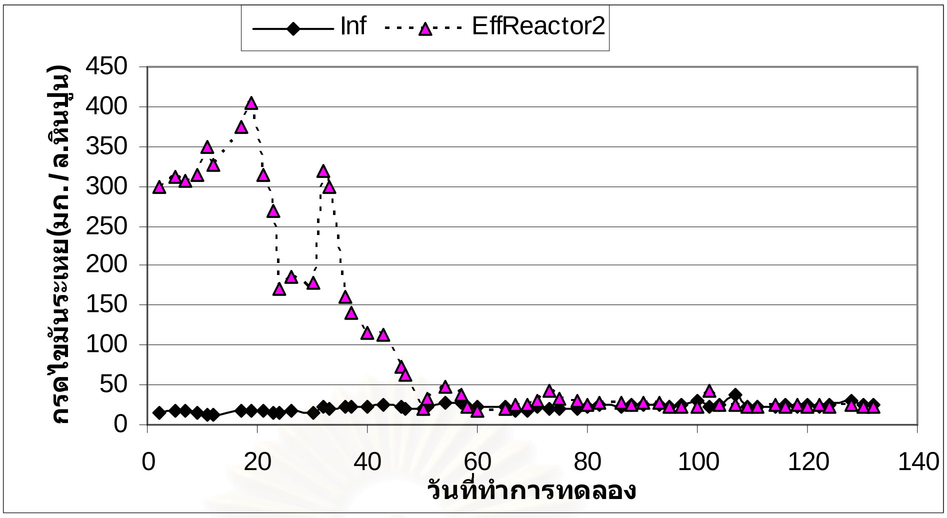
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกหาได้เท่ากับ 15 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 318.2 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 15.8 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 293 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 22.5 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 64.4 มก./ล.กรดอะซิติก และมีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์

4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 25.5 มก./ล.กรดอะซิติกในน้ำออกเท่ากับ 24.8 มก./ล.กรดอะซิติก

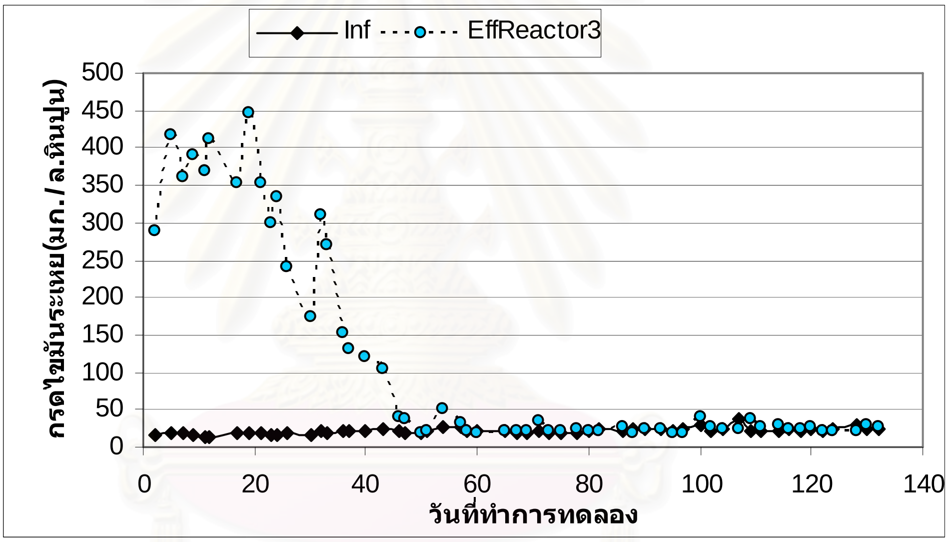
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกหาได้เท่ากับ 15 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 373 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 15.8 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 341.4 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 22 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 74 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 23.6 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 23.1 มก./ล.กรดอะซิติก มีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 25.8 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 30.8 มก./ล.กรดอะซิติก และมีกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 25.4 มก./ล.กรดอะซิติก ในน้ำออกเท่ากับ 26.9 มก./ล.กรดอะซิติก



ก. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.9 กรดไขมันระเหย (การเดินระบบระยะยาว)

จากรูปที่ 4.9 พบว่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำออกจากระบบ ช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้น ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีความสามารถในการกำจัดกรดไขมันระเหยได้ต่ำ จากผลการทดลองพบว่าค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกมากกว่าช่วงการทดลองอื่นๆ โดยถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกน้อยที่สุด หรือมีความสามารถในการกำจัดกรดไขมันระเหยได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์อื่น ทั้งนี้เทียบจากที่น้ำเสียเข้าเป็นน้ำเสียเดียวกัน โดยมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 318.2 มก./ล.กรดอะซิติก ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งไม่เติมโพลีเมอร์ มีค่ากรดไขมันระเหย

เฉลี่ยในน้ำออกเป็นอันดับรองมาเท่ากับ 356.5 มก./ล.กรดอะซิติก ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้งนั้น มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 373 มก./ล.กรดอะซิติก

ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีแนมโน้มเป็นเหมือนช่วง 2 สัปดาห์แรก คือถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกน้อยที่สุด รองลงมาเป็นถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ตามลำดับ

ในการเดินระบบระยะยาวตั้งแต่วันที่ 31 ถึงวันที่ 133 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน พบว่าทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยในน้ำออกน้อยลงกว่าช่วงแรก หรือมีความสามารถในการกำจัดกรดไขมันระเหยได้ดีขึ้น ทั้งนี้เทียบจากที่น้ำเสียเข้าเป็นน้ำเสียเดียวกัน โดยในช่วงกลางถึงช่วงท้ายของวันที่ทำการทดลอง ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำออกจากระบบของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีค่าใกล้เคียงกัน

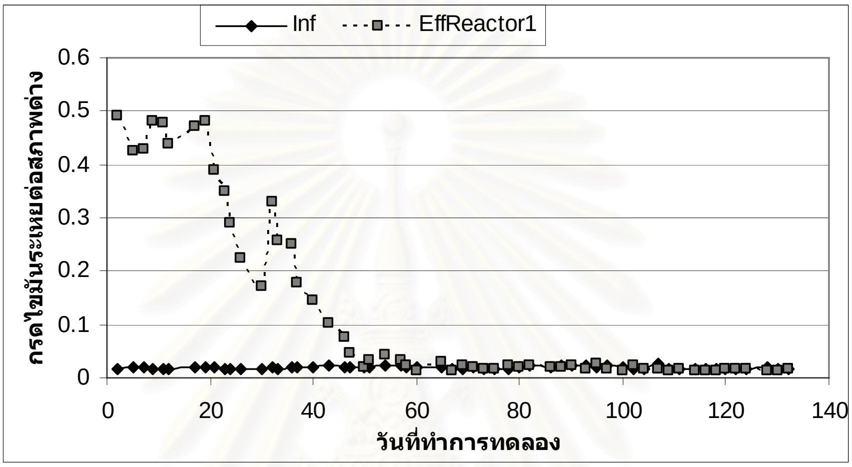
4.2.6 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 0.02 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.39 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.06 และมีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.02

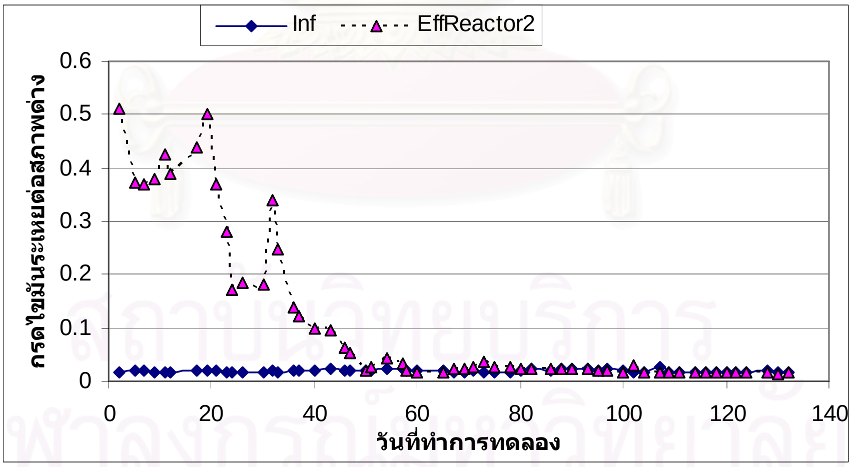
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 0.02 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.41 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.35 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.06 และมีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.02

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 0.02 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.47 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด

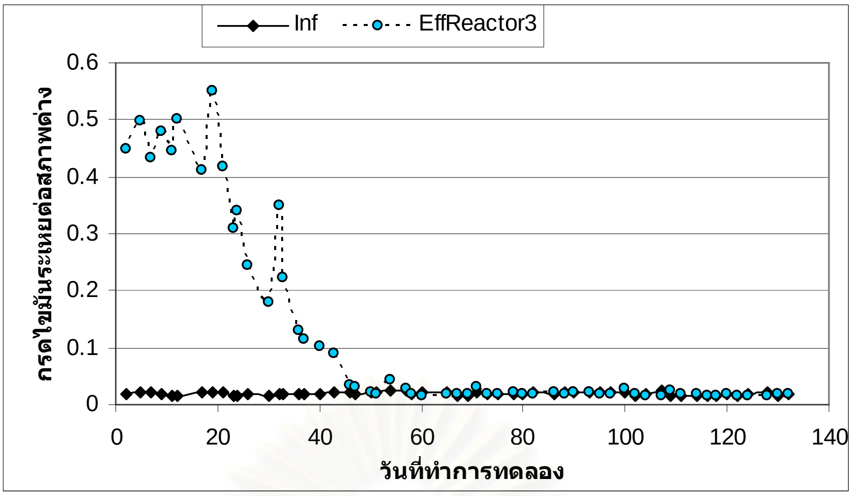
เฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.40 มีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.07 และมีกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยตลอดช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 133 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.02 ในน้ำออกเท่ากับ 0.02



ก. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.10 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด (การเดินระบบระยะยาว)

การตรวจสอบค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด ดังรูปที่ 4.10 เป็นการติดตามการทำงานของจุลินทรีย์ หากจุลินทรีย์ทำงานบกพร่องซึ่งอาจเกิดจากสภาพด่างและกรดไขมันระเหยไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน ทั้งนี้ขึ้นกับบัฟเฟอร์ของระบบว่าเพียงพอหรือไม่ โดยช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 21 ของการทดลอง มีการเติมบัฟเฟอร์โดยใช้สัดส่วน $NaHCO_3$: COD เท่ากับ 1 : 1 พบว่ามีหลายวันในการทดลอง ที่ค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่า 0.40 และค่าพีเอชในน้ำออกของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าต่ำกว่า 6.6 จึงเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับระบบ โดยตั้งแต่วันที่ 22 ของการทดลองเป็นต้นไป จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง จะใช้สัดส่วน $NaHCO_3$: COD เท่ากับ 1.2 : 1 พบว่าหลังจากเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบแล้ว ค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

4.2.7 พีเอช

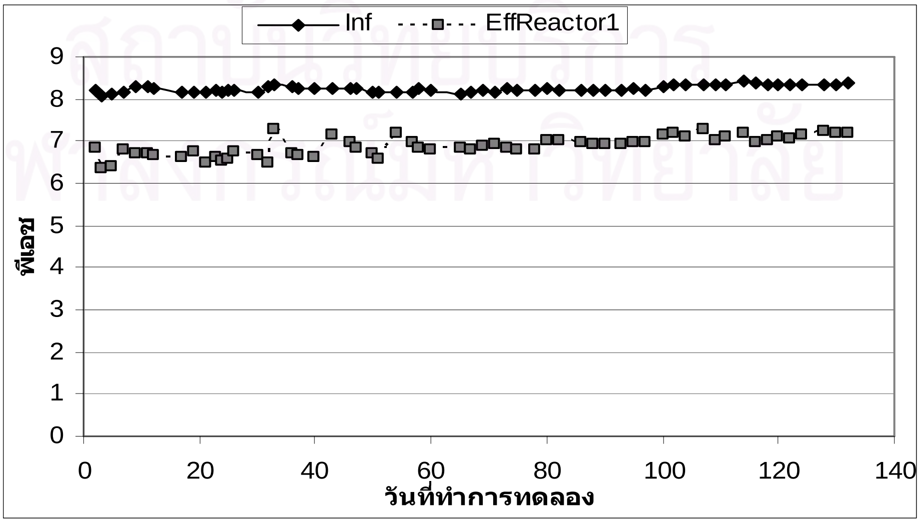
ในการทดลองนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล โดยทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ใช้น้ำเสียเดียวกันมีลักษณะเป็นน้ำใส เมื่อเตรียมมาใหม่ยังไม่ค่อยเกิดการหมักของน้ำตาล แต่เมื่อน้ำเสียอยู่ในถังพักน้ำเสียข้ามวัน จะเกิดการหมักของน้ำตาลขึ้นทำให้พีเอชลดต่ำลงอย่างมาก จึงใส่บัฟเฟอร์ลงไปในน้ำเสียเข้าระบบค่อนข้างมาก ทำให้มีค่าพีเอชในน้ำเสียเข้าระบบในช่วงที่ทำการเก็บตัวอย่างสูง

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 8.19 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.63 มีพีเอช

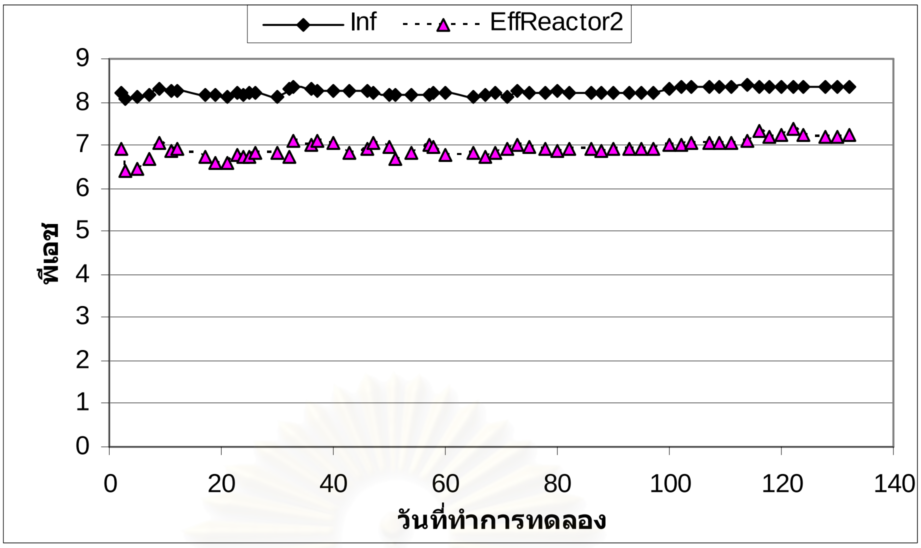
เฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.18 ในน้ำออกเท่ากับ 6.63 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.22 ในน้ำออกเท่ากับ 6.87 และมีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.35 ในน้ำออกเท่ากับ 7.13

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 8.19 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.76 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.18 ในน้ำออกเท่ากับ 6.74 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.22 ในน้ำออกเท่ากับ 6.91 และมีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.35 ในน้ำออกเท่ากับ 7.16

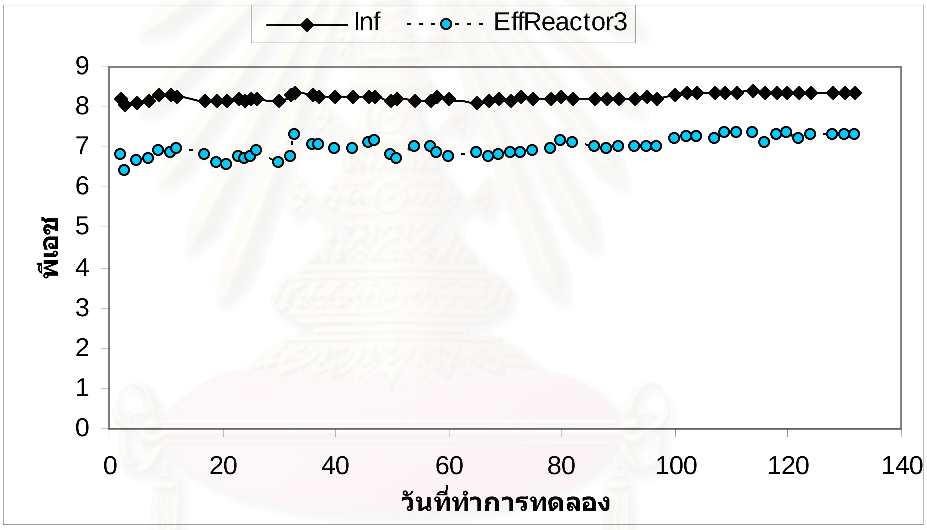
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 8.19 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.76 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.18 ในน้ำออกเท่ากับ 6.74 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.22 ในน้ำออกเท่ากับ 6.93 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 ก.ซีโอดี/ลิตร/วัน ช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.21 ในน้ำออกเท่ากับ 7.03 มีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.32 ในน้ำออกเท่ากับ 7.24 และมีพีเอชเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ในน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.36 ในน้ำออกเท่ากับ 7.29



ก. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 3

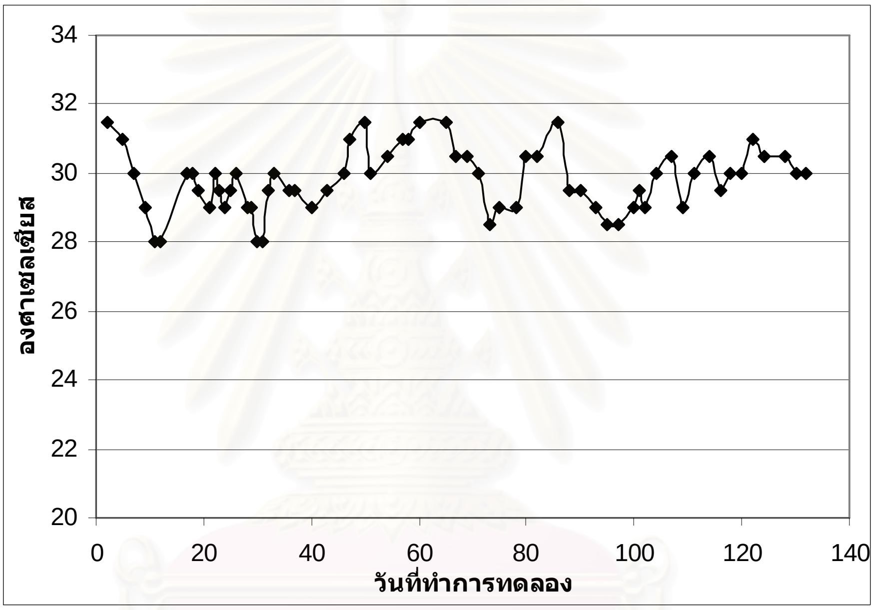
รูปที่ 4.11 พีเอช (การเดินระบบระยะยาว)

จากรูปที่ 4.11 ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 21 ของการทดลอง ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าพีเอชในน้ำออกที่ต่ำกว่า 6.6 อยู่หลายค่า รวมทั้งมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดที่สูงเกิน 0.40 หลายค่าเช่นกัน จึงทำการเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับระบบ ตั้งแต่วันที่ 22 ของการทดลอง จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง จะใช้สัดส่วน $NaHCO_3$: COD เท่ากับ 1.2 : 1 พบว่าค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำออกของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ดีขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำออกตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1 เท่ากับ 6.87 มีค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำออกตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 เท่ากับ 6.93 และมีค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำออกตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 เท่ากับ 6.98 ซึ่งตรงตามข้อสรุปของ

Speece (1996) ที่ว่า พีเอชควรอยู่ในช่วง 6.6 ถึง 8.2 ซึ่งจะเหมาะสมกับการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทน

4.2.8 อุณหภูมิ

การทดลองนี้ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ตั้งอยู่ที่บริเวณเดียวกัน โดยทำการติดตั้งชุดทดลองที่ระเบียงของห้องปฏิบัติการ 1701 ชั้นที่ 17 ตึกมหามกุฎ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกจากระบบยูเอเอสบีทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์จึงมีค่าเท่ากัน ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำออกช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 29.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 อุณหภูมิ (การเดินระบบระยะยาว)

จากรูปที่ 4.12 พบว่าอุณหภูมิของน้ำออกในระบบ แต่ละช่วงของการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 28 – 31.5 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในช่วง Mesophilic

4.3 ผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

การทดลองนี้มีถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง โดยเดินระบบต่อเนื่องจากการเดินระบบระยะยาวจากในช่วงการศึกษาผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี ซึ่งปัจจัยต่างๆของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ จะใช้เหมือนกับตอนก่อนสิ้นสุดการเดินระบบระยะยาว โดยเป็นการดำเนินระบบต่อไปในวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ของการทดลอง ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมในช่วง Post Test ถึงผลของการเติมสารอาหารเสริม คือ Ca, Ni และ Co ลงในระบบช่วงท้ายของการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาว่าการเติมสารอาหารเสริมเหล่านี้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จะมีผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบดีขึ้นกว่าเดิมได้มากน้อยเพียงใด โดยจะเป็นการเติมลงไปในทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ซึ่งการเติมสารอาหารเสริมเหล่านี้ จะเติมรวมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบในวันที่ 139 และวันที่ 143 ของการทดลอง การเติม Ca, Ni, Co นั้นจะใช้จากสารเคมี $CaCl_2(H_2O)_2$, $NiCl_2(H_2O)_6$ และ $CoCl_2(H_2O)_6$ ตามลำดับ เป็นการเลือกเติมที่ใช้สัดส่วนมาจาก Vanderbilt Media Solution จากตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงการเติมสารอาหารเสริมในหัวข้อนี้ ไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเติมสารอาหารเสริม (การเดินระบบช่วง Post Test)

วันที่เติมสารอาหาร	$CaCl_2(H_2O)_2$ (มก./ลิตร)	$NiCl_2(H_2O)_6$ (มก./ลิตร)	$CoCl_2(H_2O)_6$ (มก./ลิตร)
139	748	0.5	10
143	748	0.5	10

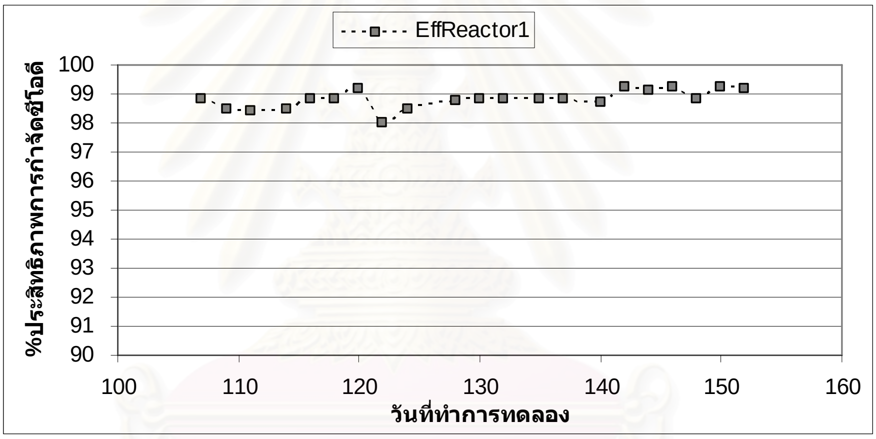
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.1 การกำจัดซีโอดี

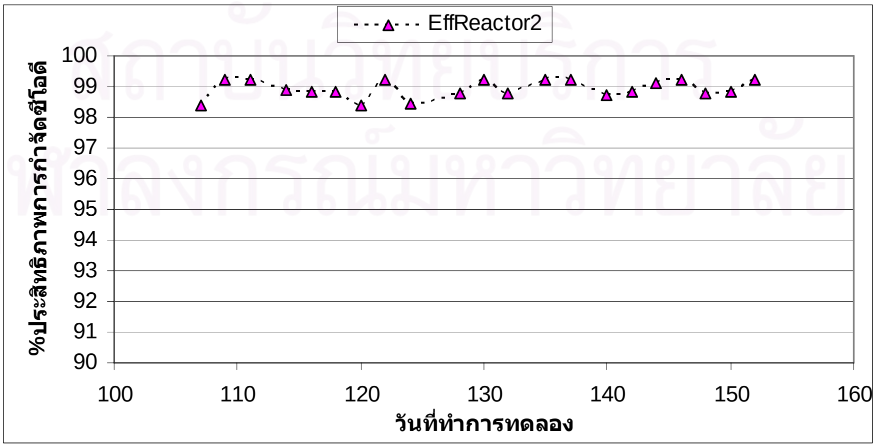
ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 2000 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 19.6 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 2000 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 19.6 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

