

การใช้ pulp powder สำหรับสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี



นายโกสินทร์ สุนทรโสภา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

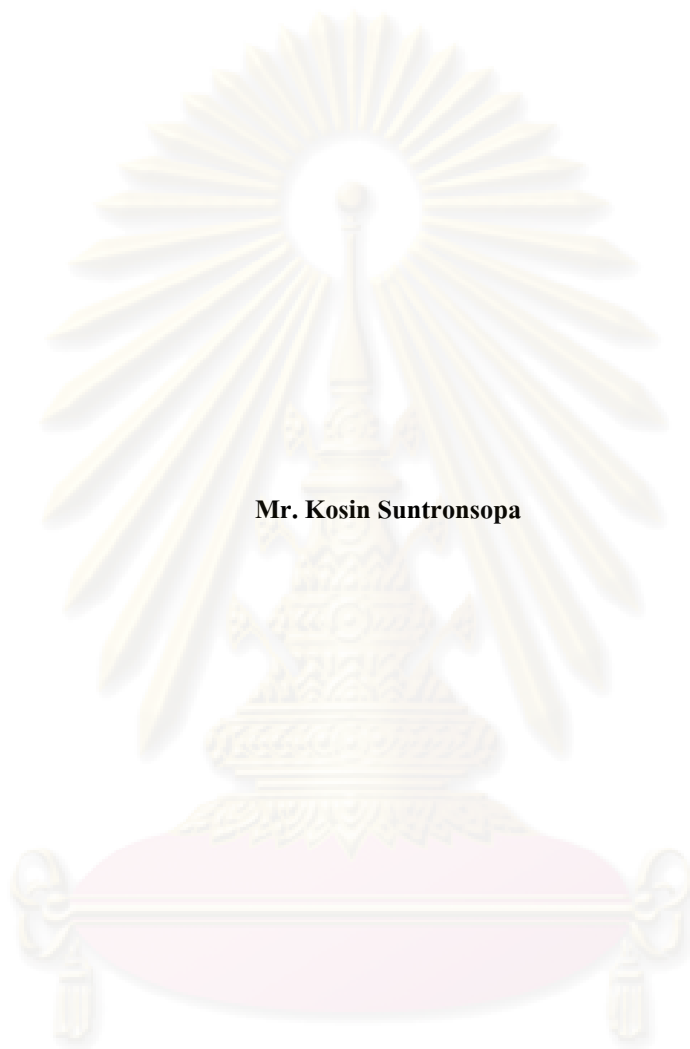
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USING PULP POWDER FOR GRANULATION OF SLUDGE IN UASB REACTOR



Mr. Kosin Suntronsopa

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science**

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ pulp powder สำหรับสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
ยูเอเอสบี

โดย

นายโกสินทร์ สุนทร โสภา

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ
(ดร. สมชาย คารารัตน์)

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โกสินทร์ สุนทรโสภณ : การใช้ pulp powder สำหรับสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
ยูเอเอสบี (USING PULP POWDER FOR GRANULATION OF SLUDGE IN UASB
REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, 206 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ pulp powder ต่อการสร้างเม็ดตะกอน
จุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียจากการกลั่นเอทานอล โดยใช้แบบจำลองระบบ
ยูเอเอสบีลักษณะเหมือนกันจำนวน 4 ดังปฏิกรณ์ โดยทำการเติม pulp powder ปริมาณ 800,
600 และ 400 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งแขวนลอย ลงในดังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
ร่วมกับการเติม polymer ประจุบวก ปริมาณ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งแขวนลอย ในทุก
ดังปฏิกรณ์ สำหรับดังปฏิกรณ์ที่ 4 แต่ไม่มีการเติม pulp powder แต่เติม polymer ปริมาณ
2 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งแขวนลอย เพียงอย่างเดียว ทำการเดินระบบในช่วงอัตราภาระบรรทุก
สารอินทรีย์ 2-6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเติม pulp powder ที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อ
กรัมของแข็งแขวนลอย ร่วมกับการเติม polymer ในดังปฏิกรณ์ที่ 3 สามารถสร้างเม็ดตะกอน
จุลินทรีย์ขนาดที่มองเห็นได้ใน 22 วัน เมื่อทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก
2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน หลังจาก 68 วัน ไปเป็น 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน จะเพิ่มปริมาณเม็ดตะกอน
จุลินทรีย์ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร จาก 17.51% ไปเป็น 40.14% หรือเพิ่มขึ้นถึง
2.29 เท่า เมื่อ 131 วัน

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเติม pulp powder ในปริมาณที่เหมาะสมร่วมกับ
polymer สามารถส่งเสริมกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ และลดระยะเวลาในการเดิน
ระบบให้สั้นลงกว่าวิธีการโดยทั่วไป โดยปริมาณ pulp powder ที่แนะนำให้ใช้ คือ 400 มิลลิกรัม
ต่อกรัมของแข็งแขวนลอย ร่วมกับการเติม polymer ปริมาณ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งแขวนลอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....*โกสินทร์ สุนทรโสภณ*

ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*จ.ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล*

488 90580 20 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : UASB / GRANULATION / ETHANOL STILLAGE / PULP POWDER / POLYMER
KOSIN SUNTRONSOPA : USING PULP POWDER FOR GRANULATION OF
SLUDGE IN UASB REACTOR. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC. PROF.
CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 206 pp.

The objective of this research is to study the effect of pulp powder on sludge granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor, treating ethanol stillage. Here, four identical lab-scale UASB reactors were used in this study. The dosage of pulp powder at 800, 600 and 400 mg/g SS were added into reactor No. 1, 2 and 3, respectively. Additionally, only 2 mg/g SS of cationic polymer was also added into each reactor. For reactor No. 4 without pulp powder addition, only 2 mg/g SS of polymer was added. Operating condition was employed with organic loading rate in the range of 2-6 kg/COD/m³-day.

The results showed that the addition of pulp powder of 400 mg/g SS with polymer in the reactor No.3 could build sludge granule to the visible size within 22 days. Increasing organic loading rate from 2 kg/COD/m³-day after the 68 days to 4 kg/COD/m³-day resulted in increasing sludge granule size $\geq 1,000 \mu\text{m}$ from 17.51% to 40.14% of total sludge granule at 131 days. The large size sludge granules were increased 2.29 times.

Therefore, it could be summarized that pulp powder and polymer at optimal dosages can enhance sludge granulation effectively and reduce start-up period to be shorten than conventional method. The recommended optimal dosage of pulp powder is 400 mg/g SS together with polymer dosage at 2 mg/g SS.

Field of Study.....Environmental Science.....Student's Signature : *Kosin Suntronsopa*
Academic Year.....2008.....Advisor's Signature : *Chavalit Ratt*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการวิจัย และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนเป็น กำลังใจและสร้างทัศนคติที่ดีต่อการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ ยังมีส่วนทำให้ข้าพเจ้ามีความ มุ่งมั่นในการทำวิจัยนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ดร.สมชาย ดารารัตน์ และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการร่วมเป็น คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาอนุญาตสนับสนุนการ ทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษา และเรียนรู้สิ่งต่างๆ มากมายในระดับมหาบัณฑิต นอกจากนี้ยังเชื้อเพื่อสถานที่ เครื่องมือและ อุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เรื่อยมาจนทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึง ณ. ที่นี้ ที่มี ส่วนเกี่ยวข้องและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อสุนทร คุณแม่วาสนา สุนทรโสภา และญาติ พี่น้อง ทุกคน ที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมทางการศึกษา ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล.....	4
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	5
2.2.1 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	5
2.2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	6
2.2.3 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน... ..	9
2.3 ระบบยูเอเอสบี.....	11
2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี	11
2.3.2 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี	12
2.3.3 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี	14
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี	15
2.3.5 ข้อกำหนดและวิธีการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบี	21
2.4 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์	23
2.4.1 ประเภทเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	23
2.4.2 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	24
2.4.3 Extracellular Polymers	25
2.4.4 กระบวนการรวมเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	25

2.4.5 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	27
2.5 กระบวนการตกตะกอนหรือโคแอกกูเลชัน.....	27
2.5.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์	28
2.5.2 การสร้างสัมผักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์.....	34
2.6 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	35
2.6.1 กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนท์.....	36
2.6.2 กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือไอออนโคแอกกูแลนท์.....	37
2.6.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์	39
2.6.4 โพลีเมอร์.....	39
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน.....	41
2.8 Pulp Powder และโพลีเมอร์ (Polymer) ที่ใช้ในงานทดลองนี้.....	42
2.8.1 Pulp Powder.....	42
2.8.2 Polymer.....	42
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
2.9.1 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียกากส่าโดยระบบยูเอเอสบี.....	43
2.9.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี.....	45
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	49
3.1.1 การศึกษาความเข้มข้น pulp powder เบื้องต้นโดยวิธี Jar Test.....	49
3.1.2 ปริมาณสารช่วยตกตะกอน(coagulant aid) polymer ที่ใช้ในการทดลองนี้	49
3.1.3 การศึกษาผลของการเติม pulp powder ปริมาณความเข้มข้นต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี.....	51
3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.2.1 ส่วนประกอบของน้ำเสีย.....	51
3.2.2 วิธีการเตรียมน้ำเสีย.....	52
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.3.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	52
3.3.2 ถังพักน้ำเสีย.....	52