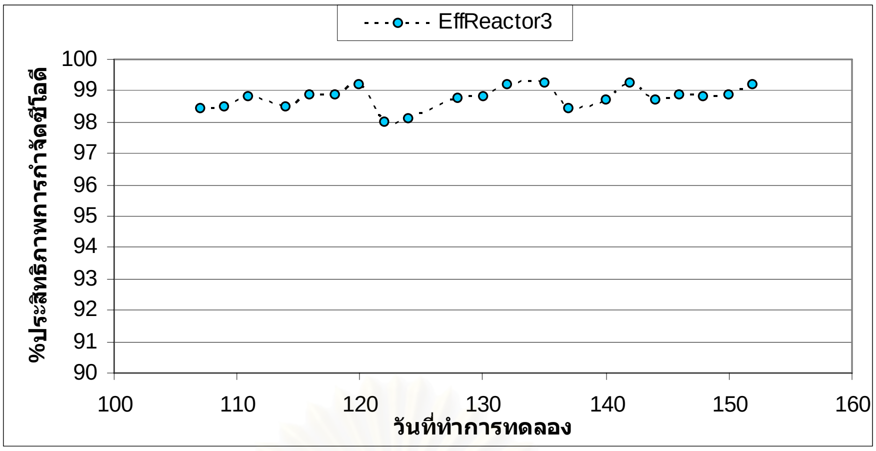
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 2000 มก./ล. น้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 22.2 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 98.9 เปอร์เซ็นต์



ก. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 2



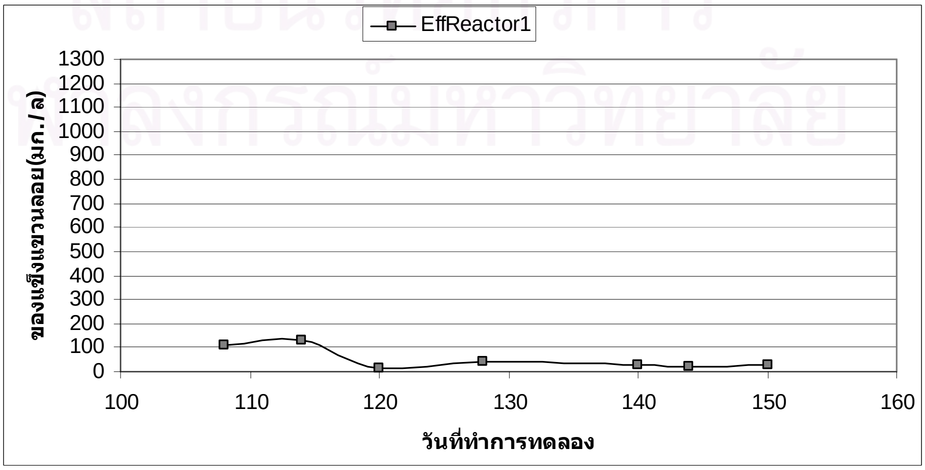
ค. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

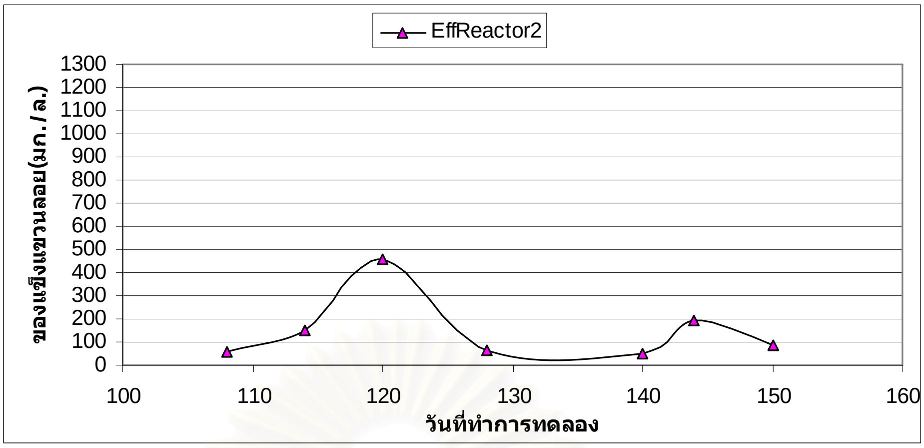
จากรูปที่ 4.13 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อเทียบกับระบบในช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมแล้ว ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ดีอยู่แล้ว

4.3.2 ของแข็งแขวนลอย

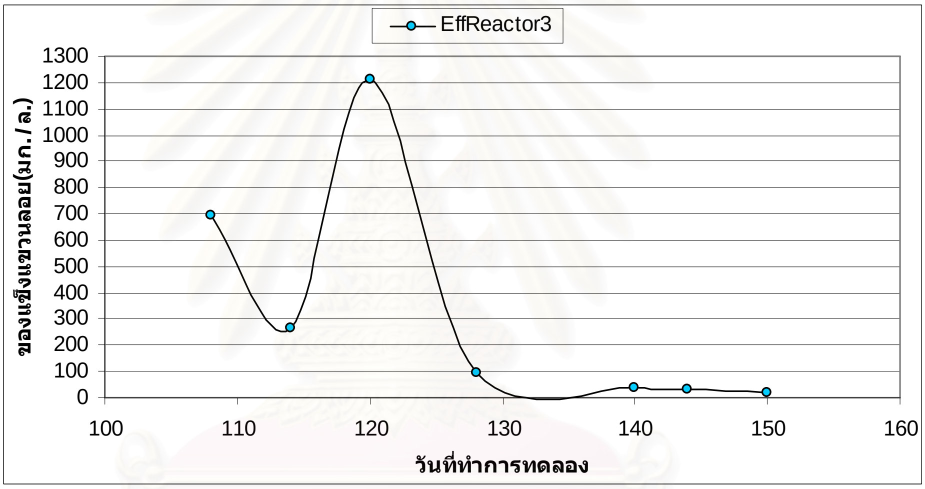
ในช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 23.8 มก./ล. ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 99.8 มก./ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 27 มก./ล.



ก. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



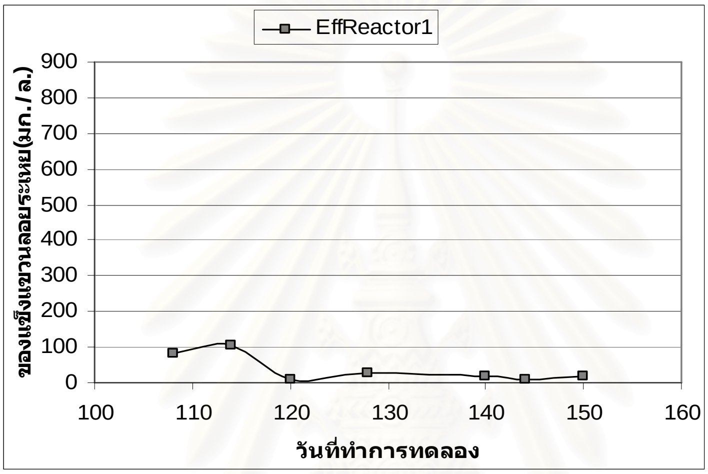
ค. ของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.14 ของแข็งแขวนลอย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

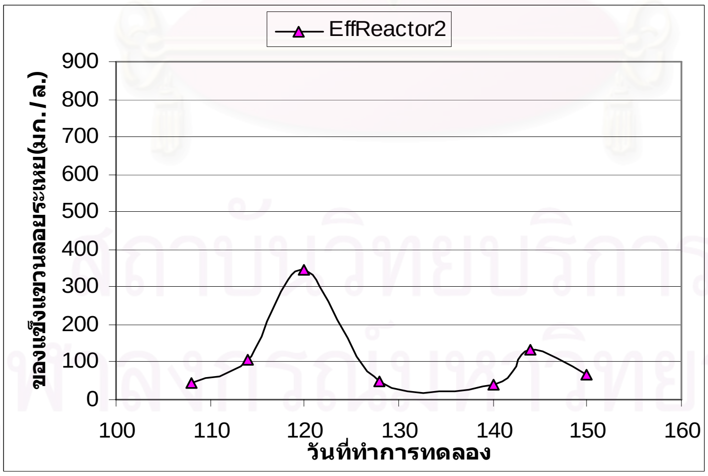
จากรูปที่ 4.14 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบ ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่หลุดออกจากระบบ น้อยลงกว่าช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมค่อนข้างชัดเจน แสดงว่าสารอาหารเสริมช่วยให้การจมตัวของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบดีขึ้น

4.3.3 ของแข็งแขวนลอยระเหย

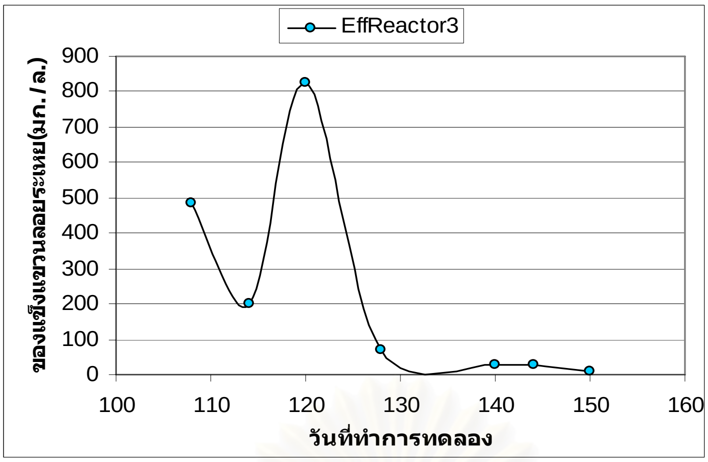
ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 16.5 มก./ล. ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 72.8 มก./ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 19.5 มก./ล.



ก. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



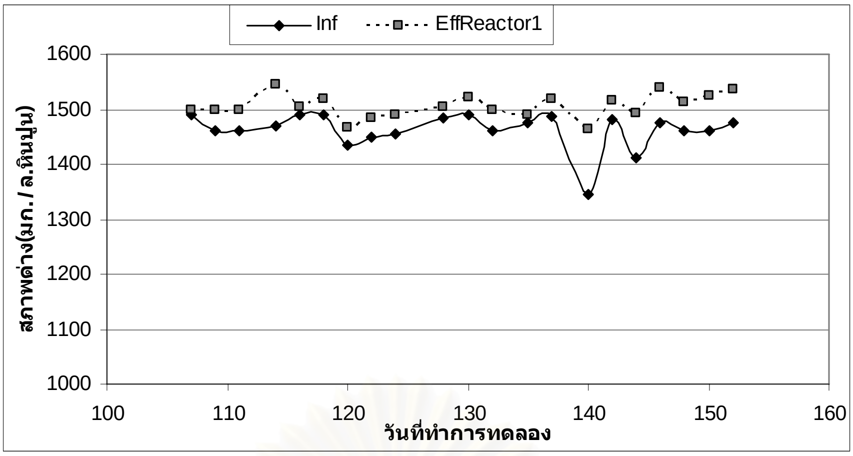
ค. ของแข็งแขวนลอยระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.15 ของแข็งแขวนลอยระเหย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

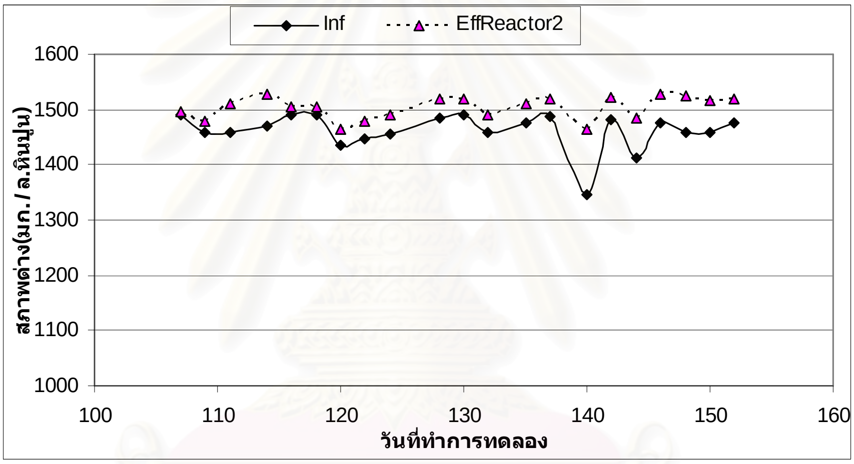
จากรูปที่ 4.15 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบ ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่หลุดออกจากระบบ น้อยลงกว่าช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมค่อนข้างชัดเจน แสดงว่าสารอาหารเสริมช่วยให้การจมตัวของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบดีขึ้น

4.3.4 สภาพด่างทั้งหมด

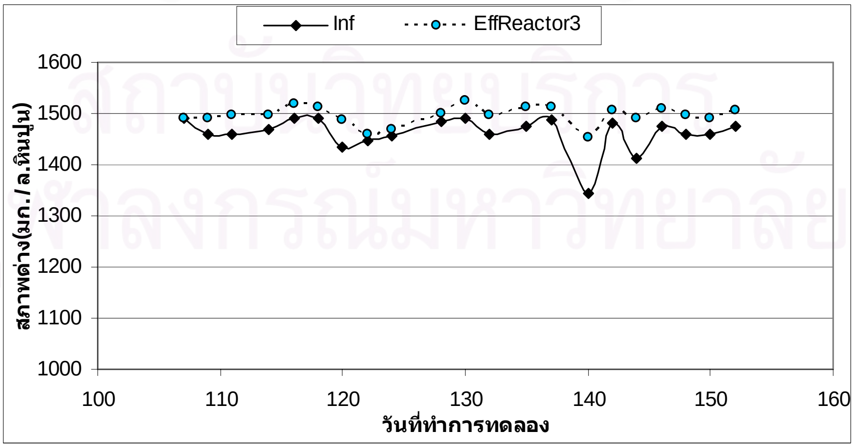
ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1452.4 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 1510.4 มก./ล.หินปูน ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1452.4 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 1510 มก./ล.หินปูน และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน สภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1452.4 มก./ล.หินปูน น้ำออกจากระบบมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 1497.1 มก./ล.หินปูน



ก. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. สภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 3

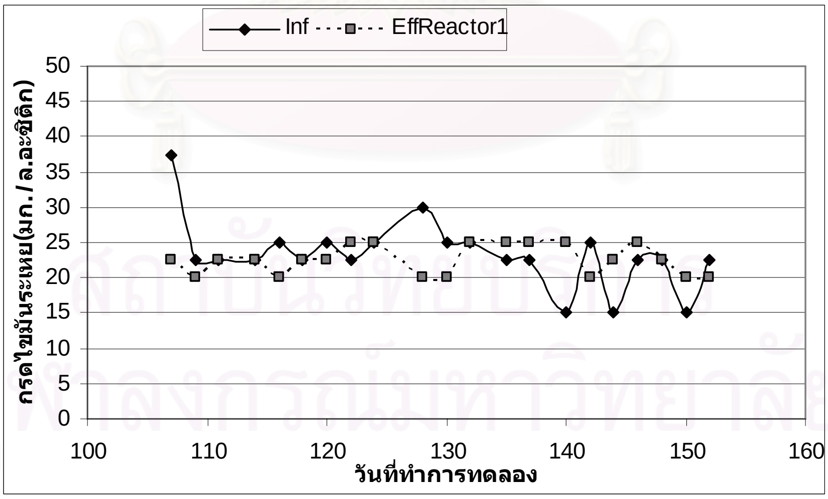
รูปที่ 4.16 สภาพด่างทั้งหมด (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

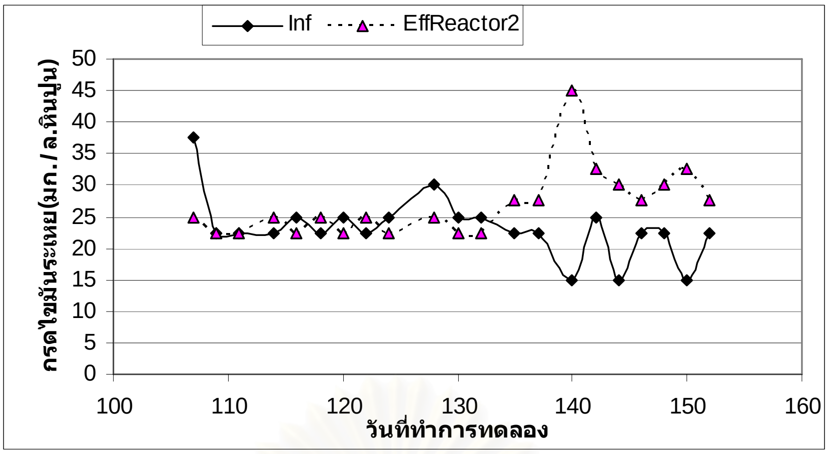
จากรูปที่ 4.16 พบว่าในวันที่เติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ สภาพด่างทั้งหมดในน้ำเสียเข้ามีค่าต่ำลงเล็กน้อย แต่ในน้ำออกจากระบบมีค่ำใกล้เคียงกับสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกเมื่อไม่มีการเติมสารอาหารเสริม โดยที่สภาพด่างทั้งหมดของน้ำออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเสียเข้าระบบ เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัดในระบบ จะเป็นการเพิ่มสภาพด่างไบคาร์บอเนตและ CO_2 ให้กับระบบด้วย ดังสมการที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.4

4.3.5 กรดไขมันระเหย

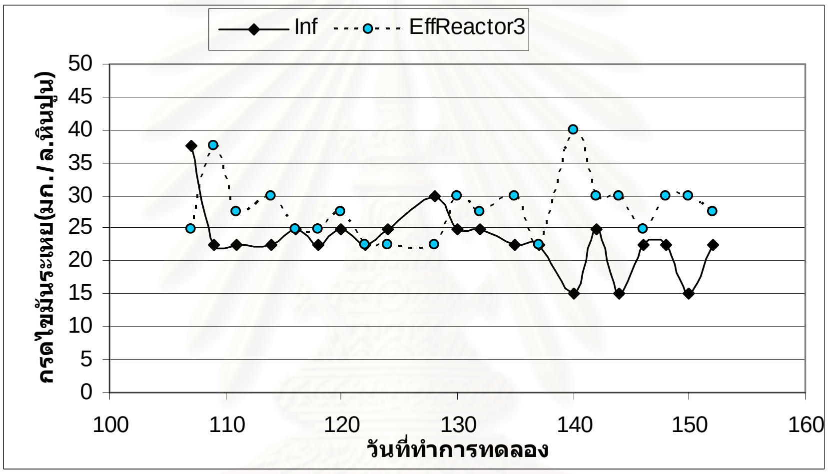
ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 20.3 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 22.8 มก./ล.กรดอะซิติก ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 20.3 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 31.1 มก./ล.กรดอะซิติก และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 20.3 มก./ล.กรดอะซิติก น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 29.4 มก./ล.กรดอะซิติก



ก. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



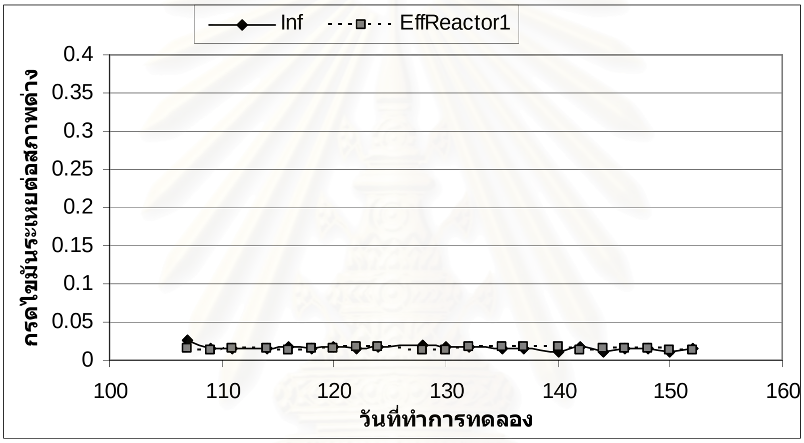
ค. กรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.17 กรดไขมันระเหย (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

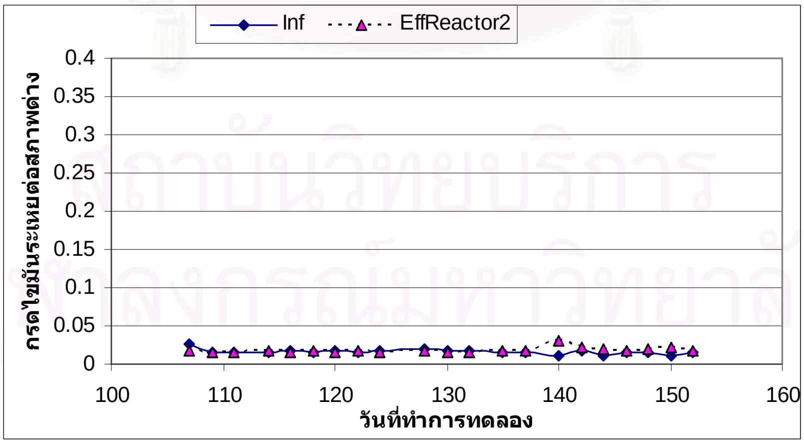
จากรูปที่ 4.17 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อเทียบกับระบบในช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมแล้ว ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ย ทั้งในน้ำเสียเข้าระบบ และในน้ำออกจากระบบ

4.3.6 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด

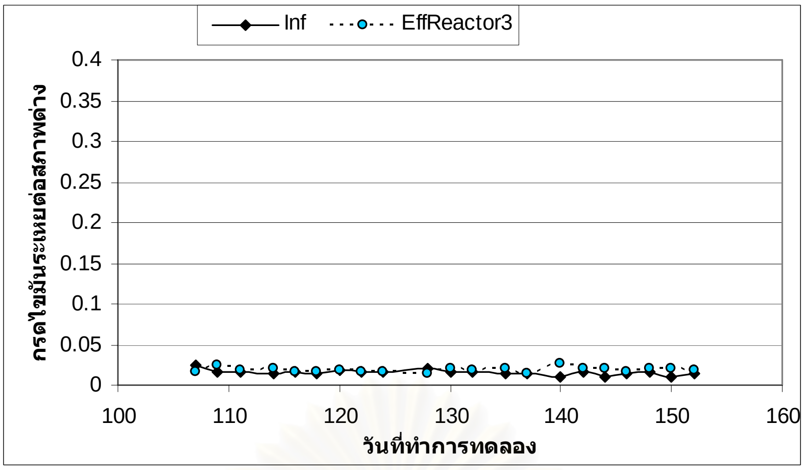
ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.01 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.02 ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.01 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.02 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.01 น้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.02



ก. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ค. กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่ 3

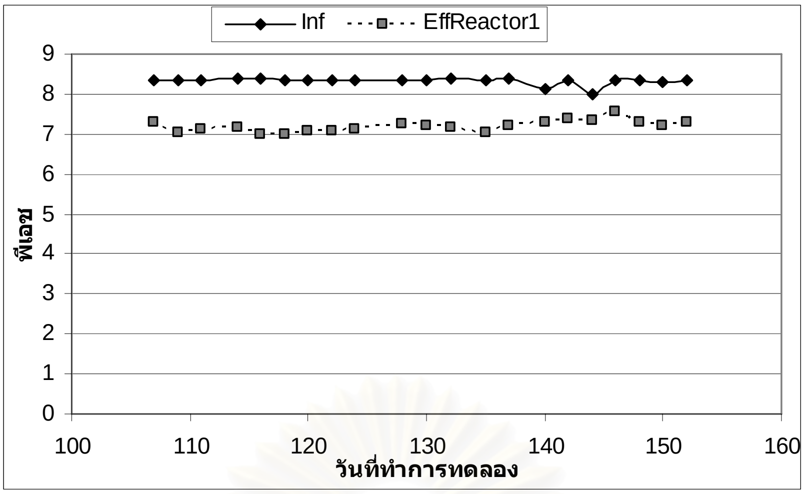
รูปที่ 4.18 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

จากรูปที่ 4.18 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อเทียบกับระบบในช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมแล้ว ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ย ทั้งในน้ำเสียเข้าระบบและในน้ำออกจากระบบ แสดงให้เห็นว่าระบบยูเอเอสบีที่มีการเติมสารอาหารเสริม มีกำลังบัฟเฟอร์ที่เพียงพอเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