3.3.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์.....	52
3.3.4 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซ.....	54
3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน.....	54
3.5 การเดินและการควบคุมระบบ.....	55
3.5.1 การเดินระบบ.....	55
3.5.2 การควบคุมระบบ.....	56
3.6 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	58
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของ pulp powder.....	58
4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ pulp powder.....	58
4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของ pulp powder.....	61
4.1.3 ประมวลผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของ pulp powder.....	62
4.2 การศึกษาศึกษาความเข้มข้นของ pulp powder ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test.....	63
4.2.1 การทำ Jar Test หาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของ pulp powder.....	63
4.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของสารช่วยตกตะกอน (coagulant aid) polymer.....	66
4.3 สภาวะการเดินระบบ.....	68
4.4 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	70
4.4.1 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	70
4.4.2 การกระจายตัวของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตามระดับความสูง ของถังปฏิกรณ์.....	83
4.4.3 ความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	85
4.4.4 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลอง.....	86
4.4.5 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	88
4.4.6 เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน.....	95
4.4.7 ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	95
4.4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	96
4.5 สภาพแวดล้อมของการเดินระบบและประสิทธิภาพของระบบ.....	98
4.5.1 พีไอซี.....	98
4.5.2 อุณหภูมิ.....	100

4.5.3	สภาพต่างทั้งหมด.....	102
4.5.4	กรดไขมันระเหย.....	105
4.5.5	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด.....	107
4.5.6	ซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัด.....	110
4.5.7	ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัด.....	116
4.6	กลไกและแบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในงานทดลองนี้.....	123
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	126
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	126
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	127
	รายการอ้างอิง.....	129
	ภาคผนวก.....	134
	ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	135
	ภาคผนวก ข การแปรผลข้อมูลจากการทดลอง.....	161
	ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์เม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	169
	ภาคผนวก ง การหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	172
	ภาคผนวก จ การกระจายขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Sieve Analysis.....	177
	ภาคผนวก ฉ การหาค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	179
	ภาคผนวก ช การหาการกระจายขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer.....	180
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	206

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก.....	18
ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนในการยับยั้ง ประสิทธิภาพ 50%.....	19
ตารางที่ 2.3 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.....	20
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์น้ำเสียของโรงงานไทยผลิตเอทานอลเบื้องต้น.....	51
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์.....	57
ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุและออกไซด์ใน pulp powder.....	61
ตารางที่ 4.2 ผลการทำ Jar Test ของ pulp powder.....	63
ตารางที่ 4.3 ปริมาณการเติม pulp powder และ polymer ในแต่ละถังปฏิกรณ์.....	68
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ควบคุมระบบและระยะเวลาทดลอง.....	69
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์กำขี้มีเทนตลอดการทดลอง.....	95
ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	135
ตารางที่ ก. 2 อุณหภูมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	139
ตารางที่ ก.3 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	143
ตารางที่ ก.4 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	145
ตารางที่ ก.5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	147
ตารางที่ ก.6 ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	148
ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	151
ตารางที่ ก.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	153
ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลอง ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	156
ตารางที่ ก.10 ปริมาณก๊าซตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4.....	158
ตารางที่ ข.1 การแปรผลข้อมูลค่าพีเอชตลอดการทดลอง.....	161
ตารางที่ ข.2 การแปรผลข้อมูลค่าอุณหภูมิตลอดการทดลอง.....	162
ตารางที่ ข.3 การแปรผลข้อมูลค่าสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลอง.....	163
ตารางที่ ข.4 การแปรผลข้อมูลค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง.....	164
ตารางที่ ข.5 การแปรผลข้อมูลค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด ตลอดการทดลอง.....	165
ตารางที่ ข.6 การแปรผลข้อมูลค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลอง.....	166

ตารางที่ ข.7 การแปรผลข้อมูลค่าแวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแวนลอย ตลอดการทดลอง.....	167
ตารางที่ ข.8 การแปรผลข้อมูลค่าก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง.....	168
ตารางที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง.....	169
ตารางที่ ค.2 เปอร์เซ็นต์สัดส่วนโดยน้ำหนักเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	170
ตารางที่ ค.3 ตารางเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์การกระจายขนาดตามระดับความสูงของ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังสิ้นสุดการทดลอง.....	170
ตารางที่ ค.4 ค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	171
ตารางที่ ค.5 ค่า SMA ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 เทียบกับตะกอนเริ่มต้น.....	171
ตารางที่ ง.1 ค่า Conversion Factor (CF) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	174
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลดิบของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาต่างๆตลอดการทดลอง ของตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ.....	175

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการผลิตเอทานอล.....	5
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....	6
รูปที่ 2.3	ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี.....	12
รูปที่ 2.4	ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	14
รูปที่ 2.5	โครงสร้างโดยทั่วไปของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	24
รูปที่ 2.6	การเกิดตะกอนเม็ดแบบ inert nuclei model.....	26
รูปที่ 2.7	การเกิดตะกอนเม็ดแบบ multi-valence positive ion-bonding model.....	26
รูปที่ 2.8	การเกิดตะกอนเม็ดแบบ inert nuclei model.....	26
รูปที่ 2.9	การจำแนกขนาดของสารต่างๆในน้ำ.....	28
รูปที่ 2.10	ผลของการเติมอิออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์.....	29
รูปที่ 2.11	แรงแหวนอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ.....	30
รูปที่ 2.12	การเปรียบเทียบปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ.....	32
รูปที่ 2.13	กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์.....	33
รูปที่ 2.14	กลไกการทำงานของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC).....	37
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการหาปริมาณ pulp powder ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test.....	50
รูปที่ 3.2	แบบจำลองถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	53
รูปที่ 3.3	อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	54
รูปที่ 3.4	ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	55
รูปที่ 4.1	ลักษณะ pulp powder ก่อนและหลังละลายน้ำ.....	58
รูปที่ 4.2	กราฟการกระจายขนาดของ pulp powder ที่วิเคราะห์ด้วย เครื่อง particle size analyzer.....	59
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของ pulp powder ก่อนและหลังนำไปละลายน้ำ.....	60
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความชันที่ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างของ pulp powder.....	63
รูปที่ 4.5	ลักษณะตะกอนที่ได้จากการเติม pulp powder ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.6	ตะกอนที่ได้หลังจากเติม polymer ในขั้นตอนการกวนซ้ำ.....	67
รูปที่ 4.7	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการบรรทุกสารอินทรีย์ตลอดช่วงการทดลอง.....	69
รูปที่ 4.8	การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง.....	72

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ ตลอดการทดลอง	76
รูปที่ 4.10 ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร.....	78
รูปที่ 4.11 ขนาดเม็ดตะกอนหลังการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆกัน.....	80
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนที่ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร.....	81
รูปที่ 4.13 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์.....	84
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนแต่ละขนาด.....	86
รูปที่ 4.15 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น.....	87
รูปที่ 4.16 ตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบ.....	90
รูปที่ 4.17 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	91
รูปที่ 4.18 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	92
รูปที่ 4.19 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	93
รูปที่ 4.20 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังปฏิกรณ์ที่ 4 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	94
รูปที่ 4.21 แสดงค่า SMA ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ตลอดการทดลอง.....	96
รูปที่ 4.22 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์.....	97
รูปที่ 4.23 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าและน้ำออกจากระบบของทุกถังปฏิกรณ์.....	99
รูปที่ 4.24 อุณหภูมิตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์.....	102
รูปที่ 4.25 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์.....	104
รูปที่ 4.26 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์.....	107
รูปที่ 4.27 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของทุกถังปฏิกรณ์.....	109
รูปที่ 4.28 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	111
รูปที่ 4.29 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	112
รูปที่ 4.30 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	113
รูปที่ 4.31 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 4.....	114
รูปที่ 4.32 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 1....	117
รูปที่ 4.33 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 2....	118
รูปที่ 4.34 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 3....	119
รูปที่ 4.35 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 4....	120
รูปที่ 4.36 แบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วย pulp powder ร่วมกับ polymer.....	124
รูปที่ 4.37 แบบจำลองเมื่อมีการเติม pulp powder ในปริมาณที่มากเกินไป.....	125

รูปที่ ง.1	อุปกรณ์ที่ใช้หาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	172
รูปที่ ง.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	175
รูปที่ ง.3	ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน.....	176
รูปที่ จ.1	ตะกอนตัวอย่างที่แยกขนาดด้วยวิธี sieve analysis.....	178
รูปที่ ฉ.1	กระบอกตวงที่ขีดสัญลักษณ์ไว้ที่ความสูงระยะต่างๆ.....	179
รูปที่ ช.1	การกระจายขนาดของ pulp powder.....	180
รูปที่ ช.2	การกระจายขนาดของตะกอนเริ่มต้น.....	181
รูปที่ ช.3	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 22 ของการทดลอง.....	182
รูปที่ ช.4	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 22 ของการทดลอง.....	183
รูปที่ ช.5	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 22 ของการทดลอง.....	184
รูปที่ ช.6	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 22 ของการทดลอง.....	185
รูปที่ ช.7	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 69 ของการทดลอง.....	186
รูปที่ ช.8	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ วันที่ 69 ของการทดลอง.....	187
รูปที่ ช.9	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ วันที่ 69 ของการทดลอง.....	188
รูปที่ ช.10	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ วันที่ 69 ของการทดลอง.....	189
รูปที่ ช.11	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ วันที่ 101 ของการทดลอง.....	190
รูปที่ ช.12	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ วันที่ 101 ของการทดลอง.....	191
รูปที่ ช.13	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ วันที่ 101 ของการทดลอง.....	192