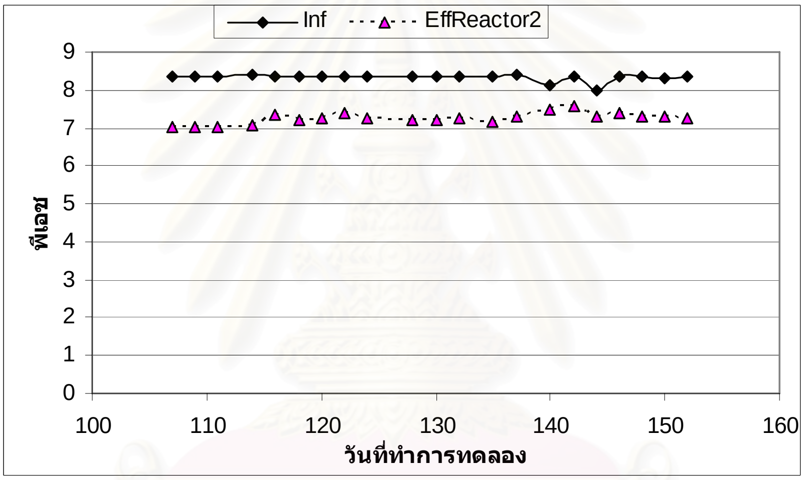
4.3.7 พีเอช

ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.29 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.29 ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.29 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.34 และถังปฏิกรณ์ ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.29 น้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.17

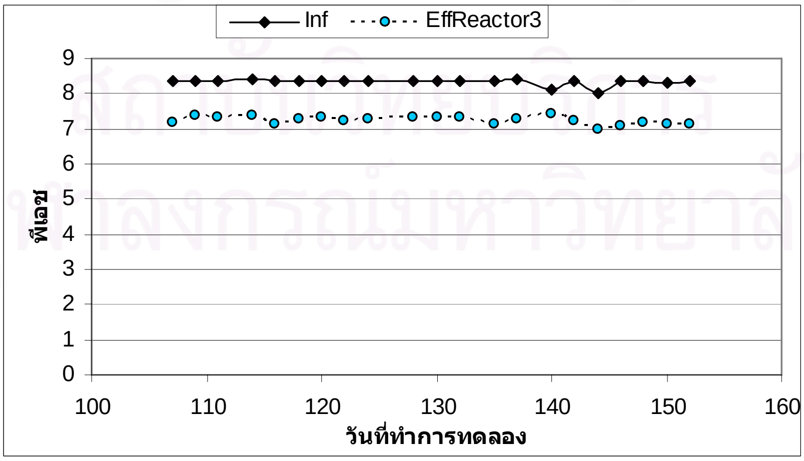
จากรูปที่ 4.19 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อเทียบกับระบบในช่วงก่อนเติมสารอาหารเสริมแล้ว ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเฉลี่ย ทั้งในน้ำเสียเข้าระบบและในน้ำออกจากระบบ โดยพีเอชเฉลี่ยยังคงมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทน



ก. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 2

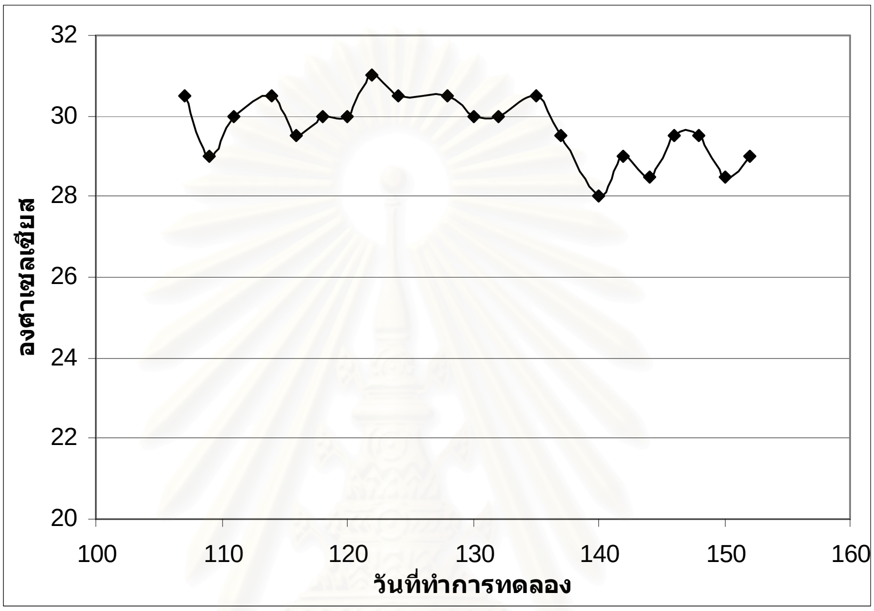


ค. พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.19 พีเอช (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

4.3.8 อุณหภูมิ

การทดลองนี้ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ตั้งอยู่ที่บริเวณเดียวกัน โดยทำการติดตั้งชุดทดลองที่ระเบียงของห้องปฏิบัติการ 1701 ชั้นที่ 17 ตึกมหามกุฎ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกจากระบบยูเอเอสบีทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์จึงมีค่าเท่ากัน ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำออกช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 เท่ากับ 29.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 อุณหภูมิ (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

จากรูปที่ 4.20 พบว่าอุณหภูมิของน้ำออกในระบบ หลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 28 – 30.5 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในช่วง Mesophilic

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลของการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบช่วง Post Test

การทดลองนี้ศึกษาถึงผลของการเติมโพลีเมอร์ ลงไปในระบบช่วงท้ายของการทดลอง โดยเดินระบบต่อเนื่องมาจากการศึกษาเรื่อง ผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี ซึ่งเป็นการทดลองในช่วงวันที่ 153 ถึงวันที่ 165 ของการเดินระบบ ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมในช่วง Post Test ว่าถ้ามีการเติมโพลีเมอร์อีกครั้ง หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาวจะมีความเหมาะสมหรือไม่และเป็นไปได้เพียงใด

วิธีการเติมโพลีเมอร์นั้นจะเติมเข้าไปในระบบโดยตรง ผ่านเครื่องสูบน้ำเสียเช่นเดียวกับการเติมโพลีเมอร์ ในช่วงที่มีการศึกษาเรื่องผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี โดยทำการเติมโพลีเมอร์ลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ในวันที่ 153 ของการทดลอง ซึ่งปริมาณโพลีเมอร์ที่เติมลงไปในทั้งสองถังจะเติมที่ Optimum Dose เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส

จากการที่ปริมาณความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีจำนวนลดลงไม่เท่ากับปริมาณในตอนเริ่มต้นเดินระบบ เนื่องจากมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยมาตลอดทุกช่วงของการทดลอง จึงต้องทำการคำนวณความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในระบบใหม่ ก่อนที่จะมีการเติมโพลีเมอร์ในหน่วย มก./ก.เอสเอส ซึ่งค่าความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีอยู่เท่ากับ 11.04 ก.เอสเอส/ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีเหลืออยู่เท่ากับ 4.13 ก.เอสเอส/ล. โดยแสดงการคำนวณความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ไว้ในภาคผนวก จ

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อเติมโพลีเมอร์ที่ค่า Optimum Dose ซึ่งเท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส เพราะฉะนั้นในน้ำหนึ่งลิตรมีตะกอนหัวเชื้อ 11.04 ก.เอสเอส ต้องเติมโพลีเมอร์ 22.08 มก. แต่ระบบมีส่วนย่อยสลายซึ่งมีปริมาตร 2.43 ลิตร จึงต้องเติมโพลีเมอร์ 53.65 มก./ถังปฏิกรณ์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อเติมโพลีเมอร์ที่ค่า Optimum Dose ซึ่งเท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส เพราะฉะนั้นในน้ำหนึ่งลิตรมีตะกอนหัวเชื้อ 4.13 ก.เอสเอส ต้องเติมโพลีเมอร์ 8.26 มก. แต่ระบบมีส่วนย่อยสลายซึ่งมีปริมาตร 2.43 ลิตร จึงต้องเติมโพลีเมอร์ 20.07 มก./ถังปฏิกรณ์ แสดงการเติมโพลีเมอร์ไว้ดังตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 การเติมโพลีเมอร์ (การเดินระบบช่วง Post Test)

วันที่เติมโพลีเมอร์	ปริมาณโพลีเมอร์ (มก./ถังปฏิกรณ์)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
153	-	53.6	20.1

หลังจากเติมโพลีเมอร์ลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ในวันที่ 153 แล้ว ในช่วงนี้จะหาค่าพารามิเตอร์เพียง 3 ค่า ซึ่งเป็นค่าที่คาดว่าจะเกิดความเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลของการเติมโพลีเมอร์อย่างชัดเจน นั่นคือ ของแข็งแขวนลอย, การขยายตัวของชั้นตะกอน และขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อศึกษาถึงผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ด

ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ในสัปดาห์สุดท้ายของงานวิจัยนี้ ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 64 มก./ล. ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 20 มก./ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าเท่ากับ 25 มก./ล. พบว่าไม่มีความแตกต่างไปจากค่าในช่วงของการเติมสารอาหารเสริมมากนัก

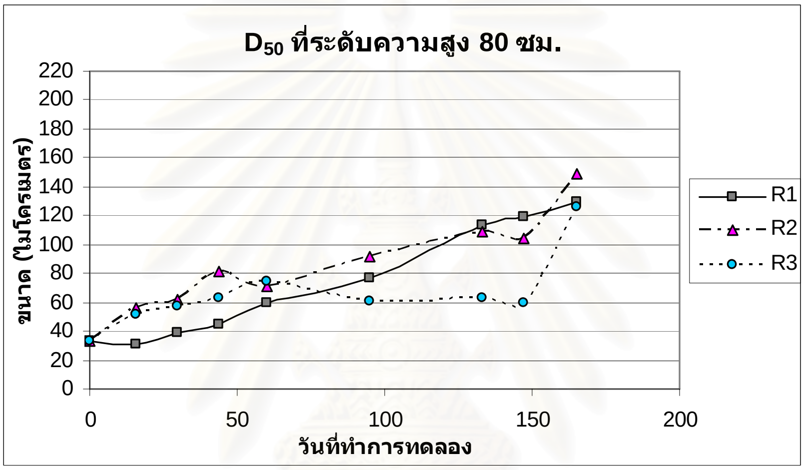
ส่วนข้อมูลของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และการขยายตัวของชั้นตะกอน จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับต่อไป และจะกล่าวสรุปรวมในเรื่องของการวิเคราะห์ผลไว้ในหัวข้อที่ 4.10 หัวข้อการวิเคราะห์ผลของการเติมสารอาหารเสริมและโพลีเมอร์ช่วง Post Test ต่อไป

4.5 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์

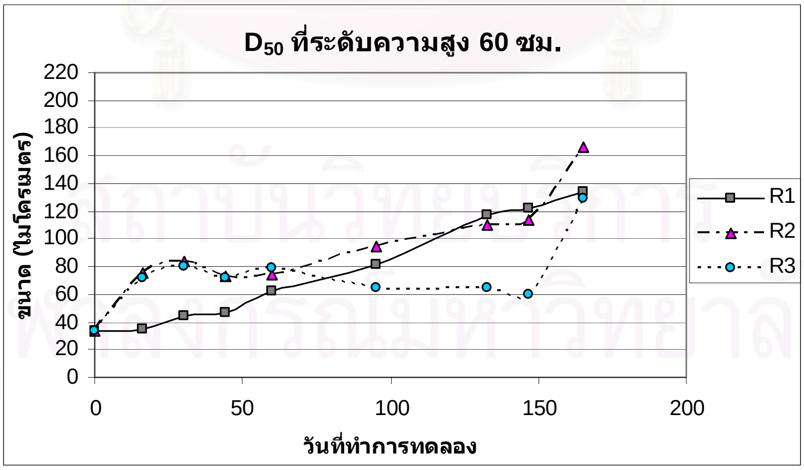
4.5.1 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การทดลองนี้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จากการที่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวัดขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จึงได้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบการกระจายขนาด โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer ในการวิเคราะห์ และเนื่องจากข้อมูลของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นการกระจายตามขนาดต่างๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จึงได้เลือกค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดทดลอง โดยเลือกค่า D(0.5) หรือ D_{50} ซึ่งเป็นขนาดที่มีขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเล็กกว่านี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด หรือเท่ากับว่าเป็นขนาดที่เป็นค่ากลางของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบ โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงของค่า D_{50} เพิ่มขึ้น แสดงว่าขนาด

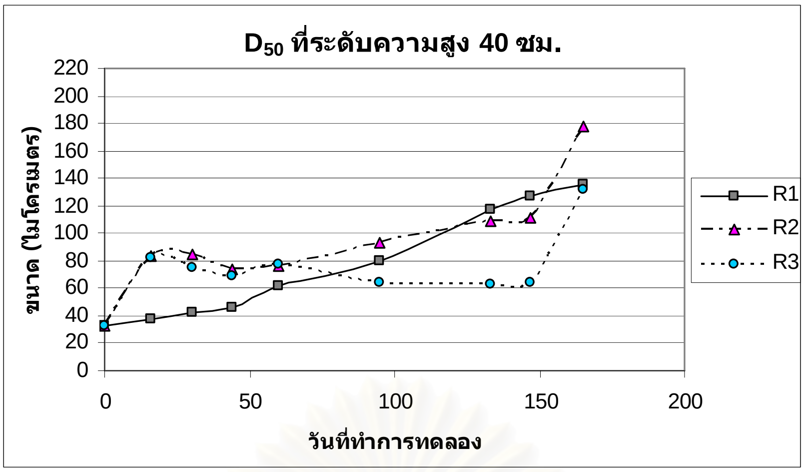
ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เป็นขนาดกลางของระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองนี้จะนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ไปวัดขนาดของเม็ดตะกอนทุกๆ 1 เดือนเริ่มตั้งแต่ตอนเริ่มต้นเดินระบบ หรือทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ โดยช่วงแรกของการเดินระบบที่มีการเติมโพลีเมอร์ จะมีการวัดขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มากกว่า 1 เดือนครั้ง เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของขนาดหลังจากเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบแล้ว โดยจะมีการเก็บตัวอย่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูง 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ม. จากก้นถังปฏิกรณ์ เพื่อเป็นตัวแทนการกระจายตัวของขนาดเม็ดตะกอนที่ระดับความสูงต่างๆของถังปฏิกรณ์ สามารถดูข้อมูล D_{50} ได้ในภาคผนวก ข



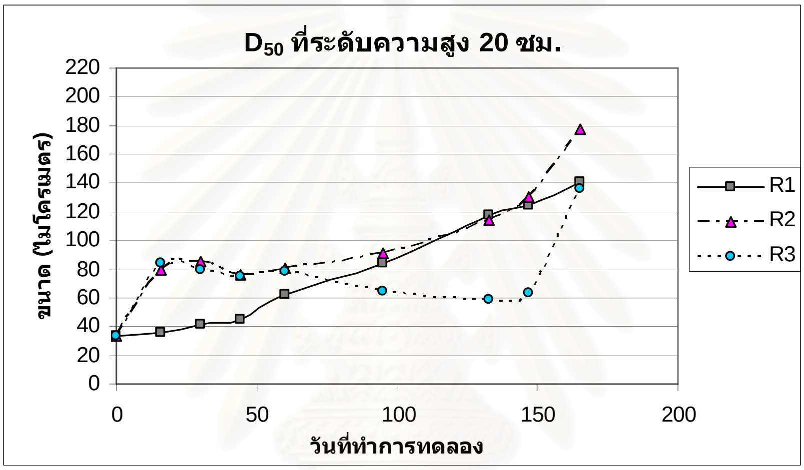
ก. D_{50} ที่ระดับความสูง 80 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์



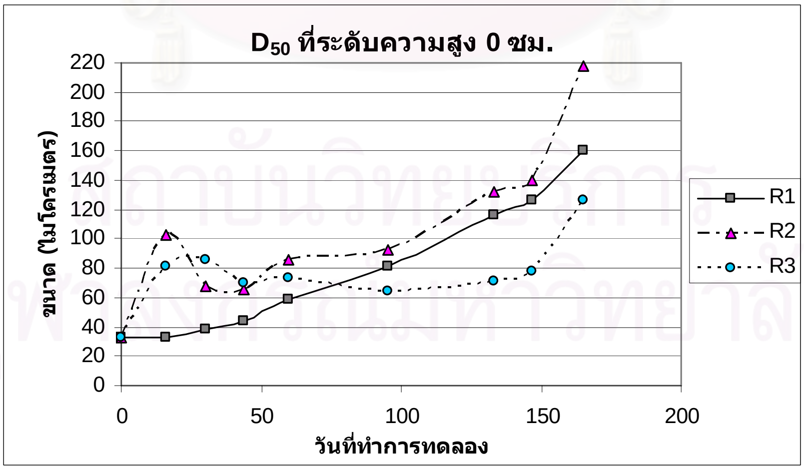
ข. D_{50} ที่ระดับความสูง 60 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์



ค. D_{50} ที่ระดับความสูง 40 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์



ง. D_{50} ที่ระดับความสูง 20 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์



จ. D_{50} ที่ระดับความสูง 0 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์

รูปที่ 4.21 D_{50} ที่ระดับความสูงต่างๆจากก้นถังปฏิกรณ์ (ตลอดการเดินระบบ)

จากรูปที่ 4.21 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ โดยถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 จะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีขนาดใหญ่กว่าตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบแต่ไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากที่ถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆตั้งแต่ช่วงวันที่ 77 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ระบบยูเอเอสบีในการทดลองนี้ จะรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามแต่ความสามารถของระบบที่จะสามารถรับได้ โดยการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งได้กล่าวถึงไว้แล้วในบทที่ 3 พบว่าเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากขึ้น ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย แสดงให้เห็นว่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ระดับความสูงของถังปฏิกรณ์แต่ละระดับ จะมีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แตกต่างกันแต่ไม่มากนัก โดยที่ระดับความสูง 0 ซม.และ 20 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นชั้น Sludge Bed จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดที่ระดับความสูง 40 ซม., 60 ซม.และ 80 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์เล็กน้อย ซึ่งขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูง 40 ซม., 60 ซม.และ 80 ซม. จากก้นถังปฏิกรณ์ จะมีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากสภาพความปั่นป่วนของน้ำในถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ทำให้ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์เหล่านี้ มีขนาดไม่แตกต่างกันมาก

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ ในช่วงต้นของการเดินระบบมีขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เล็กกว่าถังปฏิกรณ์อื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในวันที่ 16 ของการทดลองจะยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดในช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบ แต่ในระยะยาวแล้วขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์นี้จะมีพัฒนาการที่ดีกว่าถังปฏิกรณ์อื่น

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง หลังจากที่เติมโพลีเมอร์ครบ 2 สัปดาห์แล้ว พบว่าในวันที่ 16 ของการทดลอง ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยมีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์ทุกระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์ ส่วนในระยะยาวขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์นี้ มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีอัตราการเพิ่มที่น้อยกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง หลังจากที่เติมโพลีเมอร์ครบ 2 สัปดาห์แล้ว พบว่าในวันที่ 16 ของการทดลอง ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยมีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์ทุกระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์ ส่วนในระยะยาวขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์นี้ มีขนาดที่ไม่ใหญ่ขึ้นกว่าตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบมากนัก อาจเนื่องมาจากการที่ถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระ

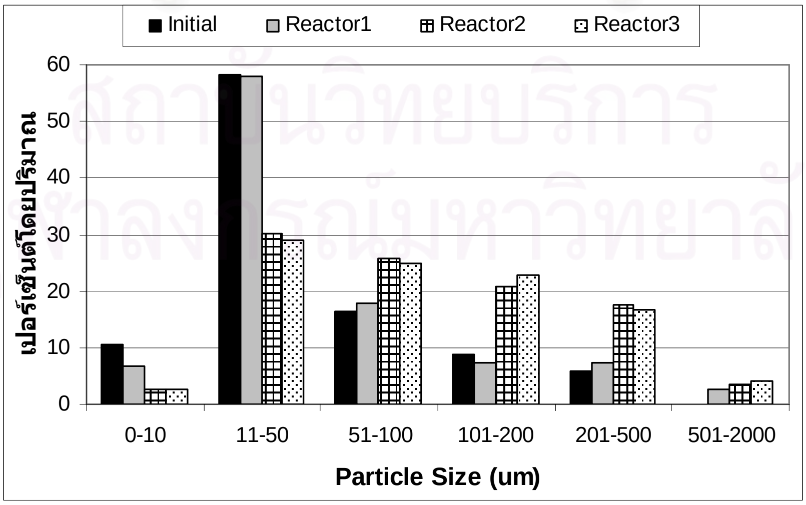
บรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆตั้งแต่ช่วงวันที่ 77 เป็นต้นไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

ในช่วงต้นของการเดินระบบนั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ต่างกัน พบว่าขนาดของตะกอนจุลินทรีย์ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แสดงว่าปริมาณโพลีเมอร์ที่เติมลงไปเท่ากัน แต่มีความถี่ในการเติมที่ไม่เท่ากันใน 1 สัปดาห์นั้น ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของขนาดตะกอนจุลินทรีย์

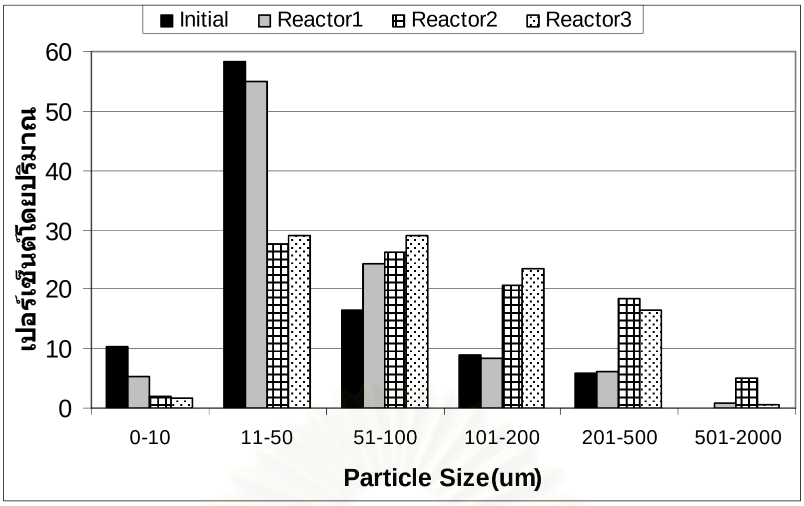
การเติมโพลีเมอร์ในระบบช่วง Post Test ในวันที่ 153 ของการทดลอง โดยเติมครั้งเดียวที่ปริมาณ 2 มก./ก.เอสเอสทั้งในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ทำให้พบว่าการเติมโพลีเมอร์หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาว สามารถทำให้ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าก่อนเติมโพลีเมอร์ โดยดูได้จากในวันที่ 165 ซึ่งเก็บตัวอย่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นครั้งสุดท้ายก่อนปิดระบบ ถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ 3 มีขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใหญ่ขึ้นกว่าช่วงก่อนเติมโพลีเมอร์ในวันที่ 147 ของการทดลองอย่างชัดเจน

แสดงว่าการเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบยูเอสเอสบี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีลักษณะใสนั้น สามารถช่วยทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดเม็ดตะกอนที่ใหญ่ขึ้นได้ในทันที

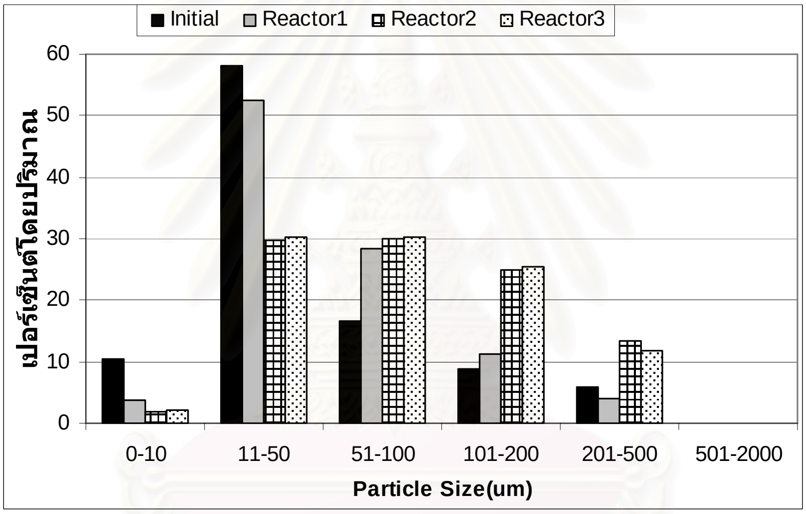
จากข้อมูลขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดทุกขนาด ในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บตัวอย่างนั้น จะสามารถนำมาทำเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณต่อขนาดตะกอนต่างๆได้ เพื่อให้เห็นภาพมากขึ้น โดยเลือกค่าขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์เป็นค่าตัวแทนของทุกความสูงในถังปฏิกรณ์ โดยจะนำมาเปรียบเทียบระหว่างขนาดตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ กับขนาดของวันที่ทำการทดลองอื่นๆ เพื่อแสดงถึงการพัฒนาการของขนาดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