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะน้ำมันดิบในตลาดโลกมีราคาสูงขึ้นประกอบกับแหล่งพลังงานปิโตรเลียมในธรรมชาติของประเทศกำลังจะหมดลง ซึ่งสวนทางกับปริมาณความต้องการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้น ภาครัฐจึงสนับสนุนให้มีการผลิตเอทานอลจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม แต่ในขั้นตอนการผลิตเอทานอลพบว่า ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง พีเอชต่ำ มีสีน้ำตาลเข้ม ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน โฟสเฟตซีม และซัลเฟตสูง โดยมีค่า บีโอดี 16.7-39.0 g/l ซีโอดี 30.4-84.9 g/l ไนโตรเจน 628-2787 mg/l ฟอสฟอรัส 28-187 mg/l โฟสเฟตซีม 39-5124 mg/l ซัลเฟต 651-3478 mg/l พีเอช 4.04-5.35 (Wilkie และคณะ, 2000) ฉะนั้นระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตเอทานอลควรมีประสิทธิภาพสูง เพื่อสามารถลดปริมาณมลสารในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงจากกระบวนการผลิตเอทานอลได้

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน ได้รับความสนใจมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้พลังงานและเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบน้อย สร้างสลัดจ์ที่ต้องบำบัดน้อย อีกทั้งกระบวนการบำบัดยังได้ก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนที่ได้รับการพัฒนาและมีประสิทธิภาพระบบหนึ่งคือ ระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี มีข้อดีคือ เป็นระบบที่สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มาก ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียน้อย ไม่ต้องการวัสดุตัวกลางสำหรับเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรีย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลง แต่อาศัยการเลี้ยงให้แบคทีเรียเกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดที่มีความหนาแน่นสูง มีการจมตัวได้ดี จึงสามารถกักเก็บแบคทีเรียจำนวนมากไว้ในระบบได้ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูง แต่ข้อจำกัดของระบบนี้คือ การเริ่มต้นระบบเพื่อเลี้ยงแบคทีเรียให้มีลักษณะเป็นเม็ดยูเอเอสบีใช้เวลานาน โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งจึงมีการสั่งซื้อเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากแหล่งอื่นมาใช้เพื่อความสะดวกในการเริ่มต้นระบบ ทั้งจากในประเทศและต่างประเทศ แต่เนื่องจากน้ำเสียของแต่ละโรงงานมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน อาจทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากแหล่งอื่นนั้น ไม่คุ้นเคยกับสภาพน้ำเสีย แบคทีเรียในตะกอนเม็ดไม่สามารถปรับตัวได้เกิดการชะงักการเจริญเติบโต ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียต่ำ ส่งผลให้การเดิน

ระบบล้มเหลวในที่สุด ดังนั้นการสร้างตะกอนเม็ดให้มีความคุ้นเคยกับมลสารในน้ำเสียตั้งแต่เริ่มต้นระบบ และการศึกษาวิธีการลดระยะเวลาในการสร้างตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ลง น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อตะกอนเม็ดจุลินทรีย์จากแหล่งอื่นได้อีกด้วย

flocculant เป็นสารที่ใช้ในการจับกับตะกอนแขวนลอยในน้ำให้เป็นกลุ่มใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อก (floc) ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอย flocculant จึงสามารถประยุกต์ใช้ในการจับกับอนุภาคแบคทีเรียที่แขวนลอยในน้ำให้จับตัวเป็นก้อนและตกตะกอนได้ดี จึงสามารถรักษาปริมาณจุลินทรีย์ไม่ให้หลุดลอยออกจากถังปฏิกรณ์มากเกินไปในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ช้า งานวิจัยนี้จึงศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล ด้วยการใช้ pulp powder ซึ่งเป็น flocculant ซึ่งผลิตมาจากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานเยื่อกระดาษ ลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น ร่วมกับการเติม coagulant aid ชนิดที่ใช้ คือ โพลีเมอร์ประจุบวก ชื่อ Praestol 852 BC ของบริษัท Dyna Fluid เพื่อช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ flocculant ในการเร่งให้เกิดกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี ที่สร้างขึ้นโดยใช้ pulp powder ร่วมกับโพลีเมอร์ประจุบวกเติมในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล
2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้น และการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์

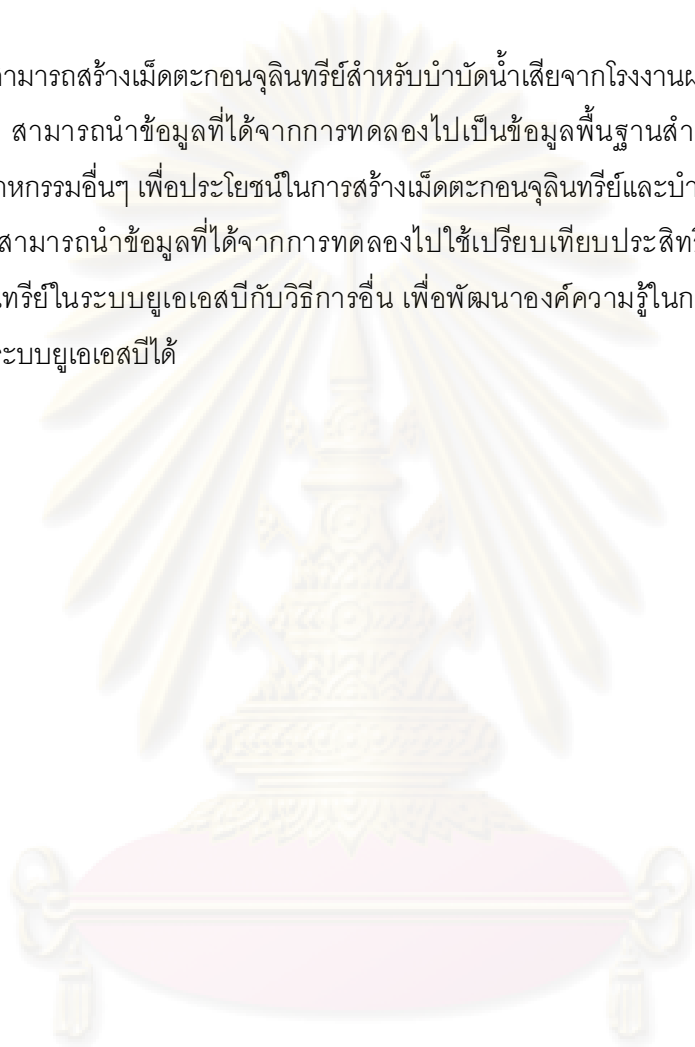
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังปฏิกรณ์จำลองยูเอเอสบีลักษณะเหมือนกันจำนวน 4 ชุด
2. ทำ Jar Test เพื่อหาปริมาณการเติม pulp powder และโพลีเมอร์ประจุบวก ลงในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีทั้ง 4 ถัง
3. เดินระบบโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล ทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

4. ศึกษาการพัฒนาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และคุณลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอลได้
2. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ เพื่อประโยชน์ในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และบำบัดน้ำเสียได้
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีกับวิธีการอื่น เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล (Ethanol Production)

กระบวนการผลิตเอทานอล ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้ คือ

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล (Raw Materials Preparation)

ขั้นที่ 2 ขั้นตอนการหมัก (Fermentation)

ขั้นที่ 3 ขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน (Distillation)

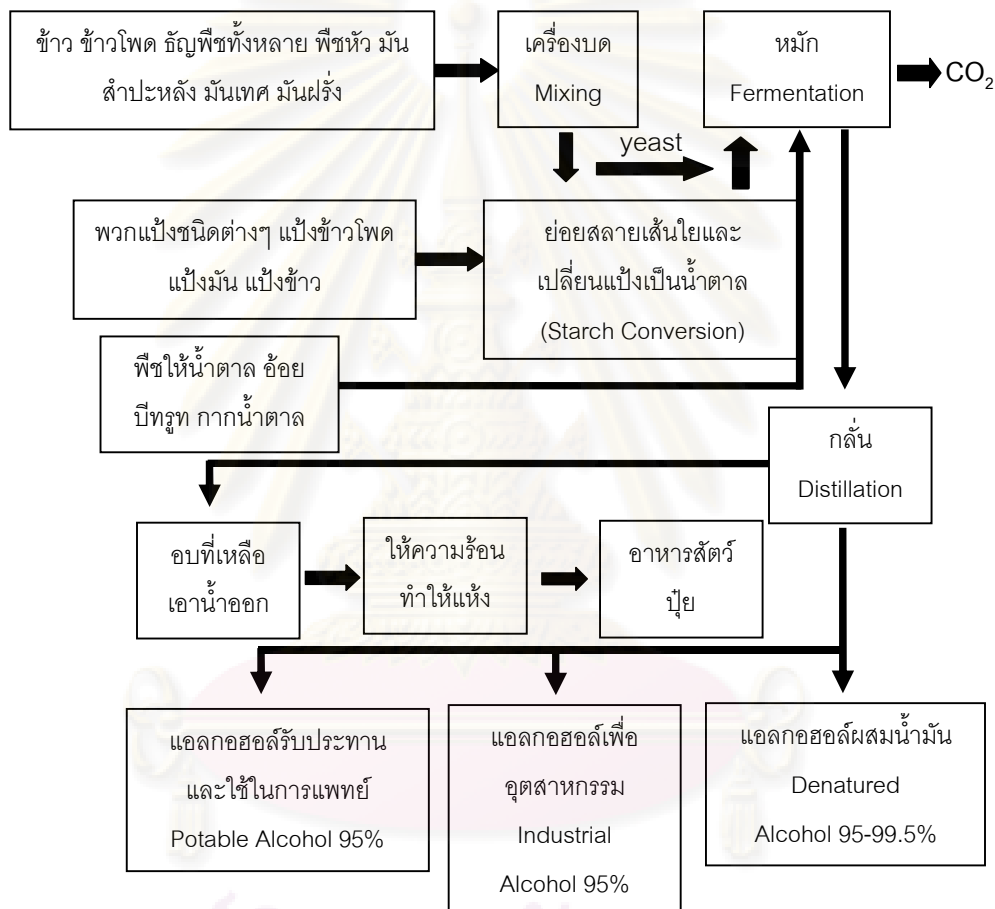
ขั้นที่ 4 ขั้นตอนการกำจัดน้ำ (Dehydration)

ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้น ถ้าเป็นวัตถุดิบประเภทน้ำตาล คือ กากน้ำตาล เมื่อผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกและปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมแล้วสามารถนำไปหมักได้เลย ส่วนวัตถุดิบพวกธัญพืชต่างๆจะถูกทำให้ละเอียด และจะต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยแป้ง (Starch Hydrolysis) ด้วยเอนไซม์ให้เป็นน้ำตาลก่อนแล้วจึงนำไปหมัก ซึ่งการย่อยแป้งจะเริ่มจากกระบวนการย่อยแป้งครั้งแรกด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (Liquefaction) จากนั้นจะทำการเติมเอนไซม์กลูโคอะมิเลสพร้อมกับยีสต์ ทำให้การย่อยแป้งครั้งที่สอง (Saccharification) ด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นพร้อมกับการหมักด้วยเชื้อยีสต์ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและประหยัดพลังงานกระบวนการผลิต

ในกระบวนการหมัก จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เชื้อยีสต์ ทั้งนี้การเลือกใช้ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่นำมาหมัก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก คือ เอธิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล ที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 - 12 โดยปริมาตร

น้ำหมักที่ได้จากกระบวนการหมัก จะนำมาแยกเอทานอลออกโดยใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 โดยปริมาตร โดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแก่น้ำหมัก เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำจะระเหยกลายเป็นไอได้มากกว่า เมื่อไอควบแน่นเป็นของเหลวก็จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้น จากนั้นจึงเข้าสู่กรรมวิธีในการกำจัดน้ำ โดยการใช้อนุภาคซีฟ (molecular sieve separation) เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 จะผ่านเข้าไปในหลอดดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับประเภทซีโอไลต์

โมเลกุลของเอทานอลจะไหลผ่านช่องว่างของซีโอไลต์ออกไปได้ แต่โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับไว้ ทำให้เอทานอลที่ไหลออกไปมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ส่วนซีโอไลต์ที่ดูดซับน้ำไว้จะถูก รีเจนเนอเรต (Regenerated) โดยการไล่น้ำออก เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินได้โดยตรง เพื่อใช้ในรถยนต์เครื่องยนต์เบนซินได้ แสดงขั้นตอนการผลิตเอทานอลดังรูปที่ 2.1



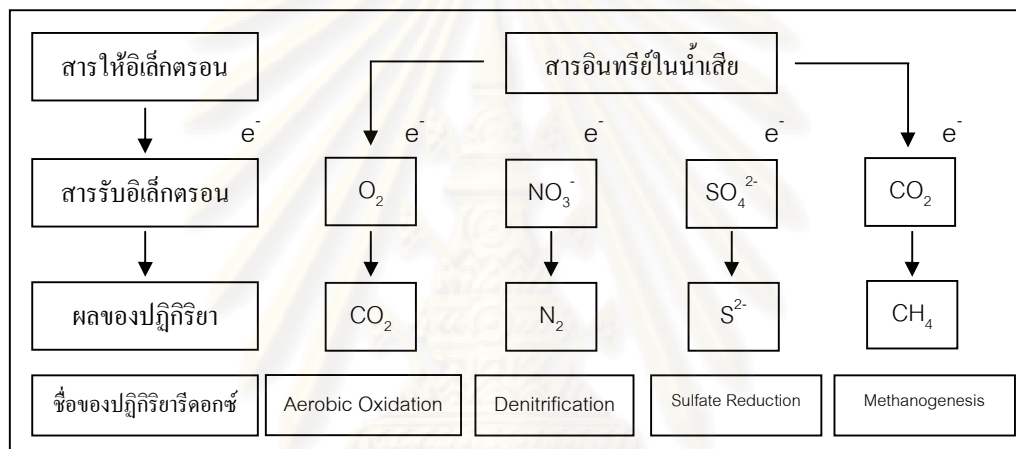
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตเอทานอล

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2.1 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โดยทั่วไปปฏิบัติการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทั้งกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน มีพื้นฐานอย่างเดียวกัน คือ เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสาร

ให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียจะเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานให้กับจุลินทรีย์ ส่วนสารอื่นในน้ำเสียจะเป็นสารรับอิเล็กตรอน ปฏิกริยาแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารรับอิเล็กตรอน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ปฏิกริยาที่เป็นแบบใช้ออกซิเจน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช้ออกซิเจนแต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรท หรือซัลเฟต ปฏิกริยาจะเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน การที่สารรับอิเล็กตรอนมีหลายชนิดปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจึงมีความแตกต่างกันการเรียกชื่อปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจึงต่างกันไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

2.2.2 ขั้นตอนของปฏิกริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการไร้อากาศเป็นระบบที่ซับซ้อน มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ร่วมกันหลายกลุ่ม ความสัมพันธ์ของจุลินทรีย์มีทั้งแบบแข่งขันกันและพึ่งพาอาศัยกัน สารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนรูปเนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หลายกลุ่มต่อกัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่ง เป็นการพึ่งพาอาศัยกัน แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่สามารถใช้ได้เหมือนกัน ก็จะมีความสัมพันธ์แบบแข่งขันกัน จุลชีพที่อาศัยอยู่ร่วมกันทำให้เกิดปฏิกริยารีดอกซ์ และเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปต่างๆ เช่น มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แต่สารอินทรีย์ในระบบจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มใดขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมของระบบ รูปที่ 2.2 แสดงลำดับขั้นตอนของปฏิกริยาเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยกระบวนการแบบไร้ออกซิเจนจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้เป็นการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดภายนอกเซลล์จุลินทรีย์จำพวก สร้ำกรด โดยอาศัยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ชนิดดังกล่าวปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลาย

การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะเกิดค่อนข้างช้า เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ประการ เช่น ค่าพีเอช ระยะเวลาที่เซลล์ และอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของ สารอินทรีย์ โดยถ้าสารอินทรีย์นั้นมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรต่ำ จะต้องใช้เวลาในการ ย่อยสลายนานกว่าจะได้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ดังนั้นจึงพบว่ากระบวนการย่อยสลายแป้ง โปรตีนและเซลลูโลสจะต้องใช้ระยะเวลาแตกต่างกันไป อันเนื่องมาจากเหตุผลดังกล่าว

2) กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

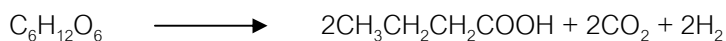
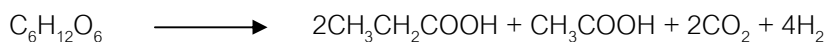
ในขั้นตอนนี้ผลผลิตของขั้นตอนนี้ไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึม เข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นอาหาร และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น อะซิติก (CH_3COOH) โพรไพโอนิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) และบิวทิริก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย

ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารอาหาร และ ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและ ไฮโดรเจนภายใต้ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิกและบิวทิริก ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง

ขณะที่น้ำตาลจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิธี Emden – Meyerhof pathway ที่ภายใต้สภาวะความพาร์เชียล ของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ ดังสมการ

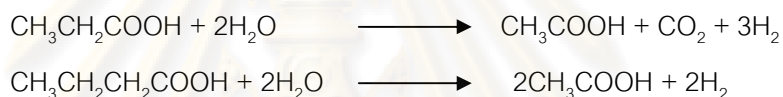


แต่จะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง ดังสมการ



3) กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

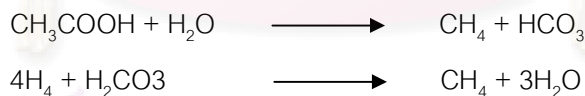
ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะมีบทบาทสำคัญ ในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่อาจใช้เป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้ แบคทีเรียสร้างอะซิติกมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพรไพโอนิก สามารถกระทำได้ที่สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ ตามลำดับ สมดุลเคมีแสดงดังสมการ



ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยจะไม่สามารถถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูงได้

4) กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานในการสร้างก๊าซมีเทนออกมาภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน ดังสมการด้านล่าง



ซึ่งสารอื่นนอกเหนือจากกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สารตั้งต้น (Substrate) อย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการสร้างก๊าซมีเทน เช่น เมทานอล และกรดฟอร์มิก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

1) แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (*Acidogenic Bacteria*)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (*Obligata Anaerobes*) มากกว่าชนิด *Facaltative* ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเด็ดขาดมีจำนวนมากว่า แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือ กลุ่ม *Clostridium* ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลากหลายชนิดเช่น กรดบิวทริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม *Propionibacterium* ที่ผลิตกรดพรอปิโอนิก (*Propionic Acid*) และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก (*Fenchel* และ *Finlay* 1995; *Madigan* และคณะ 1997)

2) แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (*Acetogenic Bacteria*)

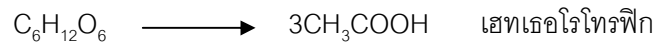
เมื่อผลผลิตแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ได้ ในเซลล์ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

ก. แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเดียว (*Homoacetogenic Bacteria*)

แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า *Acetyl-CoA* ตัวอย่างแบคทีเรียชนิดนี้ได้แก่ *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium acetivum* สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในแบบออโตโทรฟิก (*Autotrophic*) คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอนและใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก



อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบเฮเทอโรโทรฟิก (*Heterotrophic*) ก็ได้ โดยการหมักน้ำตาลดังสมการข้างล่าง



แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัส *Clostridium* พบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

ข. แบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H₂-Producing Acetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือ แอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้น จะต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทตรงนี้เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้

การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า Syntrophy และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

แบคทีเรียชนิดนี้อยู่ในกลุ่ม *Syntrophomonas* และกลุ่ม *Syntrophobacter* แบคทีเรีย *Syntrophomonas wolfei* ย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรีย *Syntrophobacter wolinii* จะย่อยกรดพวอฟิออนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

3) แบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนจัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรฟ เป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดดีดขาด ไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย

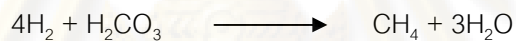
ส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่มีประสิทธิภาพ คือ ไม่มีการสร้างก๊าซมีเทนแทนกรดไขมันระเหย แบคทีเรียกลุ่มนี้พบได้ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องหรือที่อับอากาศ เช่น ดินเลนจากก้นแม่น้ำ ทะเลสาบ ได้แก่ สกุล Methanobacterium, Methanosarcina และ Methanococcus โดยจะทำหน้าที่ย่อยกรดไขมันระเหยและแอลกอฮอล์จากการย่อยในขั้นตอนแรกเพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แบคทีเรียสร้างมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

ก. Obligate Acetoclastic Methanogen สามารถใช้กรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการด้านล่าง



ข. Obligate Hydrogenotrophic Methanogen (H_2 - utilizer) เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างมีเทนได้ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการด้านล่าง



ค. Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างมีเทนได้จากกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจน แต่จะชอบใช้ไฮโดรเจนมากกว่า

แบคทีเรียพวกสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงที่มีพีเอชแคบประมาณ 6.8 – 7.2 และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งมักจะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ (Specific Growth Rate) ทำให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นได้ช้าและมักเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.3 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

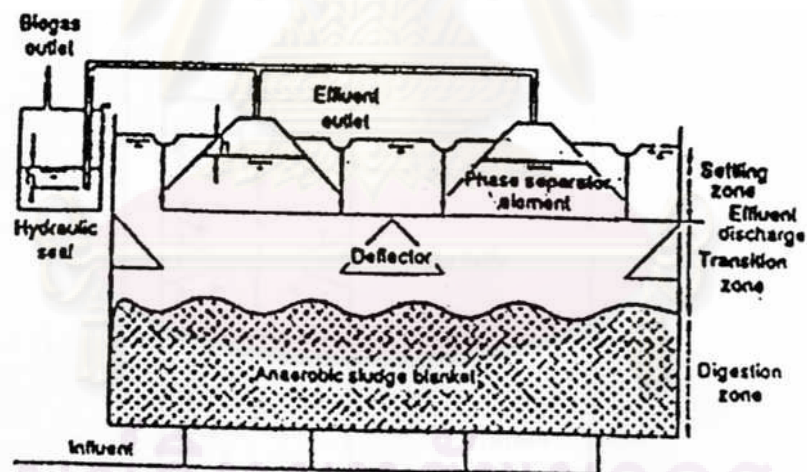
โครงการพัฒนาถึงปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เริ่มต้นในปี 1970 โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ ซึ่งดำเนินการวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ Centrale Suiker Maat-chappij (CSM) และ Delf University of Technology รวมถึงมหาวิทยาลัย Wageningen และ Amsterdam ผลการวิจัยและพัฒนาในช่วงปี 1974 และ 1977 นำมาซึ่งการเริ่มต้นก่อสร้างถึงปฏิบัติการในขั้นโรงงานต้นแบบ และในปี 1978 ถึงปฏิบัติการยูเอเอสบี ก็เริ่มถูกนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยถูกใช้เพื่อบำบัดน้ำเสีย

โรงงานน้ำตาล ซึ่งมีประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 88 ที่อัตราการรับภาระ 16.25 กก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน ปัจจุบันถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก

2.3.2 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบี เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปล่อยน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีและไหลขึ้นสู่ด้านบนของถัง โดยไม่มีตัวกลางใดๆมาช่วยพยุงมวลจุลินทรีย์ ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีจะเป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งลักษณะถังจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) ส่วนที่เป็นถังหมักและระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) อยู่ที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์
- 2) ส่วนที่เป็นถังตกตะกอนอยู่ที่ส่วนบนของถังปฏิกรณ์ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator; GSS) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยแผ่นกั้นเฉียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา นอกจากนี้ ยังช่วยในการป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจายโดยก๊าซชีวภาพหลุดออกไปจากถังปฏิกรณ์

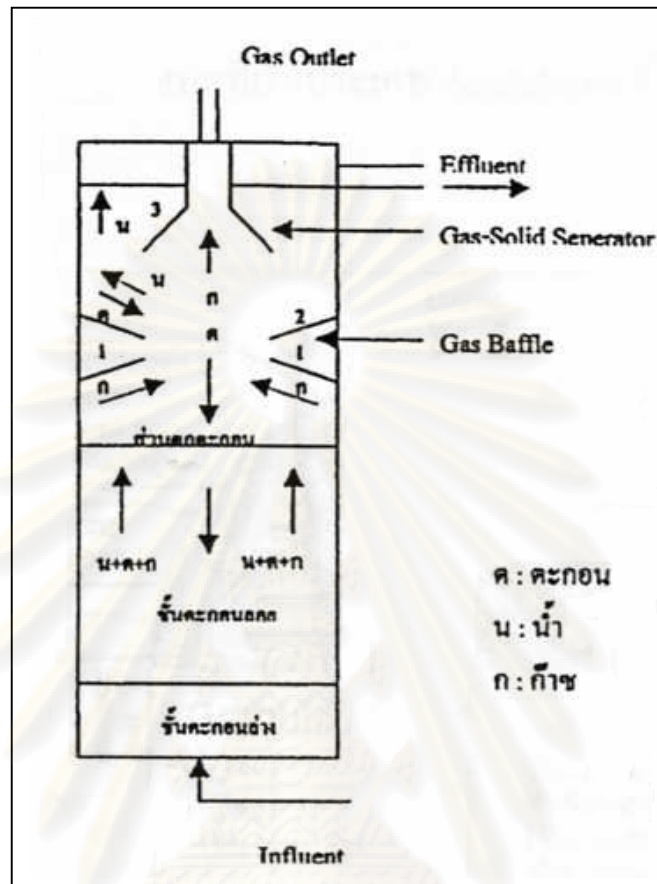


รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี (Van Haandel และ Lettinga, 1994)

น้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยผ่านระบบกระจายน้ำเสียเพื่อกระจายน้ำเสียเข้าหลายๆ จุดตามพื้นที่หน้าตัดของบ่อ เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์จะเกิดการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์และก๊าซชีวภาพ โดยก๊าซเหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับ

เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ ประกอบกับความเร็วของน้ำเสียที่ไหลขึ้นทำให้เกิดการลอยตัวของตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นสู่ด้านบน ซึ่ง Heertjes และ Van der Meer (1983) กล่าวว่า ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีเมื่อลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถังจะช่วยให้เกิดการกวนผสมและเกิดการสัมผัสที่ทั่วถึงระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ เมื่อน้ำเสียไหลขึ้นสู่ส่วนบนของถังจะปะทะกับแผ่นกั้นของอุปกรณ์แยกสามสถานะ ทำให้เกิดการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพออกจากกัน ก๊าซที่เกาะมากับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออก โดยจะลอยตัวขึ้นไปยังส่วนบนบนผ่านท่อเก็บก๊าซเพื่อลำเลียงก๊าซที่ได้ไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากอุปกรณ์จุลินทรีย์และไหลล้นออกไปนอกถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักไว้และตกลงไปยังส่วนล่างของถัง โดยเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ที่รวมตัวกันเป็นเม็ดที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ดี จะตกลงมาบริเวณส่วนล่างสุดของถังปฏิกรณ์ ซึ่งบริเวณส่วนล่างนี้เรียกว่า ชั้นตะกอนล่าง (Sludge Bed) ในขณะที่บริเวณเหนือชั้นตะกอนล่าง (Sludge Bed) ขึ้นไป จะเป็นชั้นตะกอนแขวนลอยที่มีขนาดเล็กรองลงมาเรียกว่า ชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket) เป็นชั้นที่ตะกอนมีความสามารถในการตกตะกอนได้น้อยกว่าชั้นตะกอนล่าง (Sludge Bed) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการที่ระบบล้มเหลวเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดีและมากพอ ทำให้จุลินทรีย์หลุดออกไปพร้อมกับน้ำทิ้ง ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบีแสดงดังรูปที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี (สุเมธ ชวเดช, 2540)

2.3.3 ข้อดีข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบีมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้
ข้อดี มีดังนี้