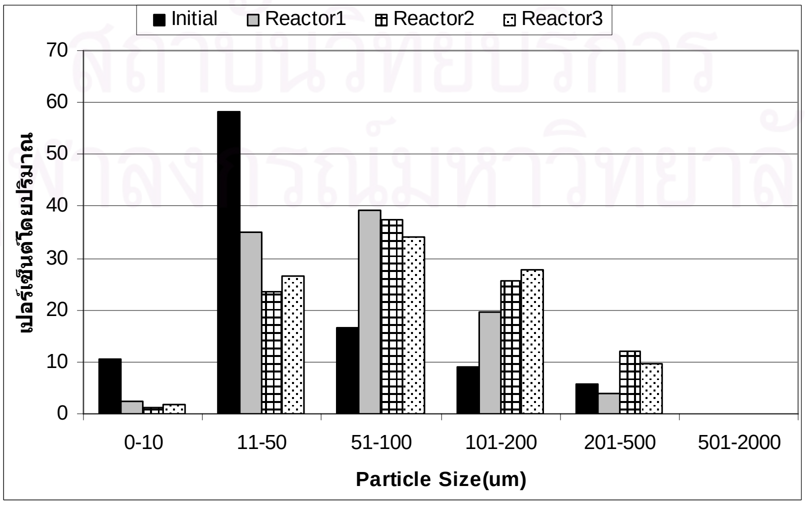
ก. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 16 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ



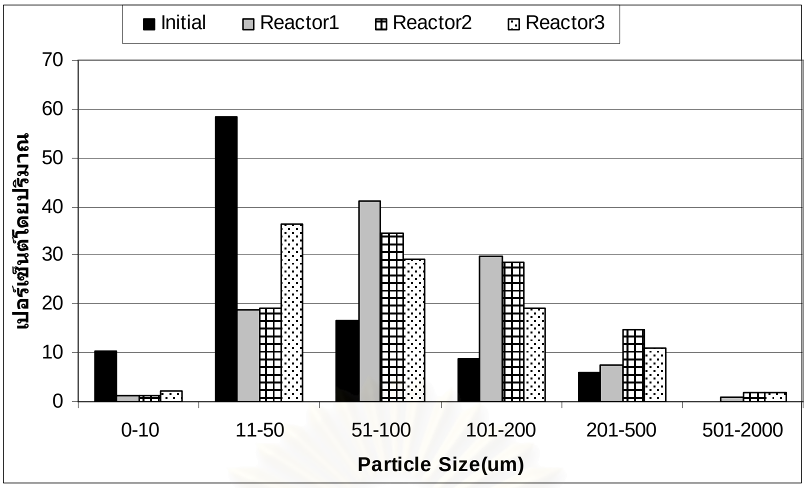
ข. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 30 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ



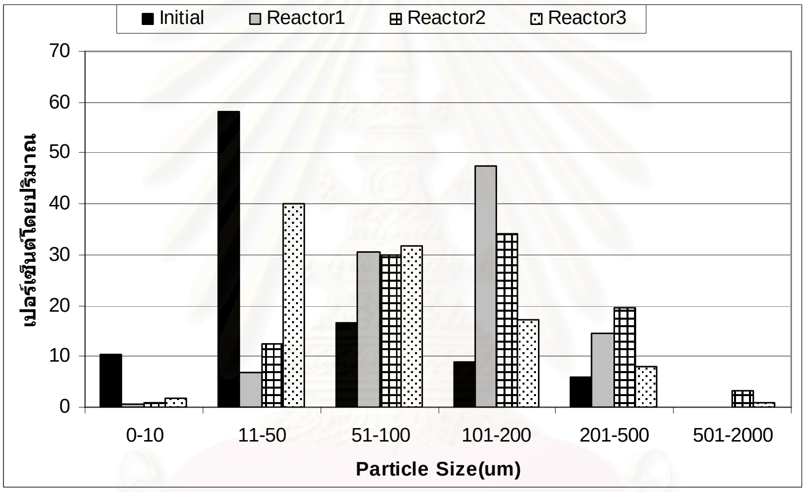
ค. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 44 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ



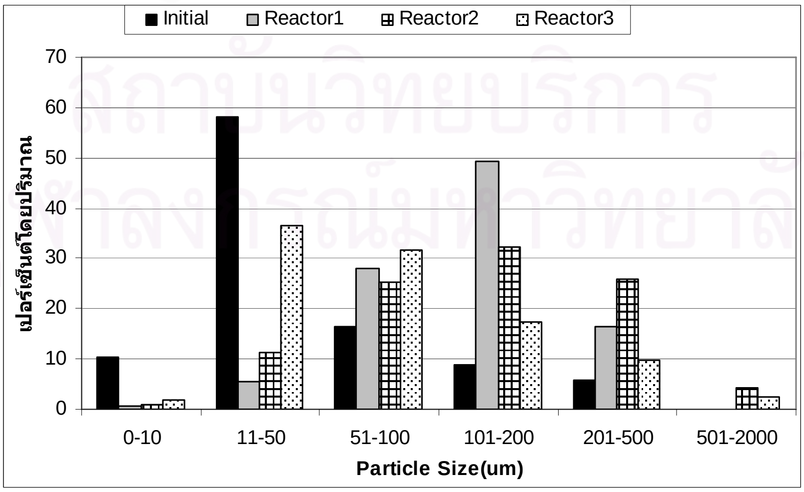
ง. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 60 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ



จ. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 95 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ

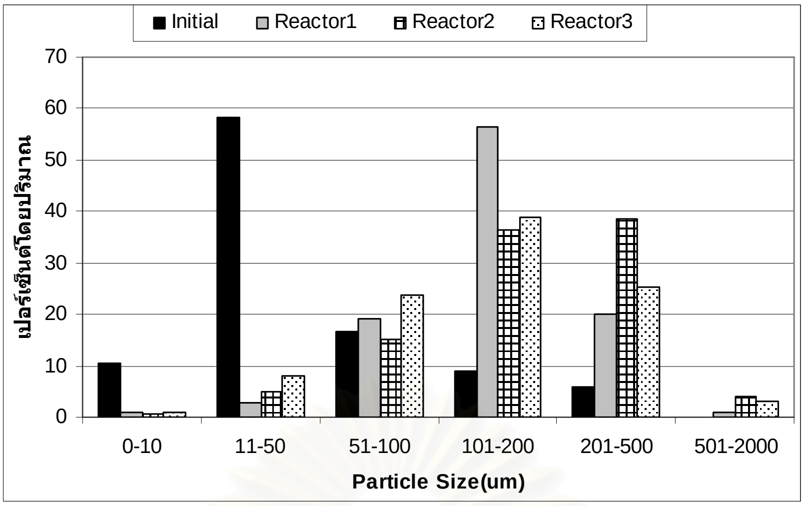


ฉ. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 133 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ



ช. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 147 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ซ. ขนาดทั้งหมดของวันที่ 165 เทียบกับขนาดทั้งหมดของวันที่เริ่มต้นเดินระบบ

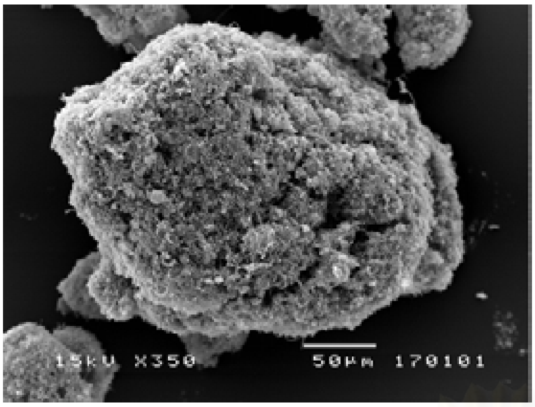
รูปที่ 4.22 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ตลอดการเดินระบบ)

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้น จะมีผลทำให้เม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อมีการเติมโพลีเมอร์ลงในระบบ จะทำให้ขนาดของเม็ดตะกอนใหญ่ขึ้นกว่าตอนก่อนเติมโพลีเมอร์อย่างเห็นได้ชัด โดยเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กจะมีปริมาณลดลง ส่วนเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณมากขึ้น เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นเดินระบบ

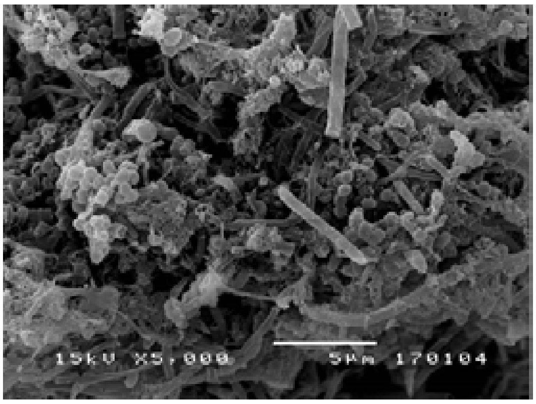
4.5.2 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของกลุ่มแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscope; SEM)นั้น เป็นตะกอนจุลินทรีย์จากระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์หลังสิ้นสุดการทดลอง โดยเลือกตะกอนจุลินทรีย์ที่ความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์ทั้งสาม เป็นตัวแทนของตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดของแต่ละถังปฏิกรณ์

ลักษณะภายนอกก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้น พบว่าเป็นตะกอนสีดำและมีลักษณะเป็น Floc และเป็นเม็ดเล็กๆอยู่รวมกัน เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าลักษณะภายนอกโดยทั่วไปมีหลายรูปแบบ มีทั้งแบบ Floc และแบบเม็ด โดยตะกอนจุลินทรีย์ในส่วนที่มีลักษณะเม็ดนั้นมีหลากหลายรูปร่าง ทั้งแบบทรงกลมและแบบทรงรี ซึ่งลักษณะที่พบเห็นส่วนมากจะมีลักษณะไม่กลมมากนัก โดยรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงสภาพภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ และเปรียบเทียบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยายต่างๆของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



ก.

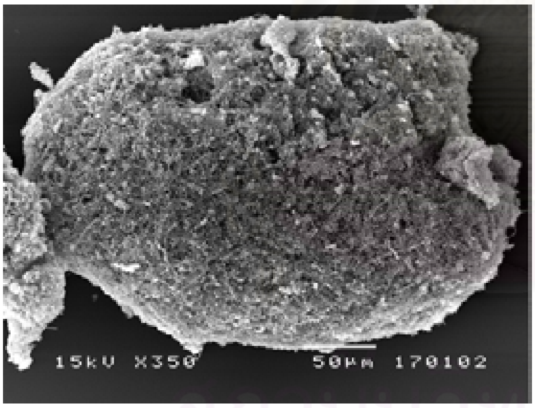


ข.

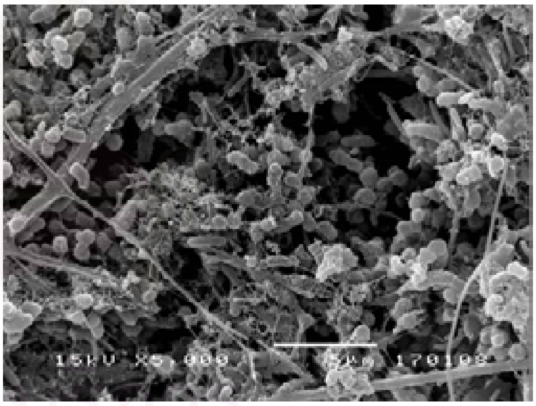
ก. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 350 เท่า

ข. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1 หลังการทดลอง



ก.



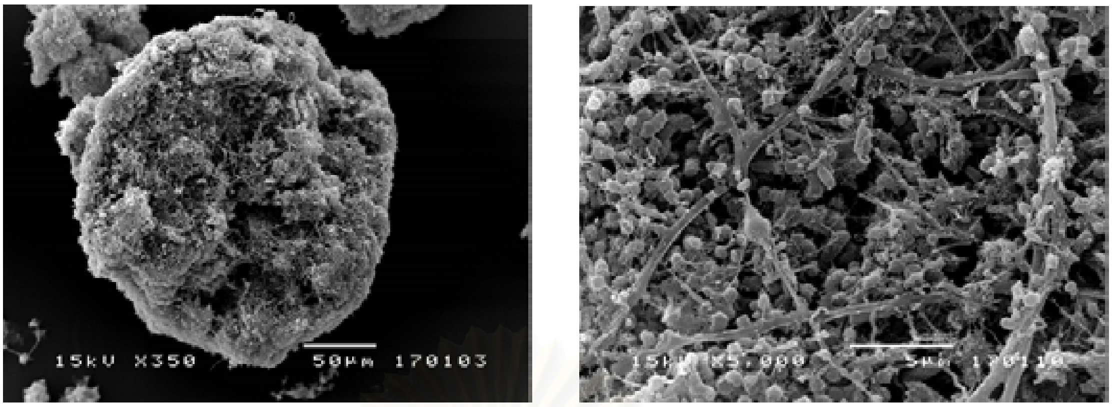
ข.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 350 เท่า

ข. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 2 หลังการทดลอง



ก. ข.

ก. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 350 เท่า

ข. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscrope; SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ 3 หลังการทดลอง

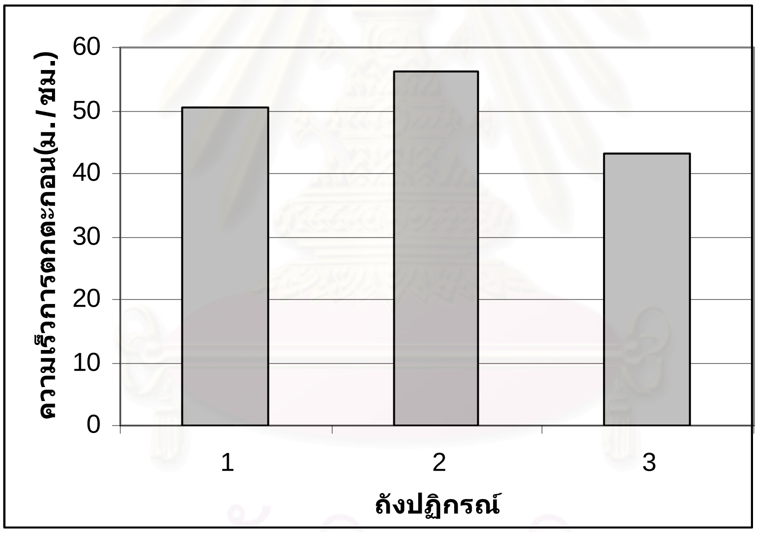
จากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างภายนอกของเม็ดตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 2 จะมีความหนาแน่นมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่น โดยรูปที่ 4.23 และ 4.25 จะแสดงให้เห็นได้ถึงสภาพภายนอกของเม็ดตะกอนที่มีโพรงอยู่ ทำให้ถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 จะมีสภาพภายนอกของเม็ดตะกอนโดยส่วนใหญ่มีความหนาแน่นน้อยกว่า โดยในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 จะมีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยรวมแล้วใหญ่กว่าขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ 3 เนื่องจากในช่วงหลังจากสิ้นสุดการทดลอง ถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ซึ่งเป็นปัจจัยทำให้มีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยรวมแล้วเล็กกว่าถังปฏิกรณ์อื่น

ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผิวภายนอกนั้น โดยทั่วไปในทุกชุดการทดลองมีลักษณะคล้ายกัน โดยจะมีแบคทีเรียหลายชนิดรวมกลุ่มกัน จากการสังเกตรูปร่างของเซลล์จุลินทรีย์ จะพบจุลินทรีย์ที่มีลักษณะรูปร่างแบบเส้นใย แบบกลม และแบบแท่ง เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแบคทีเรียที่พบนี้จะรวมตัวกัน โดยอาศัยการยึดเกาะด้วยแบคทีเรียที่เป็นเส้นใยกระจายอยู่ทั่วไป โดยแบคทีเรียที่มีรูปร่างแท่ง รูปร่างกลมและเป็นเกลียว จะเป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่สร้างกรด ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะมีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นแท่งมากกว่า

4.5.3 ความเร็วในการตกตะกอน

ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดยูเอเอสบีสามารถรวมตัวกันเป็นเม็ด เพื่อให้มีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่ายซึ่งจะทำให้ไม่หลุดออกไปจากถังปฏิกรณ์ โดยการตกตะกอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเม็ดตะกอน ซึ่งน้ำหนักเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่มาจับกับเม็ดตะกอนทำให้มีขนาดที่ต่างกัน

การทดลองนี้นำตะกอนจุลินทรีย์จากระยะความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์ของทั้งสามถังปฏิกรณ์ มาเป็นตัวแทนของตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งตัวอย่างที่ใช้นั้นอยู่ในช่วงสุดท้ายของการเดินระบบ โดยนำตะกอนจุลินทรีย์ 50 มล. มาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 5 นาที แล้วเอาส่วนน้ำใสทิ้งไป หลังจากนั้นนำส่วนที่เป็นตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดเทลงในกระบองตวง 1000 มล. แล้วทำการจับเวลาในการตกตะกอน ทำให้ทราบถึงความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยใช้กลุ่มเม็ดตะกอนกลุ่มแรกๆที่มีความสามารถในการตกตะกอนดีที่สุด เป็นตัวแทนของการทดลองนี้



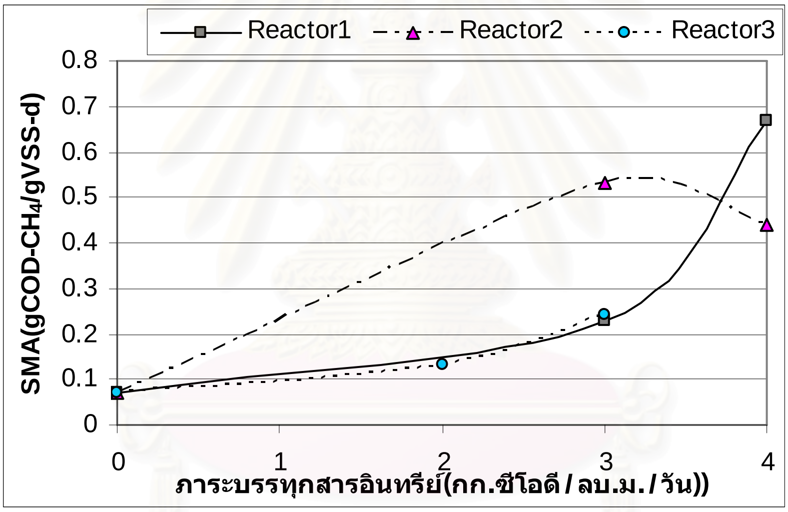
รูปที่ 4.26 ความเร็วในการตกตะกอนของแต่ละถังปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.26 พบว่าทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีความเร็วในการตกตะกอน ของตะกอนจุลินทรีย์กลุ่มที่ตกตะกอนได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีความเร็วในการตกตะกอนต่ำสุด เนื่องจากว่าในช่วงท้ายของการทดลองนั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ ทำให้ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยเฉลี่ยมีขนาดเล็กกว่า จึงส่งผลทำให้มีความเร็วในการตกตะกอนที่ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ

4.5.4 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน

ศึกษาถึงความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity, SMA) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ โดยเป็นการศึกษาถึงความสามารถของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ว่ามีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากน้อยเพียงใด โดยดูจากอัตราการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งแบคทีเรียที่มีอัตราการสร้างก๊าซมีเทนสูง จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง

การทดลองนี้จะนำเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์ เป็นตัวแทนของตะกอนทั้งหมดของแต่ละถังปฏิกรณ์ ในการหาความสามารถการสร้างก๊าซมีเทนของตะกอน โดยจะทำการหาค่าตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ และหลังการทดลองในแต่ละช่วงที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน ซึ่งได้แสดงวิธีการหาค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนไว้ในภาคผนวก ฉ



รูปที่ 4.27 ค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน

จากรูปที่ 4.27 พบว่าค่า SMA ของแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าแตกต่างกัน โดยตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ ค่า SMA จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งตรงกับข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในช่วงแรกของการเดินระบบที่มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมาก เนื่องจากในช่วงแรกของการเดินระบบนั้นจุลินทรีย์มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำ แสดงว่าจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จากถังย่อยสลายแบบไร้อากาศของโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง มีความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนที่น้อย

หลังจากนั้นเมื่อทำการเดินระบบได้ระยะเวลาหนึ่ง พบว่าจุลินทรีย์ในระบบเริ่มปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมในน้ำเสียได้แล้ว ทำให้จุลินทรีย์มีค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนสูงกว่าในช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบ จากข้อมูลทั้งหมดพบว่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนของ

ตะกอนจุลินทรีย์ หลังจากปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมในน้ำเสียได้แล้วนั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13 - 0.67 ก.ซีโอดี-มีเทน/ก.วีเอสเอส-วัน ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลของ Gonzalez-Gil และคณะ (2001)ที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งอาหาร โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 - 0.6 ก.ซีโอดี-มีเทน/ก.วีเอสเอส-วัน

4.6 การขยายตัวของชั้นตะกอน

4.6.1 เดินระบบระยะยาว

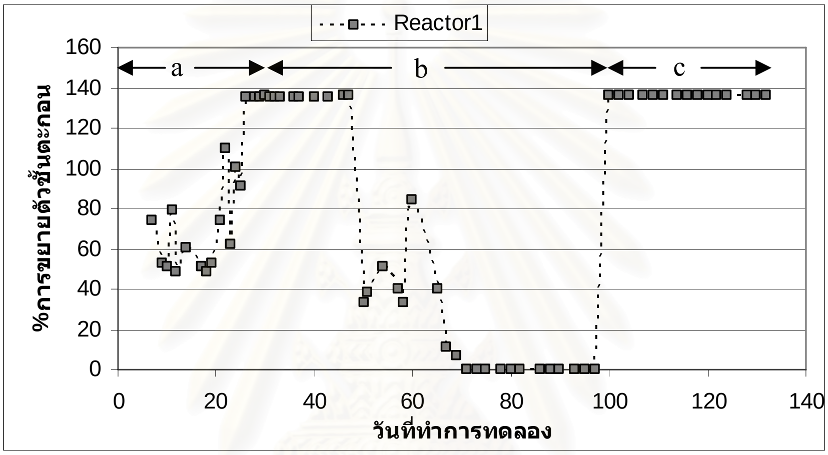
ในการทดลองเมื่อเริ่มดำเนินระบบ จะใส่ตะกอนหัวเชื้อลงไปในถังปฏิกรณ์ทั้งสามถัง เมื่อทิ้งไว้ในถังปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.4 ซม. มีความสูงส่วนย่อยสลาย 1.06 เมตร ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ตะกอนหัวเชื้อในระบบจะอัดตัวลงมา จนมีความสูงชั้นตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 45 ซม. ดังนั้นจึงให้ระดับความสูง 45 ซม. เป็นระดับเริ่มต้นของการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ จะเกิดการขยายตัวของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น ก็จะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนส่วนที่ขยายตัวเกินไปจากระดับอ้างอิงนี้ วิธีการคำนวณการขยายตัวของชั้นตะกอน ก็จะเทียบที่ระดับเริ่มต้นคือ 45 ซม. เป็นความสูงระดับอ้างอิงเท่ากับมีการขยายตัวศูนย์เปอร์เซ็นต์ สมมุติว่าถ้าวัดการขยายตัวของชั้นตะกอนได้ว่า มีการขยายตัวเต็มถังปฏิกรณ์ซึ่งเท่ากับ 106 ซม. หรือมีการขยายตัวไปจากระดับอ้างอิงเท่ากับ 61 ซม. ก็จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเฉลี่ยในระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 61 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 83.2 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 51.9 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

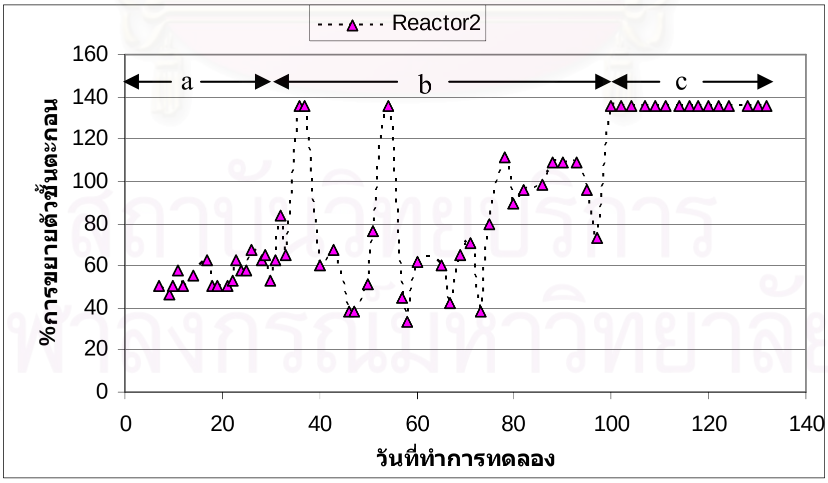
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเฉลี่ยในระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 51.9 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 55.9 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 77.8 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเฉลี่ยในระบบช่วง 2 สัปดาห์แรกเท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30

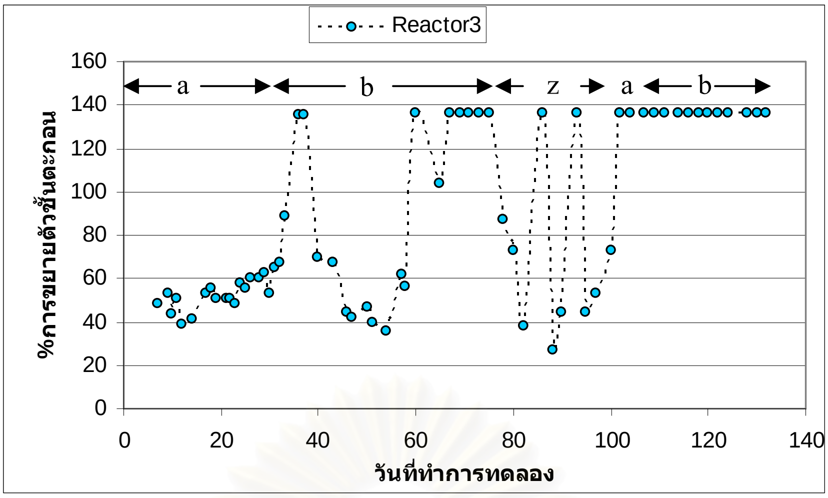
เท่ากับ 51.9 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 76 เท่ากับ 89.3 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 70.9 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 106 เท่ากับ 115 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์



ก. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ง. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอน (การเดินระบบระยะยาว)

โดย a คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

b คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

c คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

z คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

จากรูปที่ 4.28 พบว่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้น ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่เติมโพลีเมอร์มีการขยายตัวของชั้นตะกอนมากสุด เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดเล็กกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ เพราะไม่มีการเติมโพลีเมอร์เพื่อช่วยในการรวมตัวของตะกอน ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการจมตัวต่ำ

ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 30 ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ยังคงมากที่สุดเท่ากับ 83.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งมีการเติมโพลีเมอร์ลงไปนั้นมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนที่ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 ค่อนข้างมาก คือเท่ากับ 55.9 เปอร์เซ็นต์และ 51.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในการเดินระบบระยะยาวตั้งแต่วันที่ 31 ถึงวันที่ 133 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่เท่ากัน พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ช่วงที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 47 มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนที่สูงมาก คือ 136 เปอร์เซ็นต์ คือมีการขยายตัวของชั้นตะกอนเต็มถังปฏิกรณ์ เนื่องจากระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากขึ้น รวมทั้งระบบเริ่มมีความสามารถในการกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น ทำให้เกิดก๊าซ

ชีวภาพเป็นจำนวนที่มากขึ้น แต่ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยังคงมีขนาดที่ไม่โตขึ้นมากนัก ทำให้ตะกอนขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาจมตัวได้ยาก หลุดออกมากับน้ำทิ้งจากระบบ ทำให้เกิดการสูญเสียตะกอนแขวนลอยเป็นจำนวนมาก รวมทั้งทำให้ระบบมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนที่มากด้วย แต่หลังจากวันที่ 48 ระบบเริ่มมีการขยายตัวของชั้นตะกอนที่ลดลง ส่วนหนึ่งมาจากการที่ตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเล็กจำนวนหนึ่งหลุดออกไปจากระบบ ทำให้มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ลดลงไปด้วย หลังจากนั้นระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ก็เพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นเท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 133 มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนที่กลับมาสูงเหมือนเดิม คือเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ในช่วงวันที่ 31 ถึงวันที่ 99 ระบบมีการขยายตัวของชั้นตะกอนโดยส่วนใหญ่แล้วไม่มากจนเต็มถังปฏิกรณ์ จึงมีการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยของระบบในช่วงวันที่ทำการทดลองนี้น้อยกว่าของถังปฏิกรณ์อื่นๆ แต่พอเข้าสู่ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 133 ซึ่งระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มเป็นเท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่าระบบมีการขยายตัวของชั้นตะกอนเต็มถังปฏิกรณ์เหมือนกับช่วงท้ายของการทดลองของถังปฏิกรณ์อื่นๆ คือมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่าในช่วงวันแรกๆของการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์นี้ มีการขยายตัวของชั้นตะกอนโดยส่วนใหญ่ไม่สูงจนเต็มถังปฏิกรณ์ จึงมีของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบไม่มากนัก แต่ในวันที่ 70 ถึงวันที่ 76 ระบบมีปัญหาของแข็งแขวนลอยหลุดออกเป็นจำนวนมาก และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนก็เท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ จนไม่สามารถเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จึงทำการลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลงมาที่ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน โดยการเพิ่มเวลากักน้ำ (HRT) เพื่อให้น้ำเสียเข้าระบบเป็นน้ำเสียชุดเดียวกันดังเดิม ตั้งแต่วันที่ 77 ถึงวันที่ 99 พบว่าระบบสามารถเดินระบบได้เป็นปกติ โดยมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนในช่วงนี้เท่ากับ 70.9 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 106 ถึงวันที่ 133 ระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 3 กลับมารับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

ช่วงที่ระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สุดท้าย คือเมื่อถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน และถังปฏิกรณ์ที่ 3 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนที่สูงสุดคือเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากว่าในระบบเกิดสภาพปั่นป่วนจากการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบเป็นจำนวนมาก รวมทั้งตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดเล็ก ทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นตะกอนไปจนถึงส่วนบนสุดของส่วนย่อยสลาย

จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบยูเอเอสบีสามารถเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการขยายตัวของชั้นตะกอน และสามารถช่วยลดการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยโดยเฉพาะในช่วงแรกของการเดินระบบ

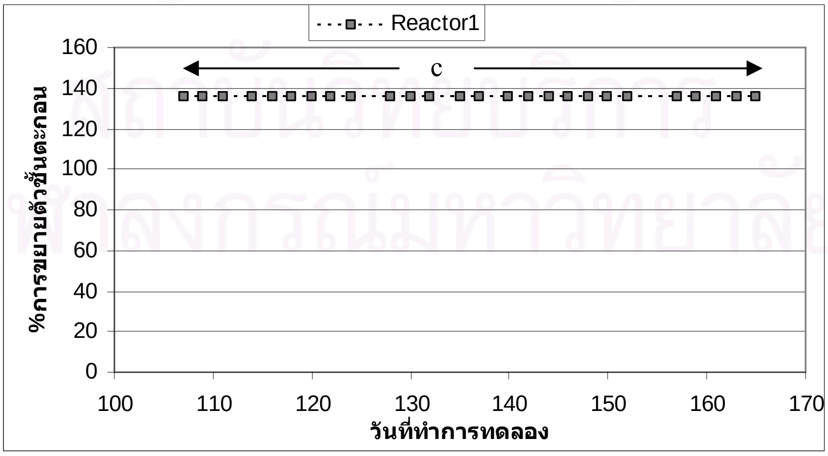
4.6.2 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม

ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์

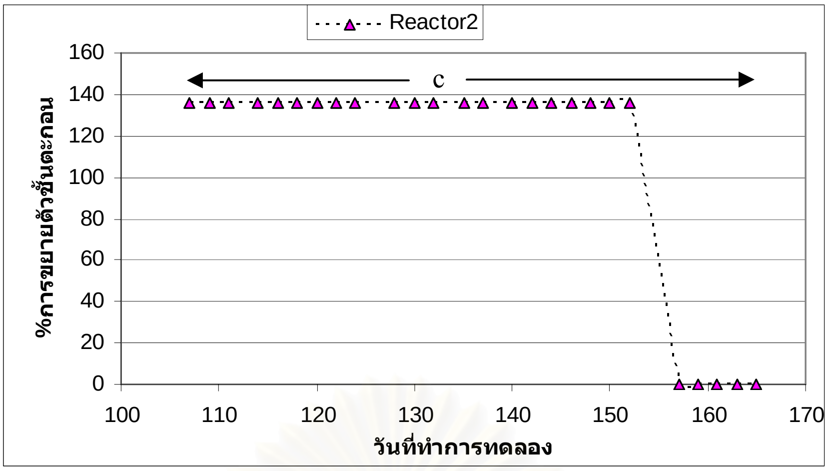
พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบ ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากันซึ่งเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังคงมีการขยายตัวเต็มถังปฏิกรณ์เหมือนกับช่วงก่อนที่จะมีการเติมสารอาหารเสริม

4.6.3 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์

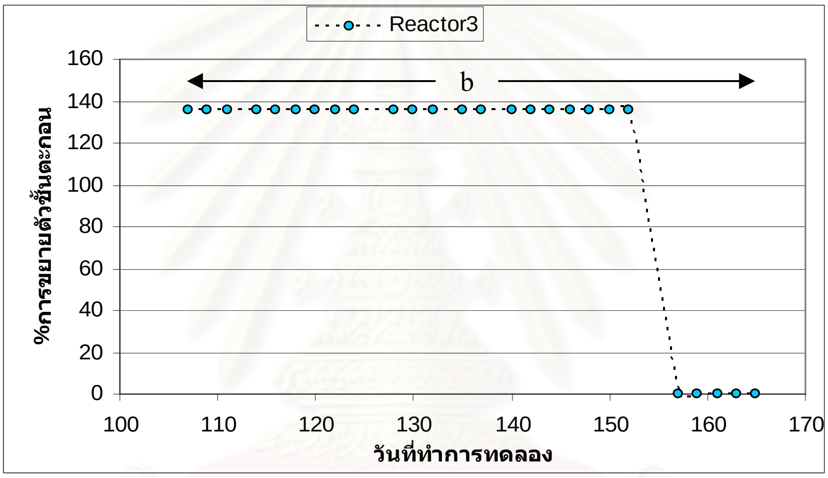
ช่วงวันที่ 154 ถึงวันที่ 165 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์ และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 136 เปอร์เซ็นต์



ก. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 1



ข. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 2



ก. เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอน (วันที่ 107 ถึงวันที่ 165)

โดย b คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

c คือ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

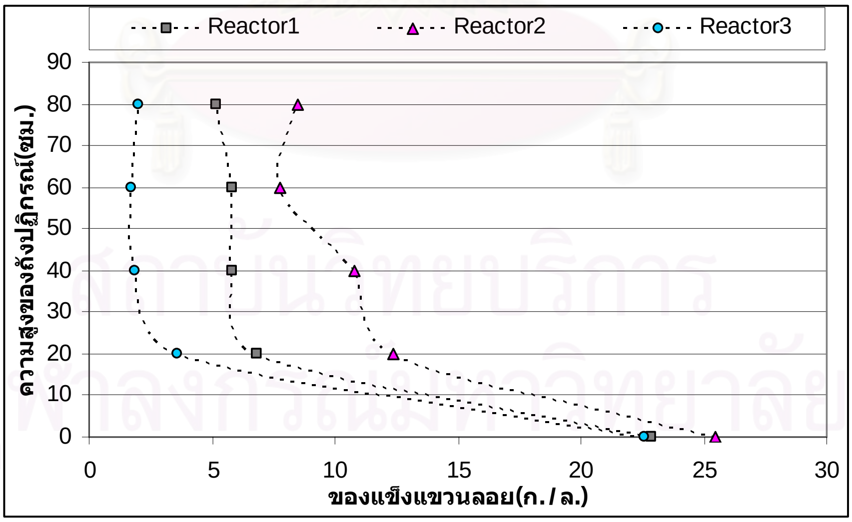
จากรูปที่ 4.29 หลังจากเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบในวันที่ 153 ของการทดลอง พบว่าในช่วงวันที่ 154 ถึงวันที่ 165 ถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมโพลีเมอร์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยลดลงอย่างชัดเจน โดยไม่มีการขยายตัวเต็มถังปฏิกรณ์เหมือนในช่วงก่อนเติมโพลีเมอร์ โดยมีการขยายตัวชั้นตะกอนไม่เกินความสูงระดับอ้างอิง หรือไม่เกินความสูงที่ระยะ 45 ซม.วัดจากระดับต่ำสุดของส่วนย่อยสลาย เท่ากับมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอนเท่ากับศูนย์เปอร์เซ็นต์ทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ยังคงมี

เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนอยู่ที่ค่าสูงสุดคือ 136 เปอเซ็นต์ คือขยายตัวเต็มถังปฏิกรณ์ แสดงว่าโพลีเมอร์ช่วยให้ตะกอนจุลินทรีย์มีการจมตัวที่ดีขึ้น

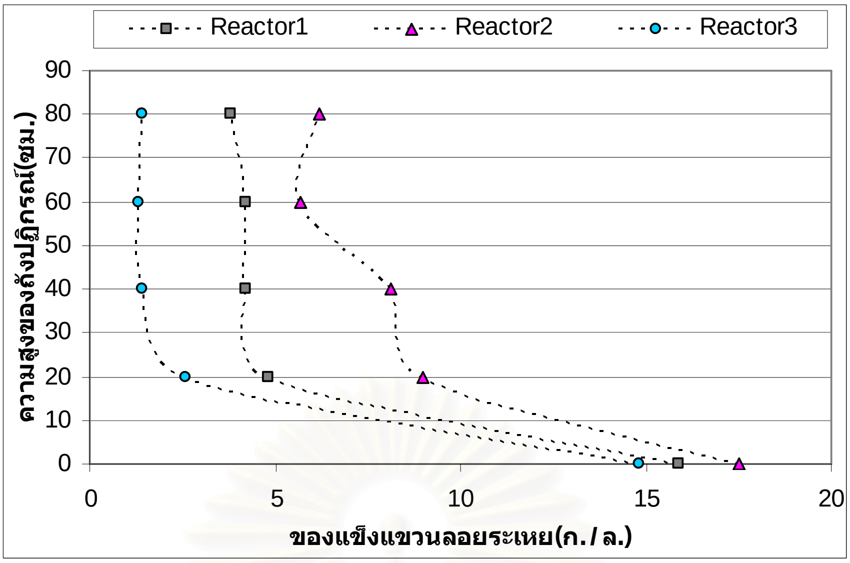
4.7 การกระจายตัวของมวลจุลินทรีย์ตามความสูงของถังปฏิกรณ์

การทดลองนี้ศึกษาถึง การกระจายตัวของมวลจุลินทรีย์ตามความสูงของถังปฏิกรณ์ เพื่อพิจารณาความเข้มข้นของจุลินทรีย์ มีค่ามากสุดที่ความสูงใดของถังปฏิกรณ์ และเพื่อศึกษาถึงความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในระบบเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบระยะยาว โดยเป็นการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยตามความสูงของถังปฏิกรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนของจุลินทรีย์ในระบบ ผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ง

จากรูปที่ 4.30 พบว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 จะมีค่ามากสุดที่ก้นถังปฏิกรณ์ ซึ่งบริเวณที่มีความเข้มข้นของจุลินทรีย์มากที่สุดนั้น จะเป็นบริเวณที่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นมากที่สุดนั่นเอง และพบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง จะมีความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในทุกความสูงของถังปฏิกรณ์ เหลืออยู่ในระบบมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ แสดงให้เห็นว่าระบบยูเอเอสบีสามารถเติมโพลีเมอร์ลงไปในระบบได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยในระบบ



ก. ของแข็งแขวนลอยในระบบเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ข. ของแข็งแขวนลอยระเหยในระบบเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

รูปที่ 4.30 ความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี

4.8 ก๊าซชีวภาพ

4.8.1 เดินระบบระยะยาว

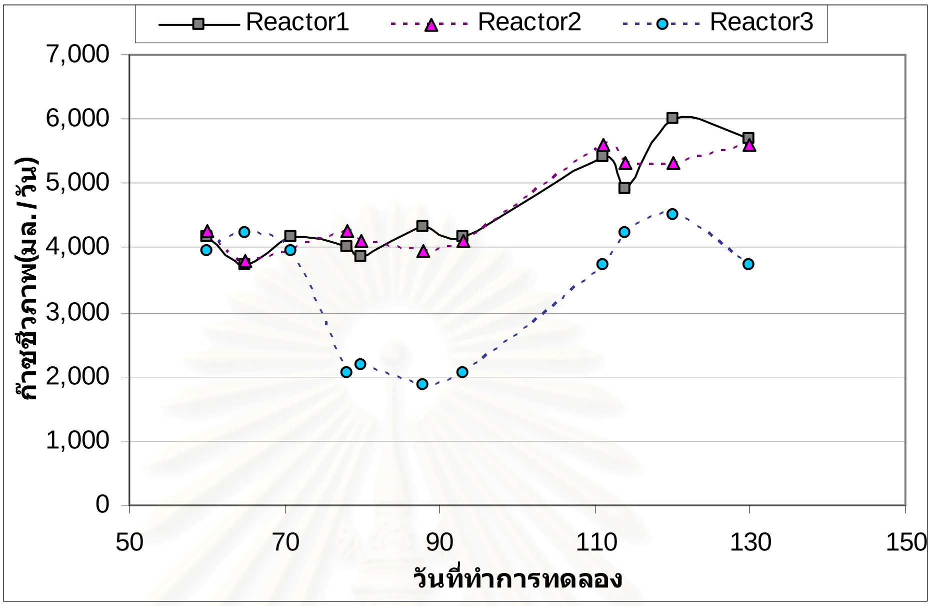
ช่วงแรกๆของการเริ่มต้นเดินระบบนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพจะมีไม่มากนักเนื่องจากเป็นช่วงปรับตัวของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้อัตราการใช้สารอินทรีย์ในช่วงแรกนี้จึงมีไม่มากนัก สังเกตได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบมีค่าน้อย เมื่อสารอินทรีย์ถูกใช้ในปริมาณน้อย ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อยตามไปด้วย แต่เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะเริ่มมีเพิ่มขึ้น โดยการทดลองนี้จะเริ่มวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว คือตั้งแต่วันที่ 60 ของการทดลองเป็นต้นไป

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 60 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 4052 มล./วัน และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 5498 มล./วัน

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 60 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 4082 มล./วัน และมีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 100 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 5468 มล./วัน

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 60 ถึงวันที่ 76 เท่ากับ 4092 มล./วัน มีปริมาณเฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 77 ถึงวันที่ 99 เท่ากับ 2034 มล./วัน และมีปริมาณ

เฉลี่ยตลอดช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ช่วงวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 เท่ากับ 4051 มล./วัน

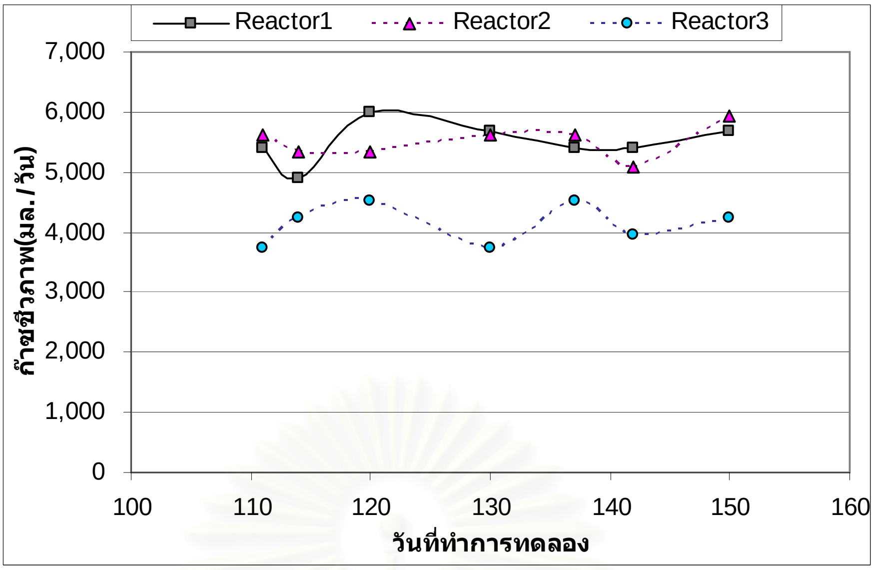


รูปที่ 4.31 ก๊าซชีวภาพ (การเดินระบบระยะยาว)

จากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าในระยะยาวช่วงที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ไม่มีผลกระทบต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นไปตามอัตราการใช้สารอินทรีย์หรือซีโอดีที่ถูกกำจัดไป

4.8.2 เดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม

ช่วงวันที่ 134 ถึงวันที่ 152 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 5495 มล./วัน ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 5534 มล./วัน และถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 4237 มล./วัน



รูปที่ 4.32 ก๊าซชีวภาพ (วันที่ 107 ถึงวันที่ 152)

จากรูปที่ 4.32 พบว่าหลังจากเติมสารอาหารเสริมลงไปในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับช่วงก่อนที่จะมีการเติมสารอาหารเสริม โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิด จะขึ้นอยู่กับอัตราการใช้สารอินทรีย์หรือซีโอดีที่ถูกกำจัดไป

4.9 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

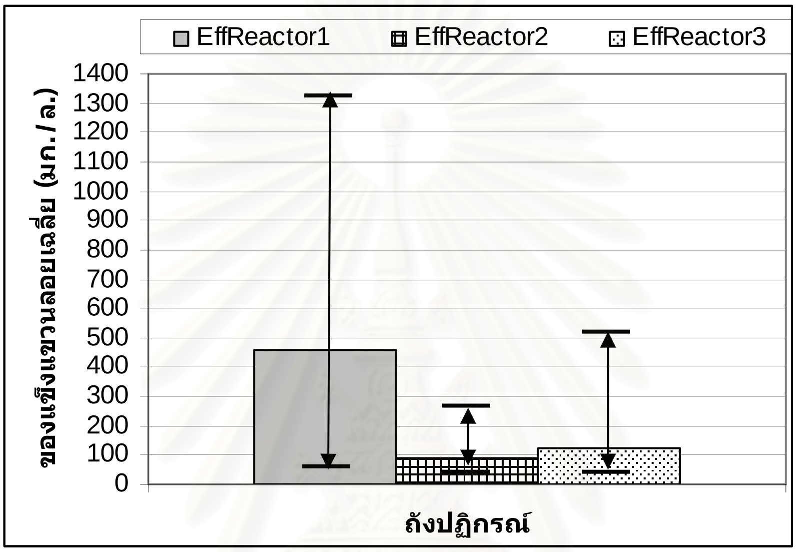
งายวิจัยนี้เป็นการเดินระบบระยะยาว โดยเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นไปเรื่อยๆตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ(Start Up)ในช่วง 2 เดือนแรกจนสิ้นสุดการทดลอง โดยจะค่อยๆเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ตามแต่ความสามารถที่ระบบจะรับได้ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีจำนวน 3 ถัง โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ ซึ่งปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส

ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่แตกต่างกันนั้นคือ ถังปฏิกรณ์ที่หนึ่งไม่มีการเติมโพลีเมอร์ ถังปฏิกรณ์ที่สองมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง ถังปฏิกรณ์ที่สามมีการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง โดยควบคุมให้มีการเติมปริมาณโพลีเมอร์โดยรวมในหนึ่งสัปดาห์เท่ากับถังปฏิกรณ์ที่สอง แต่เติมแยกย่อยออกเป็นสองครั้ง

ในหัวข้อนี้จะสรุปผลของพารามิเตอร์ 3 ค่า ซึ่งเกิดความเปลี่ยนแปลงจากผลของความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ได้ชัดเจนที่สุดคือ ของแข็งแขวนลอย การขยายตัวของชั้นตะกอน และขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยจะเป็นการเปรียบเทียบค่าของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบซึ่งอยู่ในช่วง 2 เดือนแรกของการเดินระบบระยะยาว

4.9.1 ของแข็งแขวนลอย

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 เดือนแรก อยู่ในช่วง 40 – 1325 มก./ล. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 456 มก./ล. ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 เดือนแรก อยู่ในช่วง 31 – 265 มก./ล. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 88 มก./ล. และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบช่วง 2 เดือนแรก อยู่ในช่วง 34 – 511 มก./ล. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 123 มก./ล. แสดงดังรูปที่ 4.33