- 1) ต้องการพลังงานในการเดินระบบต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศและไม่ใช้เครื่องจักรกล
- 2) ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้
- 3) มีความเหมาะสมในการใช้ระบบบำบัดนี้ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่และในพื้นที่เขตชุมชนนอกเมือง
- 4) ใช้สารอาหารน้อยและต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน

5) ปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดจากระบบน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและตะกอนที่ได้มีความคงตัวสูง ลดภาระในการกำจัดตะกอนต่อไป

6) ได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (ก๊าซมีเทน) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้

7) สามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบอื่น

8) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่มีปัญหาและการเริ่มต้นระบบใหม่สามารถกระทำได้ง่าย ระบบฟื้นตัวได้เร็วจึงเหมาะกับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู

ข้อเสีย มีดังนี้

1) ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ (Start up) นานมากเนื่องจากต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวกันเป็นเม็ด ระบบจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี

2) ต้องควบคุมปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบและควบคุมอัตราการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ (Wash out) ให้เกิดน้อยที่สุด

3) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

4) จุลินทรีย์ในระบบมีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงพีเอชที่ค่อนข้างแคบ ประมาณ 6.5-7.2

5) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ผลผลิตต่างๆที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

6) ระบบต้องการการดูแลและควบคุมอย่างใกล้ชิด การเดินระบบต้องอาศัยผู้ควบคุมที่มีความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการควบคุมสภาพการทำงานที่สมดุลระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนทำได้ยาก

7) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่สามารถเป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้ เนื่องจากยังคงมีสารตัวกลาง (intermediate) ต่างๆ เหลืออยู่ทำให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดีสูง ประสิทธิภาพในการลด BOD ต่ำ

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

1) ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมจุลินทรีย์

ก. อุณหภูมิ

ระบบยูเอเอสบีสามารถแบ่งการทำงานในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 3 ช่วง คือ

- ช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส
- ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส
- ช่วงการทำงานของไซโคฟิลิก (psychrophilic) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิกจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิก แต่นิยมให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากพบว่าพวกเทอร์โมฟิลิกจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ส่วนช่วงไซโคฟิลิกก้ำขมิเทนเกิดขึ้นน้อยมากและในส่วนของกรย่อยสลาย (Hydrolysis) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าให้ระบบมีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด

ข. พีเอช, สภาพความเป็นด่าง, กรดอินทรีย์ระเหย

ค่าของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดอินทรีย์ระเหย มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 6.5-7.5 ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบคทีเรียสร้างกรดมักสามารถปรับตัวในช่วงพีเอชกว้างกว่าคือประมาณ 5-8.5 ดังนั้น ค่าของพีเอชจึงมีความสำคัญต่อแบคทีเรียผลิตมีเทนมากกว่า กรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตโดยพวกแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acidogenesis) ปกติควรมีค่าอยู่ในระบบประมาณ 200-400 มิลลิกรัม/ลิตร สภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวแสดงให้ทราบถึงกำลังของบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ของระบบ ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำไม่เพียงพอ ปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสภาพดังกล่าวของระบบจะไม่เกิดขึ้น ถ้ามีกำลังบัฟเฟอร์มากพอ โดยทั่วไปในการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีค่าสภาพความเป็นด่าง ประมาณ 2,000-5,000 มิลลิกรัม/ลิตร และอัตราส่วนของความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม/ลิตร ของกรดอะซิติก) ต่อสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (มิลลิกรัม/ลิตร ของแคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งเป็นการแสดงค่าของบัฟเฟอร์ทางหนึ่ง โดยถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ อาจทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลงได้

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

ค. สารอาหารเสริม (Nutrient)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนมีข้อดีอย่างหนึ่งคือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมาน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำกว่า McCarty (1964) กล่าวว่า จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย อย่างน้อยควรมีอัตราส่วน $\text{BOD:N:P} = 100:1:1:0.2$ ในปัจจุบันพบว่าแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการธาตุอาหารบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ มิฉะนั้นระบบไม่อาจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดีซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ เช่น เหล็กรวมกับซัลไฟด์เป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยเติม Yeast Extract ให้แก่ระบบได้โดยตรง

ง. ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเป็นผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ให้อิเล็กตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอน) ความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสอง อาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน – รีดักชันโพเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆว่า ORP

จ. สารพิษ (Toxic Substance)

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ เพราะจะไปรบกวนการทำงานของแบคทีเรียในระบบ หรือยับยั้งการเจริญเติบโต โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ ความรุนแรงของพิษย่อมขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆด้วย สารที่เป็นพิษต่อระบบ ได้แก่

- พิษของอิออนบวกและโลหะหนัก

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ โซเดียม (Na) โปตัสเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้โดยปกติในระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะ จะเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมาก

เกินความจำเป็น จะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ปกติอิออนที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก (McCarty, 1964)

ชนิดอิออนบวก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
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

พิษของอิออนสามารถลดความเป็นพิษลงได้ (Antagonism)

เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na⁺ มีความเข้มข้น 3,500 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้ามี Mg²⁺ และ Ca²⁺ ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมอยู่ระหว่าง 50-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ในทางตรงข้ามอิออนบางชนิดจะไปเพิ่มความเป็นพิษให้มากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน (Synergism)

การยับยั้งโดยโลหะหนัก (Heavy Metal) มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน Mosey และ Hughes (1975) ศึกษาพบว่า Cu²⁺ มีผลต่อระบบมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของซัลไฟด์พอเหมาะเพราะว่าซัลไฟด์ สามารถรวมกับโลหะหนักเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ดีโลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับแบคทีเรีย แม้จะมีในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ในการยับยั้ง
ประสิทธิภาพ 50% (Mosey และ Hughes, 1975)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
Fe ⁺	1-10
Zn ²⁺	10 ⁻⁴
Cd ²⁺	10 ⁻⁷
Cu ⁺	10 ⁻¹²
Cu ²⁺	10 ⁻¹⁶

- พิษของกรดอินทรีย์ระเหย

กรดอินทรีย์ระเหยถ้าถูกสร้างขึ้นมากเกินไป เช่น ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์หรืออาหารเข้ามามาก แบคทีเรียที่ผลิตกรดจะผลิตกรดอินทรีย์ระเหยออกมา หากว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดผลิตมีเทนได้

- พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียของระบบไร้ออกซิเจน มาจากการย่อยสลายโปรตีน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และแอมโมเนีย (NH₃) ดังสมการ



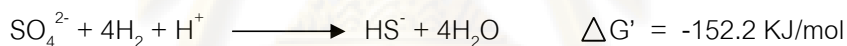
โดยปริมาณของแอมโมเนียมไอออนนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือที่พีเอชประมาณ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1% ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมี ความเข้มข้นของแอมโมเนียไอออน 99% แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะไปทางขวามือมากขึ้น ทำให้เกิดแอมโมเนียมาก ซึ่งแอมโมเนียจะเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียคือมากกว่า 150 มิลลิกรัม/ลิตร ดังนั้นการรักษาพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่า จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า ตารางที่ 2.3 แสดงผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งรวมทั้งแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 2.3 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (Kugelman และ McCarty, 1965)

แอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1000	ยังไม่เกิดผลชัด
1500-3000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูง
>3000	เป็นพิษโดยตรง

- ผลของซัลเฟต

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



โดยแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะแย่งอาหารกันกับพวกผลิตมีเทน (Methanogenic Bacteria) โดยสามารถใช้อะซิเตทและไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร และจากค่า $\Delta G'$ แสดงให้เห็นว่าสามารถชนะแบคทีเรียผลิตมีเทนได้ ทำให้ผลผลิตที่เป็นก๊าซมีเทนลดน้อยลงนอกจากนี้การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ถ้ามีปริมาณมากเกินไป อย่างไรก็ตาม ถ้าจะพิจารณาในแง่การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารของแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะทำงานสัมพันธ์กันกับแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน โดยจะช่วยให้ Hydrogen Partial Pressure มีค่าต่ำเสมอ ทำให้เป็นการลดการสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนทางหนึ่ง ดังนั้นแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟตได้จึงมีบทบาทต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และมีผลกระทบต่อกรดอะซิติกจากกรดไพรูโวนิกด้วย

2) ปัจจัยที่ควบคุมการทำงาน

ก. การเก็บรักษาปริมาณจุลินทรีย์ไว้ให้สูงสุดและจมตัวได้ดี โดยให้ชุดแยกสามสถานะทำงานได้ปกติ นั่นคือต้องทำให้จุลินทรีย์รวมกันเป็นก้อน (Granular) ซึ่ง สุภาภรณ์

สันทนต์เสรื่อนันต์ (2545 อ้างตามใน Wiegant และคณะ 1986) ได้ให้ปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดภาวะรวมกันเป็นก้อนเมื่อดังนี้

- ปริมาณอินทรียวัตถุของ
- HRT หรือ ความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสีย
- ความเข้มข้นของน้ำเสียขาเข้า
- แรงกดดันที่มีต่อกลุ่มสลัดจ์ในถัง
- อัตราการผลิตก๊าซที่กักเก็บ (Sludge Bed)
- การคัดพันธุ์จุลินทรีย์ที่จมตัวได้ดีเอาไว้
- ใช้ตะกอนเริ่มต้นที่ดี เพื่อให้มี Methanogenic Activity สูงเพียงพอ โดยปริมาณอินทรียต่ำ