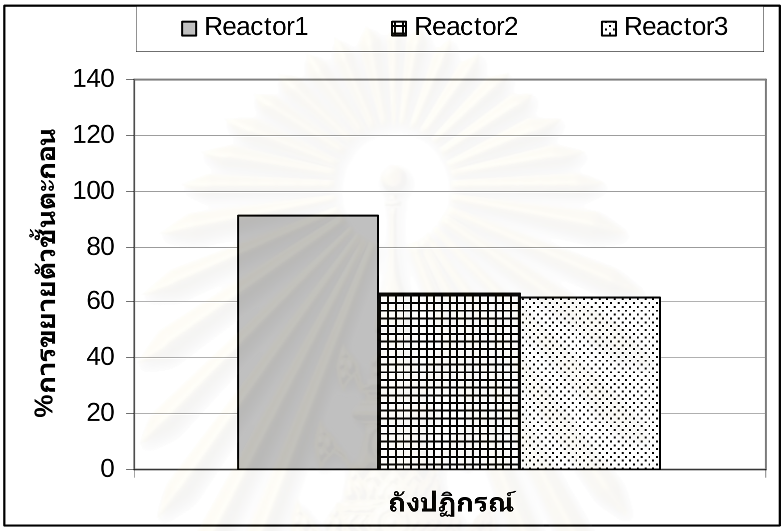


รูปที่ 4.33 ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)

จากรูปที่ 4.33 พบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ(Start Up) หรือในช่วง 2 เดือนแรกของการเดินระบบนั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบมากที่สุด รวมทั้งมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นช่วงกว้างกว่าข้อมูลของถังปฏิกรณ์อื่น ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออกจากระบบน้อยที่สุด รวมทั้งมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นช่วงแคบกว่าข้อมูลของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง แสดงให้เห็นว่าความถี่ในการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำให้ระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกน้อย และมีความเสถียรมากกว่าถังปฏิกรณ์อื่น

4.9.2 การขยายตัวของชั้นตะกอน

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยในช่วง 2 เดือนแรกเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยในช่วง 2 เดือนแรกเท่ากับ 63 เปอร์เซ็นต์ และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยในช่วง 2 เดือนแรกเท่ากับ 61 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.34

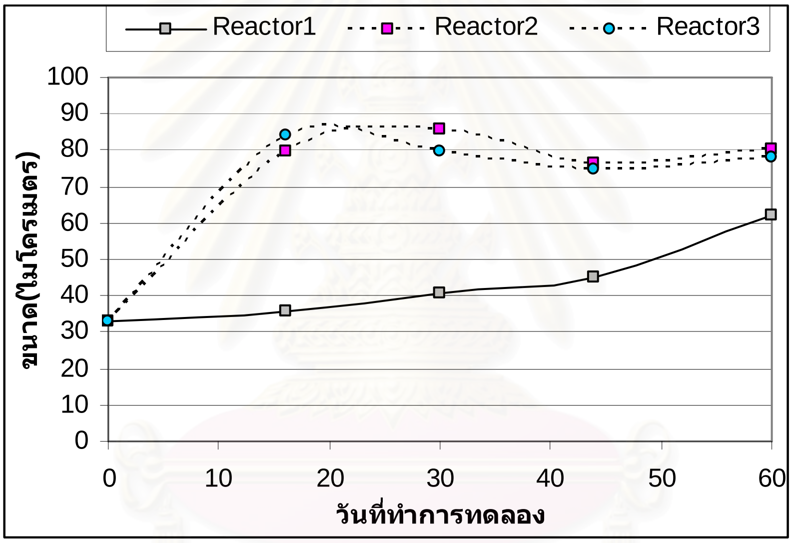


รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ย (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)

จากรูปที่ 4.34 พบว่าในช่วง 2 เดือนแรกของการเดินระบบนั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยสูงที่สุด ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้งสองถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเติมโพลีเมอร์ช่วยลดการขยายตัวของชั้นตะกอน ทำให้ลดปัญหาการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยได้ และความถี่ในการเติมโพลีเมอร์เพียงสัปดาห์ละครั้ง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถช่วยลดงานและภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องทำในการดำเนินระบบ

4.9.3 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การวัดขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ได้ทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบการกระจายขนาด โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer ในการวิเคราะห์ และเนื่องจากข้อมูลของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นการกระจายตามขนาดต่างๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จึงได้เลือกค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดทดลอง โดยเลือกค่า D(0.5) หรือ D_{50} ซึ่งเป็นขนาดที่มีขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเล็กกว่านี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด หรือเท่ากับว่าเป็นขนาดที่เป็นค่ากลางของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบมาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของงานวิจัยนี้ โดยเลือกตะกอนจุลินทรีย์ที่ความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์ทั้งสาม เป็นตัวแทนของตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดของแต่ละถังปฏิกรณ์



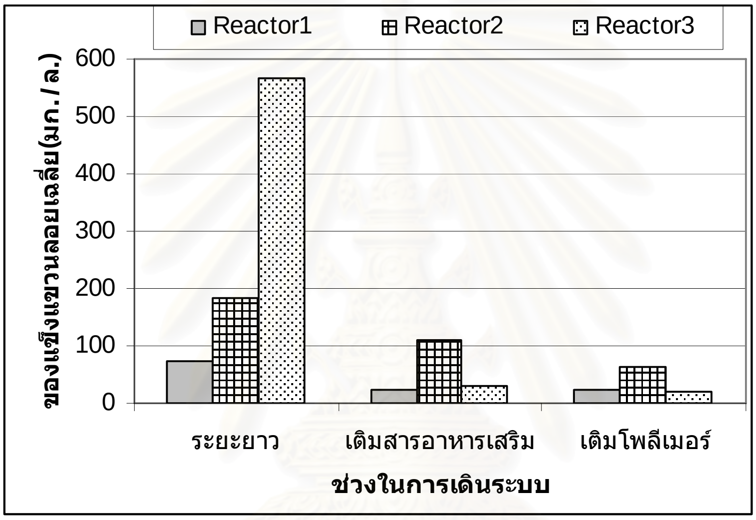
รูปที่ 4.35 ขนาด D_{50} (2 เดือนแรกในการเดินระบบ)

จากรูปที่ 4.35 พบว่าในช่วง 2 เดือนแรกของการเดินระบบนั้น ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ มีขนาด D_{50} ที่เล็กกว่าถังปฏิกรณ์อื่น ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละครั้ง และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละสองครั้ง มีขนาด D_{50} ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเติมโพลีเมอร์ช่วยเพิ่มขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้ของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำทิ้งมีปริมาณลดน้อยลง และความถี่ในการเติมโพลีเมอร์เพียงสัปดาห์ละครั้ง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถช่วยลดงานและภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องทำในการดำเนินระบบ

4.10 การวิเคราะห์ผลของการเติมสารอาหารเสริมและโพลีเมอร์ช่วง Post Test

4.10.1 ของแข็งแขวนลอย

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบ ของการเดินระบบระยะยาว การเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม และการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์ จะได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.36 โดยการเดินระบบระยะยาวนั้น จะใช้ค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย จากช่วงการเดินระบบที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สุดท้ายของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ คือในวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ของการทดลอง



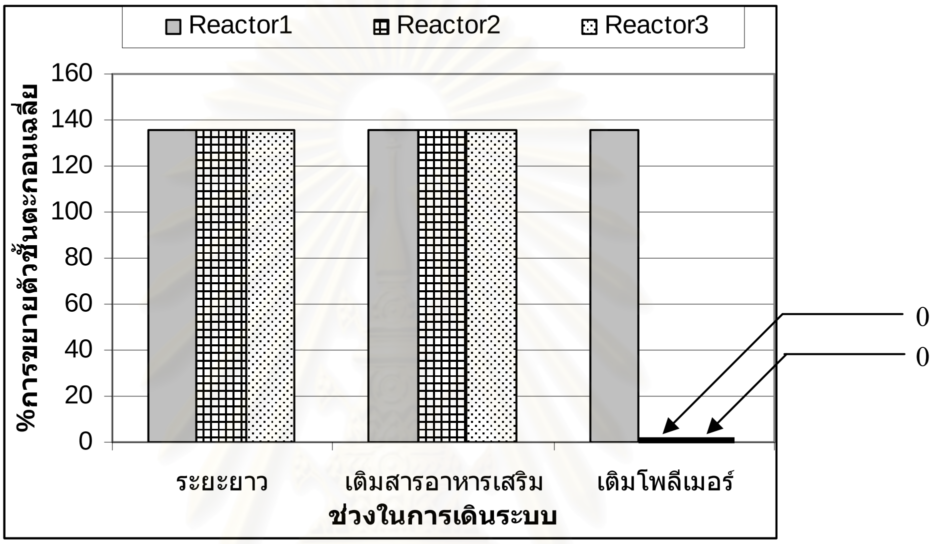
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.36 พบว่า หลังจากมีการเติมสารอาหารเสริมในช่วง Post Test ทำให้ของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบไปกับน้ำออก เป็นปริมาณที่น้อยลงทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ที่ 3 จะเห็นผลเด่นชัดที่สุด คือค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่หลุดออกจากระบบ ลดลงจาก 568 มก./ล. เป็น 29 มก./ล. ส่วนหลังการเติมโพลีเมอร์ในช่วง Post Test ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกไม่ต่างจากก่อนเติมโพลีเมอร์มากนัก เนื่องจากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดไปในน้ำออกน้อยอยู่แล้ว

แสดงให้เห็นว่าการเติมสารอาหารเสริม ช่วยลดการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยไปกับน้ำทิ้งจากระบบ เนื่องจากการเติมสารอาหารเสริม จะไปช่วยเพิ่มประจุบวกในน้ำเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ส่วนการเติมโพลีเมอร์อีกครั้ง หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาวสามารถทำได้ โดยจะพบว่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำออก มีปริมาณไม่ต่างไปจากก่อนเติมโพลีเมอร์มากนัก

4.10.2 การขยายตัวของชั้นตะกอน

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นตะกอน ในระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ของการเดินระบบระยะยาว การเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม และการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.37 โดยการเดินระบบระยะยาวนั้น จะใช้เปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอน จากช่วงการเดินระบบที่รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สุดท้ายของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ คือในวันที่ 107 ถึงวันที่ 133 ของการทดลอง



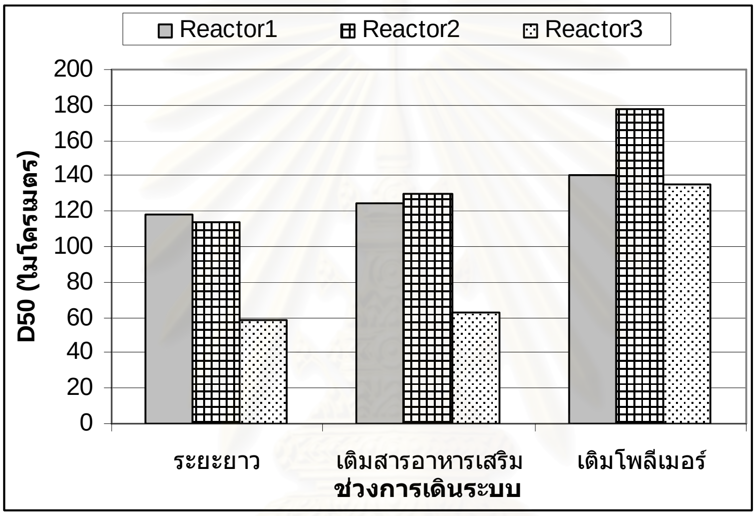
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.37 พบว่า หลังจากมีการเติมสารอาหารเสริมในช่วง Post Test ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ยังคงมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเฉลี่ย เท่ากับในช่วงการเดินระบบระยะยาว คือมีการขยายตัวเต็มถังปฏิกรณ์ แต่หลังจากมีการเติมโพลีเมอร์ลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 พบว่าทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวชั้นตะกอนเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ คือมีการขยายตัวชั้นตะกอนไม่เกินระดับอ้างอิงที่ 45 ซม.จากส่วนต่ำสุดของส่วนย่อยสลาย

แสดงให้เห็นว่าการเติมสารอาหารเสริมในงานวิจัยนี้ ไม่มีผลต่อการขยายตัวของชั้นตะกอน ส่วนการเติมโพลีเมอร์อีกครั้ง หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาว จะช่วยทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการตกตะกอนที่ดีขึ้น

4.10.3 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ ขนาด D_{50} ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ในระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบระยะยาว สิ้นสุดการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม และสิ้นสุดการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์ ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.38 โดยการเดินระบบระยะยาวนั้น จะใช้ D_{50} จากการทดลองในวันที่ 133 ส่วนการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมสารอาหารเสริม จะใช้ D_{50} จากการทดลองในวันที่ 147 และการเดินระบบช่วง Post Test ที่มีการเติมโพลีเมอร์ จะใช้ D_{50} จากการทดลองในวันที่ 165 โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ระยะความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์เป็นตัวแทนของทั้งถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบขนาด D_{50}

จากรูปที่ 4.38 พบว่าหลังจากมีการเติมสารอาหารเสริมในช่วง Post Test ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีขนาด D_{50} ใหญ่ขึ้นกว่าช่วงการเดินระบบระยะยาวเล็กน้อย แต่หลังจากมีการเติมโพลีเมอร์ในช่วง Post Test ลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 พบว่าทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์มีขนาด D_{50} ใหญ่ขึ้นกว่าช่วงก่อนเติมโพลีเมอร์ค่อนข้างมาก ต่างกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์ มีขนาด D_{50} ที่ใหญ่ขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเติมโพลีเมอร์ช่วยให้ตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดเม็ดที่ใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน

แสดงให้เห็นว่าการเติมสารอาหารเสริมในงานวิจัยนี้ ไม่ส่งผลต่อขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากนัก ส่วนการเติมโพลีเมอร์อีกครั้ง หลังจากเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลายาวสามารถทำได้ โดยพบว่าขนาด D_{50} ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าการเติมโพลีเมอร์ช่วยทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้น

4.11 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในระบบ ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด เพื่อเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงใช้แนวความคิด และโมเดลเรื่องก๊าซ ของสินีนุช ศศิยศชาติ (2544) มาอธิบาย

โดยให้ในการบำบัดน้ำเสียมีน้ำเสียที่ถูกย่อยสลายทั้งหมดมีปริมาตร 1 ลิตร และก๊าซที่เกิดขึ้นจากระบบมีก๊าซ 2 ชนิด คือ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคก๊าซ ดังนั้น ในการพิจารณาหน่วยของปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงรูปไปอยู่ในแต่ละวัฏภาค จะพิจารณาในหน่วยมวลของสารนั้น ๆ ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการคำนวณ

กำหนดให้ M_T = จำนวนโมลของมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ
C_T = จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ
M_L = จำนวนโมลของมีเทนที่อยู่ในวัฏภาคน้ำ
C_L = จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคน้ำ
M_G = จำนวนโมลของมีเทนที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ
C_G = จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะได้ก๊าซเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้ส่วนหนึ่งจะละลายอยู่ในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งจะหนีออกไปอยู่ในบรรยากาศเหนือน้ำ ดังนั้นผลรวมของก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดในรูปมวลจะเท่ากับมวลของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำรวมกับมวลของก๊าซที่อยู่เหนือน้ำ จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนออกมาเป็นสมการได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก๊าซมีเทน

$$M_T = M_L + M_G$$

$$M_L = M_T - M_G \qquad (4.1)$$

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$C_T = C_L + C_G$$

$$C_L = C_T - C_G \qquad (4.2)$$

และจากความสัมพันธ์ของก๊าซในบรรยากาศเมื่อคิดในรูปของความดันพาร์เชียล จะได้ว่า

ความดันพาร์เชียลของมีเทน $P_{CH4} = P_T \times M_G / (M_G + C_G)$ (4.3)

ความดันพาร์เชียลของคาร์บอนไดออกไซด์ $P_{CO2} = P_T \times C_G / (M_G + C_G)$ (4.4)

ให้ความดันของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1 บรรยากาศ

จากกฎของเฮนรี่ กล่าวว่า “สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง ความสามารถในการละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของก๊าซคูณด้วยความดันพาร์เชียลของก๊าซนั้น” จะได้ว่า

ความเข้มข้นของมีเทนละลายน้ำ $M_L = K_{CH4} \times P_{CH4}$ (4.5)

แทนค่า สมการ (4.1) และ (4.3) ลงในสมการที่ (4.5) แล้วจัดรูปใหม่

$$M_T - M_G = K_{CH4} \times M_G / (M_G + C_G)$$

$$C_G = [(K_{CH4} \times M_G) / (M_T - M_G)] - M_G \quad (4.6)$$

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ $C_L = K_{CO2} \times P_{CO2}$ (4.7)

แทนค่า สมการ (4.2) และ (4.4) ลงในสมการที่ (4.7) แล้วจัดรูปใหม่

$$C_T - C_G = K_{CO2} \times C_G / (M_G + C_G)$$

$$M_G = [(K_{CO2} \times C_G) / (C_T - C_G)] - C_G \quad (4.8)$$

จากข้อกำหนดและสมการที่ 4.1 – 4.8 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณก๊าซได้

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล โดยน้ำเสียนี้เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะถูกไฮโดรไลซ์ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กเหลือเป็นแค่กลูโคส และถูกแบคทีเรียสร้างกรดย่อยสลายให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน และสุดท้ายจะถูกย่อยโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนให้เป็นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์

สมการการย่อยสลายสารอินทรีย์

กลูโคส : $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 3CH_4 + 3CO_2$ (4.9)

สมการการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

กลูโคส : $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ (4.10)

จากสมการทั้ง 2 ข้างต้น จะได้ว่า การย่อยสลายกลูโคส 1 โมล จะใช้ออกซิเจน 6 โมล หรืออาจกล่าวได้ว่า ซีโอดีของกลูโคสเท่ากับ 6 โมล ต่อ 1 โมลของกลูโคส และในการย่อยสลายกลูโคสแบบไม่ใช้อากาศ 1 โมล จะเกิดเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 3 โมล ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ซีโอดี 6 โมล จะเกิดเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 3 โมล

เนื่องจากว่าค่าซีโอดีนั้นมีหน่วยเป็น มก./ล. เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงอาจกล่าวได้ว่า ในการย่อยสลายซีโอดี 6 มิลลิโมล จะเกิดก๊าซมีเทนขึ้นทั้งหมด 3 มิลลิโมล และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นทั้งหมด 3 มิลลิโมล

จะเป็นซีโอดีจากกลูโคส 1 มิลลิโมล และเกิด มีเทน = 0.5 มิลลิโมล

คาร์บอนไดออกไซด์ = 0.5 มิลลิโมล

ดังนั้น ซีโอดีที่ถูกกำจัด C มก./ล. เท่ากับ C/32 มิลลิโมล/ล. จะเกิดเป็น

ก๊าซมีเทน M_T = (C/32) x 0.5 มิลลิโมล/ล.

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ C_T = (C/32) x 0.5 มิลลิโมล/ล.

การคำนวณหาปริมาณก๊าซละลายน้ำที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยการ Trial & error ดังนี้

1. กำหนดค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด (C), มก./ล.
2. คำนวณหาค่า M_T และ C_T
3. สมมติค่ามีเทนที่เป็นก๊าซที่เกิดขึ้น (M_G), มิลลิโมล/ล. แทนลงในสมการที่ (4.6) จะได้ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซที่เกิดขึ้น (C_G), มิลลิโมล/ล.
4. แทนค่า C_G ลงในสมการที่ (4.8) จะได้ค่า M_G
5. Trial & error ต่อไปจนกว่าจะได้ค่า M_G ที่สมมติเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (4.8)
6. คำนวณหา P_{CH4} และ P_{CO2} จากสมการที่ (4.3) และ (4.4)
7. คำนวณหา M_L และ C_L ในหน่วยมิลลิโมล/ล. จากสมการที่ (4.1) และ (4.2)

4.11.1 ตัวอย่างการคำนวณ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในวันที่ 130 ของการทดลอง ซีโอดีน้ำเข้า 2000 มก./ล. น้ำออก 24 มก./ล. ก๊าซชีวภาพ 5684 มล./วัน กำหนดให้ พีเอช 7.0 อุณหภูมิ 30.0 องศาเซลเซียส

กำหนดขั้นตอนดังนี้

1. ซีโอดีถูกกำจัด(C) 1976 มก./ล. เท่ากับ 61.75 มิลลิโมล/ล.
2. ค่าคงที่ของเฮนรี่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.0 องศาเซลเซียส (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

K_{CH4} = 1.24 บรรยากาศ/(มิลลิโมล/ลิตร)

K_{CO2} = 29.9 บรรยากาศ/(มิลลิโมล/ลิตร)

3. คำนวณค่า M_T และ C_T

M_T = 61.75 x 0.5 = 30.875 มิลลิโมล/ลิตร

C_T = 61.75 x 0.5 = 30.875 มิลลิโมล/ลิตร

4. สมมติค่ามีเทนที่เป็นก๊าซที่เกิดขึ้น (M_G), มิลลิโมล/ล. แทนลงในสมการที่ (4.6) จะได้ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซที่เกิดขึ้น (C_G), มิลลิโมล/ล.
5. แทนค่า C_G ลงในสมการที่ (4.8) จะได้ค่า M_G
6. Trial & error จะได้ค่า M_G ที่สมมติเท่ากับค่าที่ได้จากคำนวณในสมการที่ (4.8)

ตารางที่ 4.4 การหาค่าก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

ค่าสมมุติ	ค่าที่ได้	
(M_G) ,มิลลิโมล/ล.	(C_G), มิลลิโมล/ล.	(M_G) ,มิลลิโมล/ล.
30.13	20.02	35.12
<u>30.12</u>	<u>19.35</u>	<u>30.84</u>
30.11	18.70	27.20

7. คำนวณหาค่า P_{CH4} และ P_{CO2} จากสมการที่ (4.3) และ (4.4)

P_{CH4} = 0.61 บรรยากาศ

P_{CO2} = 0.39 บรรยากาศ

8. คำนวณหา M_L และ C_L ในหน่วยมิลลิโมล/ล. จากสมการที่ (4.1) และ (4.2)

M_L = $M_T - M_G$

= 0.755 มิลลิโมล/ล.

มีเทนละลายน้ำ 0.755 มิลลิโมล/ล.

C_L = $C_T - C_G$

= 11.525 มิลลิโมล/ล.

คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ 11.525 มิลลิโมล/ล.

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า ปริมาณมีเทนจะละลายน้ำได้น้อยกว่าคาร์บอนไดออกไซด์มาก ด้วยเหตุนี้ในการวัดเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนจะต้องมีมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์

<u>เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน</u>

การหาเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ได้จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 30.0 องศาเซลเซียส

ซีโอดีที่ถูกกำจัด 1 กรัม ทำให้เกิดก๊าซมีเทน 388 มิลลิลิตร

ซีโอดีที่ถูกกำจัด 1.976 กรัม/ลิตร ในการทดลองให้มีน้ำเสีย 4.86 ลิตร

จะได้ ซีโอดีที่ถูกกำจัด 1.976 x 4.86 = 9.60 กรัม

ก๊าซมีเทนที่ได้ = $9.60 \times (388 \times 10^{-3})$ = 3.725 ลิตร

มีเทนละลายน้ำ 0.755 มิลลิโมล/ล. = $4.86 \times ((0.755 \times 10^{-3}) \times 22.4)$

= 0.082 ลิตร

จะได้ก๊าซมีเทนจากการคำนวณ = 3.643 ลิตร

เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ควรได้จริงจากการทดลอง

ก๊าซชีวภาพมีปริมาตร = 5.684 ลิตร

ก๊าซมีเทนที่ได้ = 3.643 ลิตร

เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน = 64.1

จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ได้จากการคำนวณ = 64.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วก๊าซชีวภาพจะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทนประมาณ 60 – 70 เปอร์เซ็นต์ (McCarty, 1964)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ด ของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาล ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) มีความเป็นไปได้ในการเติมโพลีเมอร์ประจุบวกชนิด Praestol 852 BC ลงในระบบบำบัดยูเอเอสบี ซึ่งโพลีเมอร์จะช่วยลดเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up) โดยจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีขนาดตะกอนที่ใหญ่ขึ้น จึงช่วยลดการสูญเสียของของแข็งแขวนลอยไปในน้ำทิ้งได้ดีกว่า เนื่องจากโพลีเมอร์ประจุบวกจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นประจุลบให้มาจับตัวกัน ตามหลักทฤษฎี Polymer Bridging ส่วนค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อสิ้นสุดช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up) ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์จะมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าสูงเกินกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะพบว่าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์จะเข้าสู่สภาวะคงตัว ตั้งแต่วันที่ 60 ของการทดลอง หรือสิ้นสุดช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up)

2) ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ หามาด้วยวิธี Jar Test จากผลการทดลองพบว่า การเติมปริมาณโพลีเมอร์เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส นั้น เป็นค่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (Optimum Dose) จึงเลือกค่าปริมาณโพลีเมอร์เท่ากับ 2 มก./ก.เอสเอส เป็นค่าที่ใช้ในการดำเนินการตลอดช่วงเวลาที่มีการเติมโพลีเมอร์ในการทดลอง

ความถี่ในการเติมโพลีเมอร์ที่ไม่เท่ากัน ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 และถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้นไม่มีผลต่อขนาดของเม็ดตะกอนในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start Up) รวมทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมโพลีเมอร์ ก็ไม่มีข้อแตกต่างกันมากนัก แต่ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบ ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละ 1 ครั้ง ในช่วง 2 เดือนแรกของการเดินระบบนั้น มีค่าน้อยกว่าจากถังปฏิกรณ์อื่น รวมทั้งมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นช่วงแคบกว่าข้อมูลของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่เติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง ดังนั้นการเติมโพลีเมอร์สัปดาห์ละ 1 ครั้งจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากสามารถช่วยลดการสูญเสียของแข็งแขวนลอยไปในน้ำทิ้งได้ดีกว่า รวมทั้งสามารถช่วยลดงานและภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องทำในการดำเนินระบบด้วย

3) ผลของการเดินระบบในระยะยาว พบว่าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์เมื่อเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์จะทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้น รวมทั้งการเดินระบบในระยะยาวพบว่าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ดีมาก โดยมีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไปดังนี้

1) ศึกษาระบบบำบัดยูเอเอสบีที่มีการเติมโพลีเมอร์ เปรียบเทียบกับระบบบำบัดยูเอเอสบีที่มีการเติมสารอาหารเสริม โดยเปรียบเทียบขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ว่ามีความแตกต่างกันเพียงใด

2) ศึกษาถึงระบบบำบัดยูเอเอสบีที่มีการเติมโพลีเมอร์ โดยใช้น้ำเสียต่างกันแต่ควบคุมให้มีความเข้มข้นซีโอดีเท่ากัน โดยทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงผลจากของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียต่อการสร้างตะกอนเม็ด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

พีรพงษ์ ทิพยาทร. (2530). การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำโดยระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. (2542). วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมพงษ์ นิลประยูร. (2536). การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักแบบอัพโฟลว์แอนแอโรบิกสลัดจ์แบลงเก็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมศักดิ์ ศรีวะโลสกุล. (2534). การเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในช่วงเดินระบบถังหมักกระบวนการชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สินีนุช ศศิยศชาติ. (2544). บทบาทของสภาพด่างต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. (2548). จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. (2545). คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Chen, J. and Lun, S.Y. (1993). Study of Mechanism of Anaerobic Sludge Granulation in UASB Reactors. Wat.Sci.Tech. 28, 7: 171-178.

Chernocharo, C.A.L. and Cardoso, M.R. (1999). Development and Evaluation of a Partitioned Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor for the Treatment of Domestic Sewage from Small Villages. Wat.Sci.Tech. 40, 8: 107-113.

Dararat, S. (1996). Effect of Sub-Optimal Temperature and pH Performance of UASB Granules, Methanotrix and Methanosarcina. Master's Thesis. Vanderbilt University.

de Man, G. and Zeevalkink, J.A. (1986). Anaerobic Treatment of Dairy Wastewater. Paer from Euroconsult July 1986. 9.

Draaijer, H., Mass, J.A.W., Schaapman, J.E. and Khan, A. (1992). Performance of the 5 MLD. UASB Reactor for Sewage Treatment at Kanpur, India. Wat.Sci.Tech. 25, 7: 123-133.

El-Mamouni, R., Leduc, R. and Guiot, S.R. (1998). Influence of Synthetic and Natural Polymers on the Anaerobic Granulation Process. Wat.Sci.Tech. 38, 8: 341-347.

Francese, A., Cordoba, P., Duran, J. and Sineriz, F. (1998). High Upflow Velocity and Organic Loading Rate Improve Granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. World Journal of Microbiology and Technology. 14, 3: 337-341.

Gail, R.G. and Barford, J.P. (1985). The Development of Granulation in an Upflow Floc Digester and Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digester Treating Cane Juice Stillage. Biotechnology Letters. 7, 7: 493-498.

Gonzalez, J.S., Rivera, A., Borja, R. and Sanchez, E. (1998). Influence of Organic Volumetric Loading Rate. Nutrient Balance and Alkalinity: COD Ratio on the Anaerobic Sludge Granulation of UASB Reactor Treating Sugar Cane Molasses. International Biodeterioration and Biodegradation. 41, 2: 127-131.

Gonzalez-Gil, G., Lens, P.N.L., Van Aelst, A., Van As, H., Versprille, A.I., and Lettinga, G. (2001). Cluster Structure of Anaerobic Aggregates of an Expanded Granular Sludge Bed Reactor. Applied and Environmental Microbiology. 67: 3683-3692.

Guiot, S.R., Gorur, S.S., Bourque, D. and Samson, R. (1988). Metal Effect on Microbial Aggregation During Upflow Anaerobic Sludge Bed-Filter (UBF) Reactor Start-up. Proceeding of the GASMAT-workshop Luteren.

Hulshoff Pol, L.W.P., de Zeeuw, W.J., Velzeboer,C.T.M. and Lettinga, G. (1983a). Granulation in UASB Reactors. Wat.Sci.Tech. 15: 291-304.

Hulshoff Pol, L.W.P., de Zeeuw, W.J., Velzeboer, C.TT.M. and Lettinga, G. (1983b). Pelletization of Anaerobic Sludge in UASB Reactor on Sucrose Containing Substrates. Procedure 3rd International Symposium on Microbial Ecology. 8-12.

Imai, T., Ukita, M., Liu, J., Sekine, M., Nakanishi, H. and Fukagawa, M. (1997). Advanced Start Up of UASB Reactors by Adding of Water Absorbing Polymer. Wat.Sci.Tech. 36, 6-7: 399-406.

Kiriyama, K., Tanaka, Y. and Mori, I. (1992). Field test of a Composite Methane Gas Production System Incorporating a Membrane Module for Municipal Sewage. Wat.Sci.Tech. 25, 7: 135-141.

Koster, I.W., Rinzema, A., Vegt de, A.L. and Lettinga, G. (1986). Sulfide Inhibition of the Methanogenic Activity of Granular Sludge at Various pH Levels. Water Research. 20: 1561-1567.

Krispa, S.S. (1992). Low Strength (Domestic) Wastewater Treatment by Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. A.I.T. Master's Thesis.

Kugelman, I.J. and McCarty, P.L. (1965). Cation Toxicity and Stimulation in Anaerobic Wastewater Treatment. Journal of WPCF. 37, 1: 97-116.

Lalit, K.A. (1991). Highrate Treatment of Low Strength (Domestic) Wastewater Treatment by Modified Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. A.I.T.Master's Thesis.

Lettinga, G., Roersma, R. and Grin, P. (1980). Anaerobic Treatment of Raw Domestic Sewage at Ambient Temperature using a Granular Bed UASB Reactor. Biotechnology and Bioengineering. 25: 1701-1723.

Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L.W.P. (1991). UASB-Process Design for Various Types of Wastewaters. Wat.Sci.Tech. 24, 8: 87-107.

Lettinga, G., de Man, A., Van Der Last, A.R.M, Wiegant, W., Van Knippenberg, K., Frijns,J. and Van Buuren, J.C.L. (1993). Anaerobic Treatment of Domestic Sewage and Wastewater. Wat.Sci.Tech. 27, 9: 67-73.

Lettinga, G. (1996). Sustainable Integrated Biological Wastewater Treatment. Wat.Sci.Tech. 33, 3: 85-98.

Liu, Y., Xu, H.L., Yan, S.F. and Tay, J.H. (2003). Mechanisms and Models or Anaerobic Granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. Water Research. 37: 661-673.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

McCarty, P.L. (1964). Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Pubic Works. 9-12.

McLeod, F.A., Guiot, S.R. and Costerton, J.W. (1990). Layered Structure of Bacterial Aggregates Produced in an Upflow Anaerobic Sludge Bed and Filter Reactor. Appl.Environ.Microbiol. 56, 6: 1598-607.

Mosey, F.E. and Hughes, D.A. (1975). The Toxicity of Heavy Metal Ions to Anaerobic Digestion. Water Pollution Control. 74: 18-39.

Narnoli, S.K. and Mehrotra, I. (1997). Sludge Blanket of UASB Reactor: Mathematical Simulation. Water Research. 31, 4: 715-726.

Noyola, A. and Moreno, G. (1994). Granule Production from Raw Waste Activated Sludge. Wat.Sci.Tech. 30, 12: 339-346.

Ramos, J., Obaya, M.C., Valdes, E., Villa, P. and Eng, F. (1994). Granulation of Digested Sewage Sludge in Mesophilic UASB Reactors Treating Distillery Wastewaters from Sugar-cane Molasses. ACTA Biotechnologica. 14, 3: 283-292.

Ruiz, I., Soto, M., Veiga, M.C., Ligero, P., Vega, A. and Blazquez, R. (1998). Performance of and Biomass Characterization in a UASB Reactor Treating Domestic Wastewater at Ambient Temperature. Water SA. 24, 3: 215-222.

Sam-soon, P.A.L.N.S, Loewenthal, R.E., Wentzel, M.C. and Marais, G.V.R. (1987). Growth of Biopellets on Glucose in Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) System. Water SA. 16, 13: 151-164.

Schellinkhout, A. and Cellazos, C.J. (1992). Full-scale Application of the UASB Technology for Sewage Treatment. Wat.Sci.Tech. 25, 7: 159-166.

Schmidt, J.E. and Ahring, B.K. (1995). Granular Sludge formation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors. Biotechnology and Bioengineering. 49: 229-246.

Schulze, D., Fiebig, R. and Dellweg, H. (1988). Development of Granular Sludge in the UASB Treatment of Model Waste Water Containing Gelatine. Biotechnology Letters. 10, 5: 319-324.

Sharma, J. and Singh, R. (2001). Effect of Nutrients Supplementation on Anaerobic Sludge Development and Activity for Treating Distillery Effluent. Bioresource Technology. 79: 203-206.

Show, K.Y., Wang, Y., Foong, S.F. and Tay, J.H. (2004). Accelerated Start-up and Enchanced Granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. Water Research. 38: 2293-2304.

Speece, R.E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater. USA: Archae Press.

Teo, K.C., Xu, H.L. and Tay, J.H. (2000). Molecular Mechanism of Granulation. II: Proton Translocating Activity. Journal of Environmental Engineering. 126, 5: 411-418.

Van Haandel, A.C. and Lettinga, G. (1994). Application of Anaerobic Digestion to Sewage Treatment. In Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate. John Wiley & Sons.

Weber, W.J. Jr. (1972). Physicochemical Processes for Water Quality Control. 1st Ed., Wiley-Interscience.

Wiegant, W.M. and de Man, A.W.A. (1985). Granulation of Biomass in Thermophilic Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors Treating Acidified Waste-Waters. Biotechnology and Bioengineering. 28: 718-727.

Wiegant, W.M. and Lettinga, G. (1985). Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugar in Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. Biotechnology and Bioengineering. 28: 718-727.

Yan-Ling, H., Xing-Lian, G. and Hu-Hui, Y. (1995). Sludge Granulation in a UASB Reactor for the treatment of Soda-Anthraquinone Chemical Wheat-Straw Pulp Black Liquor. Bioresource Technology. 51: 213-215.

Yan, Y. and Tay, J. (1997). Characterisation of the Granulation Process During UASB Start-up. Water Research. 3, 7: 1573-1580.

Yu, H.Q., Fang, H.H.P. and Tay, J.H. (2001a). Enhanced Sludge Granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors by Aluminum Chloride. Chemosphere. 44: 31-36.

Yu, H.Q., Tay, J.H. and Fang, H.H.P. (2001b). The Roles of Calcium in Sludge Granulation During UASB Reactor Start-up. Water Research. 35, 4: 1052-1060.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ซีโอดีตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
2	1040	680	640	640
5	1000	680	640	660
7	1000	680	700	660
9	1000	500	440	540
11	1080	500	420	540
12	1040	540	480	720
17	1080	640	640	640
19	1160	460	640	680
21	1200	560	560	700
23	1160	420	340	480
24	1160	440	380	480
26	1080	340	440	460
30	1160	320	400	400
32	1560	450	450	405
33	1560	210	255	285
36	1600	400	128	272
37	1640	378	189	252
40	1600	344	168	168
43	1600	161	147	98
46	1640	144	120	48
47	1560	88	96	64
50	1600	72	120	64
51	1600	40	32	32
54	1560	48	32	32
57	1600	40	32	40
58	1600	48	48	32
60	1560	16	24	24
65	1640	24	24	24
67	1600	24	24	24
69	1640	32	24	32
71	1560	32	16	32
73	1560	16	24	16
75	1600	32	32	24
78	1600	32	32	32
80	1560	48	24	16
82	1600	32	24	24
86	1560	40	24	16
88	1600	32	24	24
90	1600	40	32	32
93	1560	24	24	24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ซีโอดีตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
95	1560	24	24	16
97	1600	24	24	32
100	1960	24	16	24
102	1960	16	16	16
104	2000	32	32	32
107	2000	24	32	32
109	2080	32	16	32
111	2000	32	16	24
114	2120	32	24	32
116	2080	24	24	24
118	2080	24	24	24
120	2000	16	32	16
122	2000	40	16	40
124	2080	32	32	40
128	1960	24	24	24
130	2000	24	16	24
132	2000	24	24	16
135	2080	24	16	16
137	2000	24	16	32
140	1840	24	24	24
142	2080	16	24	16
144	1840	16	16	24
146	2080	16	16	24
148	2000	24	24	24
150	2080	16	24	24
152	2000	16	16	16
จำนวน	66	66	66	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (%)
2	34.6	38.5	38.5
5	32.0	36.0	34.0
7	32.0	30.0	34.0
9	50.0	56.0	46.0
11	53.7	61.1	50.0
12	48.1	53.8	30.8
17	40.7	40.7	40.7
19	60.3	44.8	41.4
21	53.3	53.3	41.7
23	63.8	70.7	58.6
24	62.1	67.2	58.6
26	68.5	59.3	57.4
30	72.4	65.5	65.5
32	71.2	71.2	74.0
33	86.5	83.7	81.7
36	75.0	92.0	83.0
37	76.9	88.5	84.6
40	78.5	89.5	89.5
43	89.9	90.8	93.9
46	91.2	92.7	97.1
47	94.4	93.8	95.9
50	95.5	92.5	96.0
51	97.5	98.0	98.0
54	96.9	97.9	97.9
57	97.5	98.0	97.5
58	97.0	97.0	98.0
60	99.0	98.5	98.5
65	98.5	98.5	98.5
67	98.5	98.5	98.5
69	98.0	98.5	98.0
71	97.9	99.0	97.9
73	99.0	98.5	99.0
75	98.0	98.0	98.5
78	98.0	98.0	98.0
80	96.9	98.5	99.0
82	98.0	98.5	98.5
86	97.4	98.5	99.0
88	98.0	98.5	98.5
90	97.5	98.0	98.0
93	98.5	98.5	98.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (%)
95	98.5	98.5	99.0
97	98.5	98.5	98.0
100	98.8	99.2	98.8
102	99.2	99.2	99.2
104	98.4	98.4	98.4
107	98.8	98.4	98.4
109	98.5	99.2	98.5
111	98.4	99.2	98.8
114	98.5	98.9	98.5
116	98.8	98.8	98.8
118	98.8	98.8	98.8
120	99.2	98.4	99.2
122	98.0	99.2	98.0
124	98.5	98.5	98.1
128	98.8	98.8	98.8
130	98.8	99.2	98.8
132	98.8	98.8	99.2
135	98.8	99.2	99.2
137	98.8	99.2	98.4
140	98.7	98.7	98.7
142	99.2	98.8	99.2
144	99.1	99.1	98.7
146	99.2	99.2	98.8
148	98.8	98.8	98.8
150	99.2	98.8	98.8
152	99.2	99.2	99.2
จำนวน	66	66	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
2	825	895	880	970
5	820	820	840	842
7	820	820	830	830
9	810	810	820	820
11	810	810	825	825
12	820	825	835	820
17	820	820	850	850
19	810	815	815	812
21	820	825	850	850
23	960	960	962	965
24	985	985	990	985
26	985	990	1000	985
30	990	1005	1010	992
32	1120	1125	1158	1120
33	1150	1170	1200	1212
36	1150	1160	1162	1178
37	1135	1175	1150	1165
40	1150	1182	1165	1165
43	1120	1180	1180	1170
46	1093	1138	1150	1170
47	1100	1125	1195	1175
50	1115	1145	1165	1170
51	1093	1100	1225	1182
54	1120	1130	1120	1145
57	1120	1155	1130	1145
58	1125	1153	1133	1143
60	1112	1155	1160	1145
65	1115	1145	1165	1170
67	1120	1142	1137	1127
69	1120	1160	1165	1127
71	1115	1182	1165	1178
73	1160	1160	1185	1165
75	1135	1160	1165	1172
78	1122	1160	1185	1170
80	1135	1142	1165	1172
82	1140	1160	1165	1180
86	1120	1160	1152	1188
88	1140	1150	1165	1158
90	1140	1150	1152	1188
93	1120	1145	1158	1160

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
95	1112	1125	1152	1128
97	1140	1145	1152	1150
100	1430	1450	1465	1430
102	1435	1455	1500	1442
104	1460	1482	1490	1480
107	1490	1498	1495	1490
109	1460	1498	1478	1490
111	1460	1500	1512	1498
114	1470	1545	1528	1498
116	1490	1505	1505	1518
118	1490	1520	1505	1512
120	1435	1468	1465	1488
122	1448	1485	1478	1458
124	1455	1490	1490	1468
128	1485	1505	1520	1500
130	1490	1522	1518	1525
132	1460	1500	1490	1498
135	1475	1490	1510	1512
137	1488	1520	1520	1512
140	1345	1465	1465	1452
142	1482	1515	1522	1505
144	1412	1492	1485	1490
146	1475	1540	1528	1510
148	1460	1512	1525	1498
150	1460	1525	1515	1490
152	1475	1535	1520	1505
จำนวน	66	66	66	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
2	15.0	295	300	290
5	17.5	350	312	418
7	17.5	352	306	360
9	15.0	390	315	390
11	12.5	388	350	368
12	12.5	364	326	412
17	17.5	382	375	352
19	17.5	394	405	446
21	17.5	320	315	354
23	15.0	338	270	300
24	15.0	285	172	333
26	17.5	222	185	240
30	15.0	168	178	175
32	22.5	308	320	310
33	20.0	302	298	270
36	22.5	289	160	152
37	22.5	208	140	132
40	22.5	170	115	120
43	25.0	120	112	105
46	22.5	88	73	40
47	20.0	53	63	38
50	20.0	20	20	20
51	22.5	38	33	23
54	27.5	50	48	50
57	27.5	38	38	33
58	22.5	28	23	23
60	22.5	15	18	18
65	22.5	33	20	23
67	17.5	15	25	23
69	17.5	25	25	23
71	22.5	25	30	35
73	20.0	20	43	23
75	20.0	20	33	23
78	20.0	25	30	25
80	22.5	23	25	23
82	25.0	25	28	23
86	22.5	23	28	28
88	25.0	23	25	20
90	25.0	25	28	25
93	25.0	20	28	25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
95	22.5	30	23	20
97	25.0	20	23	20
100	30.0	18	23	40
102	22.5	35	43	28
104	25.0	25	25	25
107	37.5	23	25	25
109	22.5	20	23	38
111	22.5	23	23	28
114	22.5	23	25	30
116	25.0	20	23	25
118	22.5	23	25	25
120	25.0	23	23	28
122	22.5	25	25	23
124	25.0	25	23	23
128	30.0	20	25	23
130	25.0	20	23	30
132	25.0	25	23	28
135	22.5	25	28	30
137	22.5	25	28	23
140	15.0	25	45	40
142	25.0	20	33	30
144	15.0	23	30	30
146	22.5	25	28	25
148	22.5	23	30	30
150	15.0	20	33	30
152	22.5	20	28	28
จำนวน	66	66	66	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก
2	0.02	0.49	0.51	0.45
5	0.02	0.43	0.37	0.50
7	0.02	0.43	0.37	0.43
9	0.02	0.48	0.38	0.48
11	0.02	0.48	0.42	0.45
12	0.02	0.44	0.39	0.50
17	0.02	0.47	0.44	0.41
19	0.02	0.48	0.50	0.55
21	0.02	0.39	0.37	0.42
23	0.02	0.35	0.28	0.31
24	0.02	0.29	0.17	0.34
26	0.02	0.22	0.19	0.24
30	0.02	0.17	0.18	0.18
32	0.02	0.33	0.34	0.35
33	0.02	0.26	0.25	0.22
36	0.02	0.25	0.14	0.13
37	0.02	0.18	0.12	0.11
40	0.02	0.14	0.10	0.10
43	0.02	0.10	0.09	0.09
46	0.02	0.08	0.06	0.03
47	0.02	0.05	0.05	0.03
50	0.02	0.02	0.02	0.02
51	0.02	0.03	0.03	0.02
54	0.02	0.04	0.04	0.04
57	0.02	0.03	0.03	0.03
58	0.02	0.02	0.02	0.02
60	0.02	0.01	0.02	0.02
65	0.02	0.03	0.02	0.02
67	0.02	0.01	0.02	0.02
69	0.02	0.02	0.02	0.02
71	0.02	0.02	0.03	0.03
73	0.02	0.02	0.04	0.02
75	0.02	0.02	0.03	0.02
78	0.02	0.02	0.03	0.02
80	0.02	0.02	0.02	0.02
82	0.02	0.02	0.02	0.02
86	0.02	0.02	0.02	0.02
88	0.02	0.02	0.02	0.02
90	0.02	0.02	0.02	0.02
93	0.02	0.02	0.02	0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก
95	0.02	0.03	0.02	0.02
97	0.02	0.02	0.02	0.02
100	0.02	0.01	0.02	0.03
102	0.02	0.02	0.03	0.02
104	0.02	0.02	0.02	0.02
107	0.03	0.02	0.02	0.02
109	0.02	0.01	0.02	0.03
111	0.02	0.02	0.01	0.02
114	0.02	0.01	0.02	0.02
116	0.02	0.01	0.01	0.02
118	0.02	0.01	0.02	0.02
120	0.02	0.02	0.02	0.02
122	0.02	0.02	0.02	0.02
124	0.02	0.02	0.02	0.02
128	0.02	0.01	0.02	0.02
130	0.02	0.01	0.01	0.02
132	0.02	0.02	0.02	0.02
135	0.02	0.02	0.02	0.02
137	0.02	0.02	0.02	0.01
140	0.01	0.02	0.03	0.03
142	0.02	0.01	0.02	0.02
144	0.01	0.02	0.02	0.02
146	0.02	0.02	0.02	0.02
148	0.02	0.01	0.02	0.02
150	0.01	0.01	0.02	0.02
152	0.02	0.01	0.02	0.02
จำนวน	66	66	66	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-6 พีเอชตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก
2	8.20	6.83	6.93	6.83
3	8.07	6.35	6.41	6.41
5	8.11	6.40	6.45	6.67
7	8.15	6.78	6.68	6.72
9	8.30	6.72	7.07	6.90
11	8.28	6.70	6.87	6.84
12	8.24	6.65	6.90	6.96
17	8.16	6.63	6.72	6.81
19	8.16	6.77	6.57	6.61
21	8.14	6.48	6.58	6.58
23	8.20	6.60	6.77	6.78
24	8.16	6.54	6.75	6.70
25	8.22	6.58	6.73	6.75
26	8.21	6.75	6.84	6.90
30	8.14	6.65	6.80	6.61
32	8.30	6.50	6.74	6.75
33	8.34	7.27	7.10	7.32
36	8.29	6.69	7.02	7.04
37	8.26	6.66	7.08	7.06
40	8.25	6.61	7.06	6.97
43	8.27	7.13	6.84	6.96
46	8.24	6.95	6.93	7.09
47	8.23	6.83	7.05	7.14
50	8.15	6.72	6.97	6.80
51	8.18	6.57	6.70	6.71
54	8.16	7.18	6.80	7.01
57	8.17	6.96	6.99	7.02
58	8.23	6.85	6.98	6.88
60	8.20	6.81	6.79	6.77
65	8.11	6.84	6.82	6.85
67	8.16	6.78	6.74	6.78
69	8.20	6.87	6.82	6.80
71	8.14	6.93	6.91	6.87
73	8.25	6.85	7.01	6.84
75	8.22	6.80	6.98	6.90
78	8.19	6.79	6.91	6.97
80	8.24	7.03	6.88	7.15
82	8.20	7.00	6.92	7.09
86	8.20	6.95	6.89	7.02
88	8.22	6.91	6.86	6.95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-6 พีเอชตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก
90	8.21	6.91	6.89	7.02
93	8.19	6.93	6.91	7.01
95	8.23	6.96	6.92	7.02
97	8.22	6.96	6.91	7.00
100	8.30	7.13	7.02	7.23
102	8.34	7.20	7.01	7.26
104	8.33	7.10	7.03	7.24
107	8.34	7.30	7.03	7.19
109	8.36	7.03	7.04	7.36
111	8.36	7.11	7.04	7.35
114	8.41	7.18	7.09	7.37
116	8.37	6.97	7.34	7.11
118	8.35	7.01	7.20	7.29
120	8.34	7.09	7.25	7.35
122	8.34	7.07	7.38	7.23
124	8.36	7.13	7.25	7.30
128	8.35	7.25	7.21	7.32
130	8.35	7.20	7.21	7.32
132	8.37	7.18	7.24	7.31
135	8.35	7.02	7.16	7.13
137	8.40	7.22	7.28	7.28
140	8.11	7.29	7.50	7.41
142	8.36	7.40	7.57	7.21
144	8.01	7.35	7.30	6.98
146	8.35	7.55	7.39	7.08
148	8.35	7.30	7.31	7.19
150	8.30	7.21	7.28	7.15
152	8.34	7.28	7.25	7.11
จำนวน	68	68	68	68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-7 ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)
2	85	87	85
9	74	46	47
21	45	31	34
25	40	37	38
31	943	56	62
33	620	72	134
36	1325	100	121
44	647	95	511
46	314	54	94
53	793	265	175
58	133	129	53
65	616	125	84
76	38	14	948
82	14	15	21
88	45	64	108
95	92	108	173
104	174	69	178
108	112	57	696
114	132	149	264
120	14	457	1214
128	39	65	97
140	28	53	37
144	18	195	33
150	26	87	18
158	23	64	20
จำนวน	25	25	25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-8 ของแข็งแขวนลอยระเหยตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
9	62	38	38
21	41	30	28
25	32	31	31
31	585	43	39
33	426	55	102
36	921	76	96
44	422	67	347
46	218	40	71
53	546	188	133
58	99	94	42
65	434	91	63
76	27	11	627
82	11	12	18
88	32	51	82
95	67	81	123
104	118	50	132
108	83	44	483
114	103	107	199
120	11	344	826
128	27	50	71
140	20	42	29
144	11	132	26
150	20	67	11
158	15	50	12
จำนวน	24	24	24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-9 อุณหภูมิตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ทุกถังปฏิกรณ์ น้ำออก (องศาเซลเซียส)	วันที่ทำการทดลอง	ทุกถังปฏิกรณ์ น้ำออก (องศาเซลเซียส)
2	31.5	73	28.5
5	31.0	75	29.0
7	30.0	78	29.0
9	29.0	80	30.5
11	28.0	82	30.5
12	28.0	86	31.5
17	30.0	88	29.5
18	30.0	90	29.5
19	29.5	93	29.0
21	29.0	95	28.5
22	30.0	97	28.5
23	29.5	100	29.0
24	29.0	101	29.5
25	29.5	102	29.0
26	30.0	104	30.0
28	29.0	107	30.5
29	29.0	109	29.0
30	28.0	111	30.0
31	28.0	114	30.5
32	29.5	116	29.5
33	30.0	118	30.0
36	29.5	120	30.0
37	29.5	122	31.0
40	29.0	124	30.5
43	29.5	128	30.5
46	30.0	130	30.0
47	31.0	132	30.0
50	31.5	135	30.5
51	30.0	137	29.5
54	30.5	140	28.0
57	31.0	142	29.0
58	31.0	144	28.5
60	31.5	146	29.5
65	31.5	148	29.5
67	30.5	150	28.5
69	30.5	152	29.0
71	30.0	จำนวน	73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (มล./วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (มล./วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (มล./วัน)
60	4154	4262	3960
65	3724	3806	4224
71	4154	4098	-
78	4000	4262	2044
80	3857	4098	2185
88	4320	3947	1864
93	4154	4098	2044
111	5400	5608	3727
114	4909	5328	4224
120	6000	5328	4526
130	5684	5608	3727
137	5400	5608	4526
142	5400	5074	3960
150	5684	5920	4224
จำนวน	14	14	13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 การขยายตัวของชั้นตะกอนตลอดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%)
7	74	51	48
9	53	46	53
10	51	51	44
11	79	58	51
12	48	51	39
14	60	55	41
17	51	63	53
18	48	51	55
19	53	51	51
21	74	51	51
22	110	53	51
23	63	63	48
24	100	58	58
25	91	58	55
26	136	67	60
28	136	63	60
29	136	65	63
30	136	53	53
31	136	63	65
32	136	84	67
33	136	65	88
36	136	136	136
37	136	136	136
40	136	60	70
43	136	67	67
46	136	38	44
47	136	38	42
50	33	51	47
51	38	76	40
54	51	136	36
57	40	45	62
58	33	33	56
60	84	62	136
65	40	60	104
67	11	42	136
69	7	65	136
71	0	71	136
73	0	38	136
75	0	80	136
78	0	111	87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 การขยายตัวของชั้นตะกอนตลอดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 น้ำออก (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 น้ำออก (มก./ล.)
80	0	89	73
82	0	96	38
86	0	98	136
88	0	109	27
90	0	109	44
93	0	109	136
95	0	96	44
97	0	73	53
100	136	136	73
102	136	136	136
104	136	136	136
107	136	136	136
109	136	136	136
111	136	136	136
114	136	136	136
116	136	136	136
118	136	136	136
120	136	136	136
122	136	136	136
124	136	136	136
128	136	136	136
130	136	136	136
132	136	136	136
135	136	136	136
137	136	136	136
140	136	136	136
142	136	136	136
144	136	136	136
146	136	136	136
148	136	136	136
150	136	136	136
152	136	136	136
157	136	0	0
159	136	0	0
161	136	0	0
163	136	0	0
165	136	0	0
จำนวน	77	77	77