ข. การกระจายน้ำเสียเข้าอย่างทั่วถึง เพื่อป้องกันการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย ผ่านชั้นฐาน (Bed) ซึ่งถึงทดลอง จุดเข้าจุดหนึ่ง อาจครอบคลุมได้ถึง 5-10 ตารางเมตร ส่วนถึงขนาดใช้จริงต้องเพิ่มจุดเข้าเป็นหนึ่งจุดต่อพื้นที่ 1-2 ตารางเมตร

ค. การควบคุมภาระบรรทุกทุกขาเข้า โดยการควบคุมการสูบเข้าให้ความเร็วไหลขึ้นไม่เกิน 1 เมตร / ชั่วโมง โดยรักษาซีโอดีหรือค่าเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) ให้เกือบคงที่

ง. การรักษาสภาพ Bed – Blanket ไว้ให้ได้ เพื่อมิให้ชุดแยกสามสถานะต้องทำงานเกินกำลัง (Overload) โดยอาจคอยรักษาระดับผิวบนของ Bed จนถึงจุดต่ำสุดของชุดแยกสามสถานะไว้อย่างน้อย 1 เมตร (Buijs และ Heertjes. 1982)

2.3.5 ข้อกำหนดและวิธีการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบี

ข้อกำหนดและมีความสำคัญที่สุดในการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีคือ จำเป็นต้องเพาะเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีลักษณะเป็นเม็ดขึ้นมาให้ได้เสียก่อน (Hulshoff Pol และคณะ, 1983a) โดยข้อกำหนดและวิธีการมีดังนี้

1) ปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์

ปริมาณของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ ต้องมีความเหมาะสมกับขนาดของระบบยูเอเอสบี สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่เป็นพวก thick type (> 40 กก./ลบ.ม.) ค่าที่เหมาะสม คือ 12-15 กก. วีเอสเอส/ลบ.ม. ของถังหมัก สำหรับชุดหมักมีไซฟิติก แต่โดยทั่วไปแล้วตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้จะเท่ากับ 10 – 15 กก. วีเอสเอส/ลบ.ม. ของถังหมัก

2) ค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ขณะเริ่มต้นเดินระบบควรเลือกตะกอนจุลินทรีย์ที่มีค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนต่ำมาใช้ในการเดินระบบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ ค่าความสามารถจำเพาะที่เหมาะสม คือ 0.05-0.1 กก.ซีไอดี/กก.วีเอสเอส/วัน โดยทั่วไปแล้วจะเริ่มต้นที่ 0.05 กก.ซีไอดี/กก.วีเอสเอส/วัน

3) การเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ในการพิจารณาเพิ่มค่าบรรทุกสารอินทรีย์ในแต่ละช่วง ให้ถือหลักเกณฑ์ ดังนี้คือ จะต้องมีการย่อยสลายกรดไขมันระเหยและกำจัดซีไอดีได้ตั้งแต่ 80 % ขึ้นไป ซึ่งจะอยู่ในช่วง steady stage ของแต่ละช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ จึงจะพิจารณาเพิ่มได้

4) การหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์

ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบพบว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักเบาจะหลุดออกมากับน้ำทิ้งจากระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องปกติ เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่ลอยออกมานี้จะหลุดออกไปตลอดเวลา จนเหลือแต่ตะกอนที่มีความเร็วในการจมตัวสูง ซึ่งจะพัฒนาไปเป็นตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเป็นเม็ดต่อไป

5) ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่นำมาบำบัด

เพื่อให้กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปแบบซีไอดีควรมีความเข้มข้นต่ำหรือปานกลาง (Low or Medium Waste Strength) โดยทั่วไปแล้วถ้า น้ำเสียมีความเข้มข้นที่สูง จำเป็นที่จะต้องนำมาเจือจาง (Dilution) ให้มีความเข้มข้นน้อยลงก่อน

6) สภาพแวดล้อมของระบบ

สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อระบบยูเอเอสบีต้องมีความเหมาะสมสำหรับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนดังนี้

- ปริมาณอาหารเสริมที่จำเป็นต้องมีอย่างเพียงพอสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์

- อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดมี 2 ระยะ ได้แก่ ระยะมีโซฟิลิค อุณหภูมิ 20-38 องศาเซลเซียส และระยะเทอร์โมฟิลิค อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Wiegant และ Lettinga, 1985) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและมีช่วงกว้างย่อมมีผลต่อลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

- พีเอชของน้ำเสียต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ 6.5-7.8

(Hulshoff และคณะ, 1983)

- ชนิดของน้ำเสียมีผลต่อระบบบำบัด โดยเฉพาะองค์ประกอบที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไม่ได้ สารประกอบที่เป็นตัวยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น เมื่อมีแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่า 1,000 มก./ลิตร

2.4 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์

2.4.1 ประเภทเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากการที่แบคทีเรียในถังหมักยูเอเอสบีแบ่งเป็น 2 ชั้น คือชั้นบน แบคทีเรียมีลักษณะเป็นตะกอนเบา ส่วนชั้นล่างมีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งเกิดจากแบคทีเรียเกาะติดกันแน่น จึงมีความหนาแน่นของจำนวนเซลล์แบคทีเรียต่อปริมาตรในชั้นล่างนี้ สูงกว่าในชั้นบนซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนเบามาก ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นมีเทนในชั้นของตะกอนเม็ดเป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีจึงขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณสมบัติของแบคทีเรียชนิดเม็ด

ลักษณะของเม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ ส่วนประกอบของน้ำเสีย สิ่งแวดล้อมในระบบ และการเริ่มต้นเดินระบบ โดยเม็ดตะกอนอาจมีหลายชนิดดังนี้

1) Sarcina Granules เป็นตะกอนที่มีรูปร่างกลมเกาะกันเป็นกลุ่ม เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย methanosarcina เกิดขึ้นเมื่อระบบรับปริมาณสารอินทรีย์สูงเกินไป (Over Loading) เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก จึงถูกล้างออกจากระบบได้ง่ายและยังมีความสามารถในการผลิตมีเทนต่ำมาก

2) Rod-type Granules เป็นเม็ดตะกอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นท่อนสั้นๆเป็นส่วนใหญ่ โดยมีขนาดประมาณ 3 มม. และมีของแข็งระเหยสูงถึง 90% ซึ่งตรวจพบในถังยูเอเอสบีที่รับน้ำเสียบางประเภท เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานแป้งมัน เป็นต้น แบคทีเรียพวกนี้จัดเป็นพวก Methanotrix Soehgenii

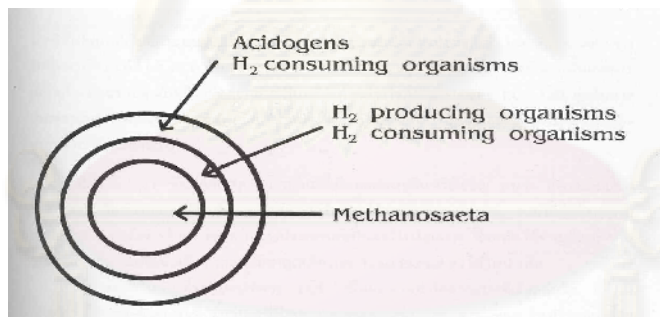
3) Filamentous Granules เป็นเม็ดตะกอนซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีเส้นยาว (Filamentous Bacteria) เป็นส่วนใหญ่ เม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดใหญ่ถึง 5 มม. ภายในมักเป็นพวก Inert Carrier Material จึงมีค่าของแข็งระเหยต่ำกว่าเม็ดตะกอนสองพวกแรก

4) Spinky Granules ในน้ำเสียที่มีสารแคลเซียมสูง เม็ดแบคทีเรียในระบบยูเอเอสบีจะประกอบด้วย CaCO_3 มากกว่าร้อยละ 60 โดยมีลักษณะเป็นหนามแหลม เม็ดแบคทีเรียพวกนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มม. และหนา 0.5 มม. แบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใยยาว เม็ดตะกอนพวกนี้มี Activity ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากประกอบด้วย CaCO_3 ที่จะพอกบนเม็ดผิวแบคทีเรีย

2.4.2 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากที่มีการศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี โดย McLeod และคณะ (1990) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่ามีโครงสร้างภายในเม็ดตะกอนแบ่งออกเป็น 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 ประกอบด้วยแบคทีเรีย ประเภท Acetoclastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (McLeod และคณะ, 1990)

โครงสร้างและขนาดของชั้นในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แต่ละชั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยสลายสารอาหาร และการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตจะพบจุลินทรีย์กลุ่ม Acidogenesis ที่บริเวณผิวนอกสุดของตะกอนจุลินทรีย์ ทั้งนี้เพราะนอกจากการที่สารอาหารมีค่าความเข้มข้นสูงบริเวณรอบนอกเม็ดตะกอนแล้ว ยังมีสาเหตุมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา Acidogenesis ที่บริเวณรอบนอกเม็ดตะกอนมีค่าสูงกว่าปฏิกิริยา Acetogenesis และปฏิกิริยา Methanogenesis ด้วยเช่นกัน อะซิเตทที่ถูกผลิตขึ้นมาจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่อไป

2.4.3 Extracellular Polymers

Extracellular Polymers (ECP) เป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ และเป็นสารพื้นฐานของโครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ECP ที่ห่อหุ้มอยู่รอบเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ มีส่วนประกอบหลักเป็น polysaccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก โดยที่ ECP มีหน้าที่ในการดักจับสารอาหารละลาย และยังเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะกับเซลล์อื่นๆอีกด้วย

จากรายงานการวิจัยพบว่า แบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะถูกล้อมรอบด้วย ECP โดยที่ปริมาณของ ECP อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ระหว่างร้อยละ 0.6-20 ของวิเอสเอส โดยทั่วไปแบคทีเรียที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย มักมีคุณสมบัติเป็นประจุลบและเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างเซลล์ แต่ ECP ที่ห่อหุ้มอยู่รอบผิวเซลล์เป็นประจุบวก ส่งผลให้เซลล์เหล่านั้นเกิดการดึงดูดติดกัน และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ อย่างไรก็ตามปริมาณ ECP ที่มีมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เช่นกัน เนื่องจากจะเกิดการผลักกันของประจุบวกที่มีมากเกินไป

ปริมาณ ECP ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เจริญ พบว่าความเข้มข้นของ ECP ในช่วงอุณหภูมิ Thermophilic มีค่าต่ำกว่าในช่วง Mesophilic รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับสารอาหารในน้ำเสียอีกด้วย โดยพบส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสกัดได้จากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมธาตุเหล็กและ Yeast Extract ลงไปในน้ำเสีย

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่า ECP เป็นผลผลิตที่เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มใด แต่พบผลผลิตที่เป็น polysaccharide จากแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic และ acetogenic ในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่แบคทีเรียกลุ่ม acidogenic เป็นแบคทีเรียที่มีอิทธิพลต่อการสร้าง ECP

2.4.4 กระบวนการรวมเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสพีต้องใช้เวลาานาน ดังนั้น Yu และคณะ (2003) ได้รวบรวมกลไกและแบบจำลองในการเกิดเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสพี ดังรูปที่ 2.6 ถึง 2.8 เพื่อให้เกิดความเข้าใจและมีการพัฒนา เพื่อให้การเริ่มต้นเดินระบบใช้ระยะเวลาอันน้อยลง ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนย้ายทางฟิสิกส์ ทำให้การชนกันสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียหรือการดึงดูดของแบคทีเรียบนผิวนิวคลีไอ (nuclei) แรงที่เกี่ยวกับขั้นตอนนี้ได้แก่แรงดันของน้ำ (Hydrodynamic force), แรงจากการแพร่ (Diffusion force) และแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) เป็นต้น

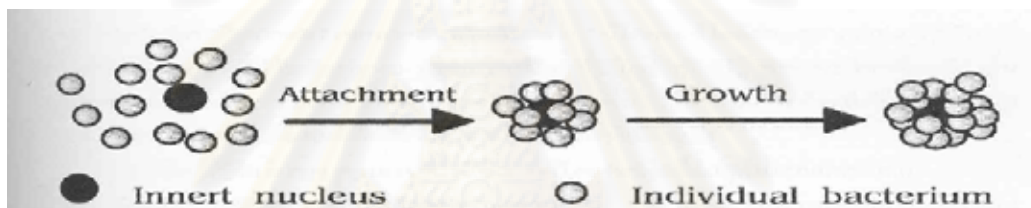
ขั้นตอนที่ 2 แรงดึงดูดที่ทำให้รักษาเสถียรภาพและเซลล์สัมผัสกัน แรงดึงดูดเหล่านี้ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกัน, แรงตึงผิว, Hydrophobicity และ Van der Waals forces เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 Microbial force ในการทำให้การรวมตัวใหญ่ขึ้นเต็มที่ ได้แก่

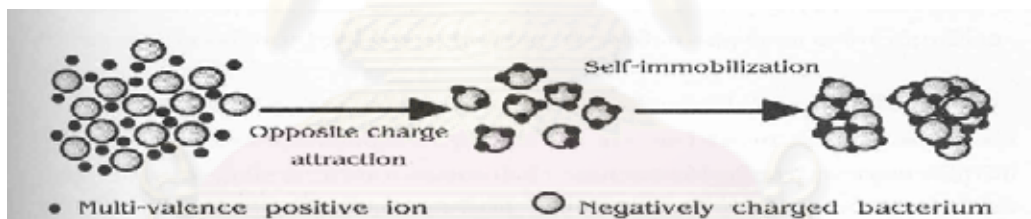
- ผลผลิตของ extracellular polymer โดยแบคทีเรีย เช่น exopolysaccharides

- การเติบโตจากการรวมตัวของเซลล์

- การเปลี่ยนแปลง metabolic และความสามารถทางพันธุกรรม ที่ลดลงโดยสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เซลล์มีปฏิสัมพันธ์กันสะดวกขึ้น และเป็นผลให้โครงสร้าง microbial เรียงตัวกันสูง

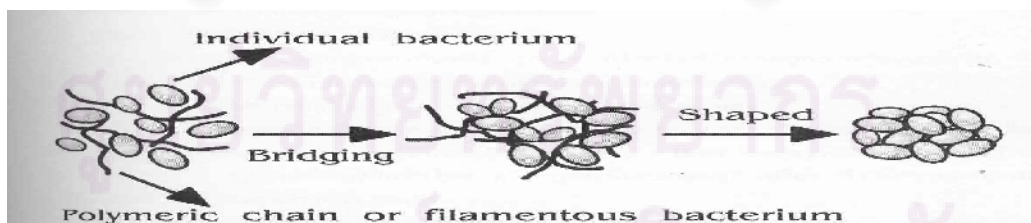


รูปที่ 2.6 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ inert nuclei model (Yu และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.7 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ multi-valence positive ion-bonding model

(Yu และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.8 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ polymer or filamentous bonding model

(Yu และคณะ, 2003)

2.4.5 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol และคณะ (1983a) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยได้สรุปขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1) อัตราบำบัดภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของระบบ เมื่อทำการบ่อน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นแล้ว ชั้นตะกอนด้านล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสียและก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบรวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

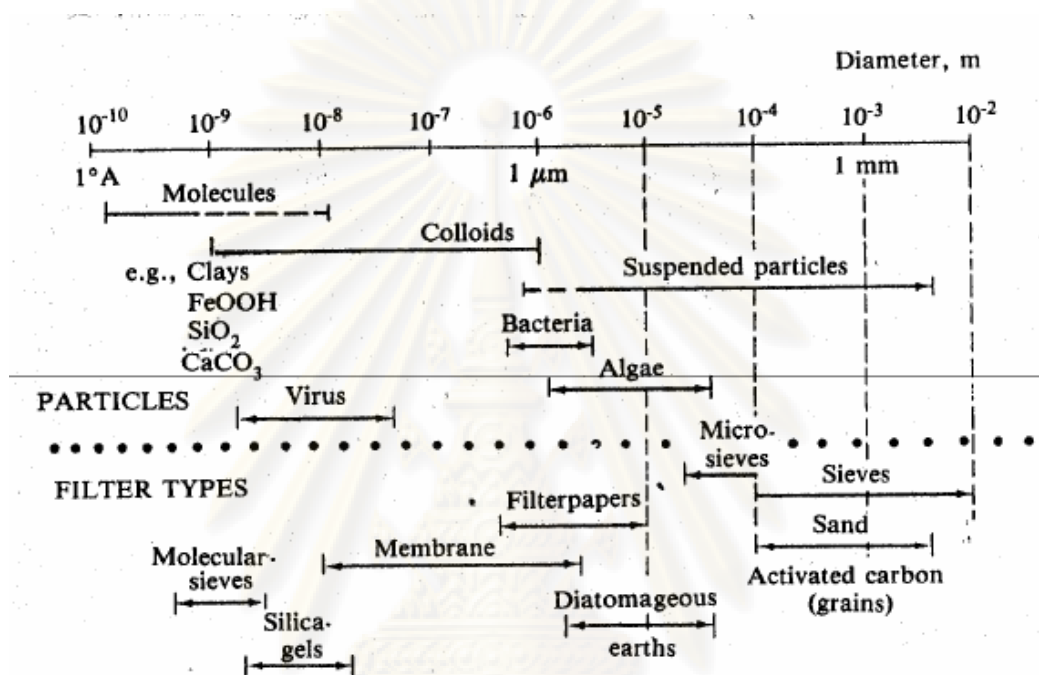
2) อัตราบำบัดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2-5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ขั้นตอนนี้จะมีการสูญเสียตะกอนแขวนลอย เนื่องจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้เกิดปริมาณก๊าซที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากยังคงอยู่ในระบบ และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่อาจมีขนาดใหญ่ได้ถึง 5 มิลลิเมตร ถือว่าเป็นการคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ของระบบ

3) อัตราบำบัดภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 3-5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ขั้นตอนนี้อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมากกว่าอัตราการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งเมื่อระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้ว ระบบจะรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดของระบบที่สามารถรับได้ จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าระบบอาจมีความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 50 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

2.5 กระบวนการตกตะกอนหรือโคแอกกูเลชัน

อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแบคทีเรียก็จัดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้มีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองได้ ภายในเวลาที่จำกัด จึงต้องทำให้การรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่าฟล็อก (floc) โดยใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพ (destabilization) และสารเคมีที่เติม เรียกว่า สารโคแอกกูแลนต์ (coagulant) เมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและรวมตัวกันเป็น floc ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฟล็อกกูเลชัน (flocculation) floc ที่เกิดขึ้นจะสามารถทำให้ตกตะกอนได้ง่าย การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ รวมตัวกันเป็น floc ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

(destabilization) เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่งเป็นต้น และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่มากกระทบกันหรือสัมผัสกันมากที่สุด (transport of colloidal particles) (อุดมศักดิ์ เจียรวิชัย, 2541)



รูปที่ 2.9 การจำแนกขนาดของสารต่างๆในน้ำ (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2537)