ภาคผนวก ข

ข้อมูลขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 D_{50} ที่ระดับความสูง 80 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)
0	33.2	33.2	33.2
16	30.5	56.4	51.8
30	38.7	62.1	57.4
44	44.4	80.9	62.8
60	59.9	71.3	74.3
95	76.2	91.5	61.1
133	113.5	109.3	63.0
147	118.9	104.1	60.0
165	129.9	149.1	126.6
จำนวน	9	9	9

ตารางที่ ข-2 D_{50} ที่ระดับความสูง 60 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)
0	33.2	33.2	33.2
16	35.2	74.9	71.2
30	44.8	83.2	80.2
44	47.0	73.2	71.9
60	62.3	74.7	79.2
95	81.4	94.1	64.5
133	117.0	110.1	64.9
147	122.5	114.0	60.1
165	134.2	166.7	129.4
จำนวน	9	9	9

ตารางที่ ข-3 D_{50} ที่ระดับความสูง 40 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)
0	33.2	33.2	33.2
16	37.6	82.9	82.2
30	42.7	84.4	74.4
44	46.1	73.6	68.8
60	62.1	75.8	77.4
95	79.2	92.7	63.6
133	117.6	108.3	63.2
147	127.2	111.3	64.4
165	135.8	177.1	131.3
จำนวน	9	9	9

ตารางที่ ข-4 D_{50} ที่ระดับความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)
0	33.2	33.2	33.2
16	35.9	79.7	84.2
30	40.9	85.6	79.5
44	45.0	76.2	74.7
60	62.1	80.2	78.1
95	84.1	91.3	64.5
133	118.0	113.6	58.8
147	124.1	130.0	63.2
165	140.3	177.4	135.6
จำนวน	9	9	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 D_{50} ที่ระดับความสูง 0 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์

วันที่ทำการทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)	D_{50} (ไมโครเมตร)
0	33.2	33.2	33.2
16	33.1	102.2	81.2
30	38.9	67.5	85.9
44	43.8	66.0	69.8
60	58.5	85.5	73.4
95	80.9	92.9	64.8
133	116.2	131.9	71.3
147	126.9	139.5	78.3
165	160.6	217.7	125.8
จำนวน	9	9	9

ตารางที่ ข-6 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 16 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	6.7	2.6	2.6
11-50	58.2	57.9	30.2	29.0
51-100	16.5	17.9	25.7	24.9
101-200	8.9	7.5	20.7	22.8
201-500	5.9	7.4	17.5	16.7
501-2000	0	2.6	3.5	4.1

ตารางที่ ข-7 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 30 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	5.3	2.0	1.7
11-50	58.2	55.1	27.6	29.0
51-100	16.5	24.4	26.3	29.2
101-200	8.9	8.4	20.8	23.3
201-500	5.9	6.1	18.4	16.4
501-2000	0	0.7	5.0	0.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 44 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	3.8	2.0	2.2
11-50	58.2	52.6	29.6	30.4
51-100	16.5	28.5	30.0	30.2
101-200	8.9	11.3	24.9	25.4
201-500	5.9	4.0	13.4	11.8
501-2000	0	0.0	0.0	0.0

ตารางที่ ค-9 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 60 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	2.3	1.3	1.8
11-50	58.2	35.0	23.7	26.6
51-100	16.5	39.2	37.3	34.2
101-200	8.9	19.6	25.7	27.9
201-500	5.9	4.0	11.9	9.6
501-2000	0	0.0	0.1	0.0

ตารางที่ ข-10 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 95 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	1.4	1.2	2.2
11-50	58.2	18.9	19.2	36.5
51-100	16.5	41.2	34.6	29.3
101-200	8.9	29.9	28.4	19.0
201-500	5.9	7.6	14.8	11.1
501-2000	0	1.1	1.8	1.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-11 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 133 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	0.6	0.8	1.9
11-50	58.2	6.9	12.4	40.1
51-100	16.5	30.5	30.0	31.9
101-200	8.9	47.5	34.0	17.3
201-500	5.9	14.5	19.7	8.1
501-2000	0	0.0	3.2	0.8

ตารางที่ ข-12 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 147 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	0.6	0.9	1.9
11-50	58.2	5.6	11.3	36.6
51-100	16.5	27.9	25.3	31.7
101-200	8.9	49.3	32.3	17.5
201-500	5.9	16.6	25.9	9.7
501-2000	0	0.0	4.3	2.6

ตารางที่ ข-13 ขนาดทั้งหมดของวันที่ 165 เทียบกับตอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (%โดยปริมาณ)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (%โดยปริมาณ)
0-10	10.4	0.9	0.7	0.8
11-50	58.2	2.8	5.0	8.1
51-100	16.5	19.1	15.0	23.9
101-200	8.9	56.3	36.5	38.9
201-500	5.9	20.1	38.7	25.2
501-2000	0	1.0	4.2	3.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทำ Jar Test

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลการทำ Jar Test

ปริมาณโพลีเมอร์ (มก./ก.เอสเอส)	ความขุ่น (NTU)	SV30 (มล.)
0	60.0	270
1	28.0	270
2	6.5	270
4	4.0	250
6	3.0	210
8	2.5	210

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการกระจายตัวของจุลินทรีย์ตามความสูงของถังปฏิกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 ของแข็งแขวนลอยตามความสูงของถังปฏิกรณ์

ความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์ (ซม.)	ของแข็งแขวนลอย		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (มก./ล.)
0	22.9	25.5	22.6
20	6.8	12.4	3.6
40	5.8	10.8	1.9
60	5.8	7.8	1.7
80	5.2	8.5	2.0

ตารางที่ ง-2 ของแข็งแขวนลอยระเหยตามความสูงของถังปฏิกรณ์

ความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์ (ซม.)	ของแข็งแขวนลอยระเหย		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (มก./ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (มก./ล.)
0	15.9	17.5	14.8
20	4.8	9.0	2.6
40	4.2	8.1	1.4
60	4.2	5.7	1.3
80	3.8	6.2	1.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 1

จากค่าของแข็งแขวนลอยในตารางที่ ง-1 จะนำมาหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ได้ดังนี้

หาความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์เฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 0-20 ซม. $= \frac{22.9+6.8}{2} = 14.85$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 20-40 ซม. $= \frac{6.8+5.8}{2} = 6.3$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 40-60 ซม. $= \frac{5.8+5.8}{2} = 5.8$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 60-80 ซม. $= \frac{5.8+5.2}{2} = 5.5$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 80-106 ซม. ≈ 5.5 ก.เอสเอส/ล.

หาปริมาตรน้ำเฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 0-20 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 20-40 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 40-60 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 60-80 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 80-106 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 26 \times 10^{-3} = 0.595$ ลิตร

จาก $N_{รวม}V_{รวม} = N_1V_1 + N_2V_2 + N_3V_3 + N_4V_4 + N_5V_5$

$$N_{รวม} = \frac{[14.85 \times 0.458] + [6.3 \times 0.458] + [5.8 \times 0.458] + [5.5 \times 0.458] + [5.5 \times 0.595]}{2.43}$$

$= 7.46$ ก.เอสเอส/ล.

ความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 เท่ากับ 7.46 ก.เอสเอส/ล.

การหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2

จากค่าของแข็งแขวนลอยในตารางที่ ง-1 จะนำมาหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ได้ดังนี้

หาความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์เฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 0-20 ซม. $= \frac{25.5+12.4}{2} = 18.95$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 20-40 ซม. $= \frac{12.4+10.8}{2} = 11.6$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 40-60 ซม. $= \frac{10.8+7.8}{2} = 9.3$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 60-80 ซม. $= \frac{7.8+8.5}{2} = 8.15$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 80-106 ซม. ≈ 8.15 ก.เอสเอส/ล.

หาปริมาตรน้ำเฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 0-20 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 20-40 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 40-60 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 60-80 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 80-106 ซม. $= \left[\pi \times \left(\frac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 26 \times 10^{-3} = 0.595$ ลิตร

จาก $N_{รวม}V_{รวม} = N_1V_1 + N_2V_2 + N_3V_3 + N_4V_4 + N_5V_5$

$$N_{รวม} = \frac{[18.95 \times 0.458] + [11.6 \times 0.458] + [9.3 \times 0.458] + [8.15 \times 0.458] + [8.15 \times 0.595]}{2.43}$$

$= 11.04$ ก.เอสเอส/ล.

ความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 เท่ากับ 11.04 ก.เอสเอส/ล.

การหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 3

จากค่าของแข็งแขวนลอยในตารางที่ ง-1 จะนำมาหาค่าความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ได้ดังนี้

หาความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์เฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 0-20 ซม. $= \dfrac{22.6+3.6}{2} = 13.1$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 20-40 ซม. $= \dfrac{3.6+1.9}{2} = 2.75$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 40-60 ซม. $= \dfrac{1.9+1.7}{2} = 1.8$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 60-80 ซม. $= \dfrac{1.7+2}{2} = 1.85$ ก.เอสเอส/ล.

ของแข็งแขวนลอยที่ความสูง 80-106 ซม. ≈ 1.85 ก.เอสเอส/ล.

หาปริมาตรน้ำเฉลี่ยในแต่ละระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 0-20 ซม. $= \left[\pi \times \left(\dfrac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 20-40 ซม. $= \left[\pi \times \left(\dfrac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 40-60 ซม. $= \left[\pi \times \left(\dfrac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 60-80 ซม. $= \left[\pi \times \left(\dfrac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 20 \times 10^{-3} = 0.458$ ลิตร

ปริมาตรน้ำที่ความสูง 80-106 ซม. $= \left[\pi \times \left(\dfrac{5.4}{2}\right)^2\right] \times 26 \times 10^{-3} = 0.595$ ลิตร

จาก $N_{รวม}V_{รวม} = N_1V_1 + N_2V_2 + N_3V_3 + N_4V_4 + N_5V_5$

$$N_{รวม} = \frac{[13.1 \times 0.458] + [2.75 \times 0.458] + [1.8 \times 0.458] + [1.85 \times 0.458] + [1.85 \times 0.595]}{2.43}$$

$= 4.13$ ก.เอสเอส/ล.

ความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 เท่ากับ 4.13 ก.เอสเอส/ล.

ภาคผนวก ฉ

การหาค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน (SMA)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity) ตามวิธีของ Koster และคณะ (1986)

การหาความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี ทำโดยใช้แบบจำลองแบบแบตซ์ โดยการนำตะกอนจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีมาทำการทดลองกับสารอาหารที่เตรียมไว้และวัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น โดยเติมอาหารเพียงครั้งเดียวและไม่มีการเติมสารอาหารเพิ่ม การทดลองควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 35 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และการทดลอง

ในการทดลองใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร สำหรับใส่เม็ดตะกอนจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี ด้านบนมีจุกยางสำหรับปิดปากขวด และมีหลอดแก้วกับสายยางซิลิโคนเพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นผ่านไปยังขวดที่ใส่สารละลาย NaOH ความเข้มข้นประมาณ 1 N เพื่อทำหน้าที่ดักก๊าซอื่นที่ไม่ใช่ก๊าซมีเทน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ให้ละลายอยู่ในสารละลายดังกล่าว ส่วนก๊าซมีเทนจะแยกตัวออกแล้วเข้าสู่หลอดแก้วกับสายยางซิลิโคนที่ต่อแยกไว้ เพื่อนำก๊าซมีเทนไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทนจะใช้บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด และใช้สายยางซิลิโคนเชื่อมต่อบิวเรตทั้ง 2 ชุดเข้าด้วยกันที่บริเวณด้านล่างของบิวเรต ให้มีลักษณะคล้ายกับตัว U โดยก๊าซมีเทนจะผ่านสายยางซิลิโคนเข้าสู่ทางด้านบนของบิวเรต ซึ่งก๊าซมีเทนจะไปแทนที่น้ำที่อยู่ในบิวเรตทำให้สามารถวัดปริมาณก๊าซมีเทนได้ ขวดชมพู่ที่นำมาใช้ในการทดลองให้ไล่อากาศด้วยอัดก๊าซ N_2 กับ CO_2 (70 : 30 v/v)

สารอาหารที่ใช้คือกรดอะซิติก ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ซีโอดีประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.2 – 7.5 ด้วยสารละลาย $NaHCO_3$ ใช้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ปริมาตร 25 มิลลิลิตร(ที่สภาวะตกตะกอน) ผสมกับสารอาหารปริมาตร 125 มิลลิลิตร รวมเป็นปริมาตรทั้งหมด 150 มิลลิลิตร นำขวดไปวางบนอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่วง 35 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง แล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ทำการทดลอง เพื่อหาความชันของกราฟสำหรับคำนวณ ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน(กรัมซีโอดี มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน)

การคำนวณความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนจะใช้อัตราการเกิดก๊าซสูงสุดในระหว่างการทดลอง ซึ่งก็คือค่าความชันสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมกับเวลา โดยสามารถทำการทดลองได้จากสูตรดังนี้

SMA = R x 24 / (CF x V x VSS)

โดยที่

SMA	คือ	Specific Methanogenic Activity (กรัมซีโอดี มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน)
R	คือ	อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) หรือค่าความเข้มข้นของกราฟระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมกับเวลา
CF	คือ	Conversion Factor (มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี) ดังตาราง
V	คือ	Effective Liquid Volume Digester (ลิตร)
VSS	คือ	Volatile Suspended Solid (กรัมวีเอสเอสต่อลิตร)

ตารางที่ ฉ-1 ค่า Conversion Factor

Temperature (องศาเซลเซียส)	Conversion Factor (มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี)
10	363
15	369
20	376
25	382
30	388
35	395
40	401
45	408

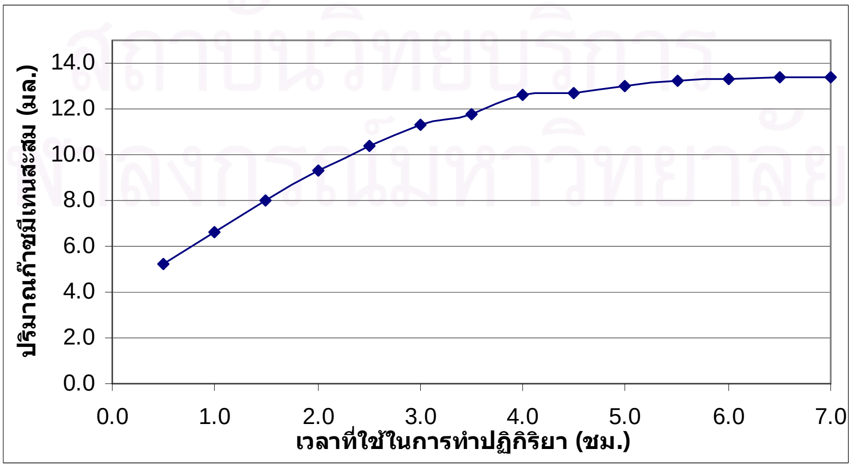
ในการทดลองนี้จะทำการเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยเลือกที่ระดับความสูง 20 ซม.จากก้นถังปฏิกรณ์ มาเป็นตัวแทนของตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดของแต่ละถังปฏิกรณ์ เพื่อนำมาใช้ในการหาความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน

โดยตัวอย่างการคำนวณหาความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนนั้น เมื่อนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ไปดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นแล้ว จะได้ข้อมูลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่างๆตลอดการทดลอง แสดงดังตารางที่ ฉ-2

ตารางที่ ฉ-2 ข้อมูลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดการทดลอง

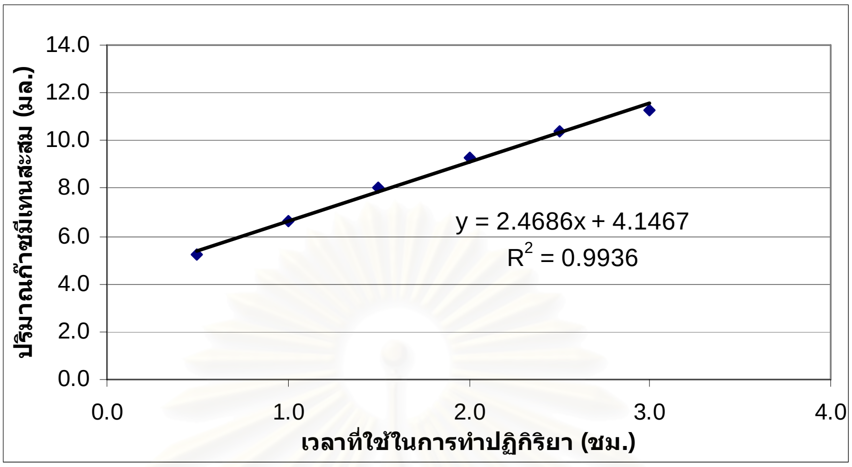
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชม.)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น			
	ครั้งที่ 1 (มล.)	ครั้งที่ 2 (มล.)	เฉลี่ย (มล.)	สะสม (มล.)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	5.1	5.4	5.2	5.2
1.0	1.4	1.4	1.4	6.6
1.5	1.5	1.4	1.4	8.0
2.0	1.4	1.2	1.3	9.3
2.5	1.3	0.9	1.1	10.4
3.0	0.7	1.1	0.9	11.3
3.5	0.4	0.6	0.5	11.8
4.0	0.8	0.8	0.8	12.6
4.5	0.2	0.0	0.1	12.7
5.0	0.2	0.4	0.3	13.0
5.5	0.3	0.2	0.2	13.2
6.0	0.1	0.1	0.1	13.3
6.5	0.0	0.2	0.1	13.4
7.0	0.0	0.0	0.0	13.4

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลในตารางที่ ฉ-2 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ ฉ-1



รูปที่ ฉ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อนำกราฟช่วงที่มีความชันมากที่สุดไปหาค่าความชันจะได้ดังรูปที่ ฉ-2 ซึ่งค่าความชันที่ได้ คือ ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน (R)



รูปที่ ฉ-2 ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

จากสูตร SMA = R / (CF x V x VSS)

แทนค่า SMA = (2.5 x 24) / (395 x 0.225 x 1.52)

ดังนั้น SMA = 0.44 gCOD-CH_4/gVSS-day

ผลการทดลอง

ตารางที่ ฉ-3 ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (R)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (มล.มีเทน/วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (มล.มีเทน/วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (มล.มีเทน/วัน)
0	1.1	1.1	1.1
2	-	-	0.6
3	2.5	4.5	0.4
4	2	2.5	

ตารางที่ ฉ-4 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ของแข็งแขวนลอยระเหย		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ก.วีเอสเอส/ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (ก.วีเอสเอส/ล.)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (ก.วีเอสเอส/ล.)
0	4.1	4.1	4.1
2	-	-	1.2
3	2.9	2.3	0.4
4	0.8	1.5	

ตารางที่ ฉ-4 ค่า Specific Methanogenic Activity

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	Specific Methanogenic Activity (SMA)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (gCOD-CH_4/gVSS-day)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (gCOD-CH_4/gVSS-day)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (gCOD-CH_4/gVSS-day)
0	0.07	0.07	0.07
2	-	-	0.13
3	0.23	0.53	0.24
4	0.67	0.44	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธงชัย มหัจฉริยวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเทพศิรินทร์ เมื่อปีพ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปี พ.ศ. 2546 และเข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีพ.ศ. 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย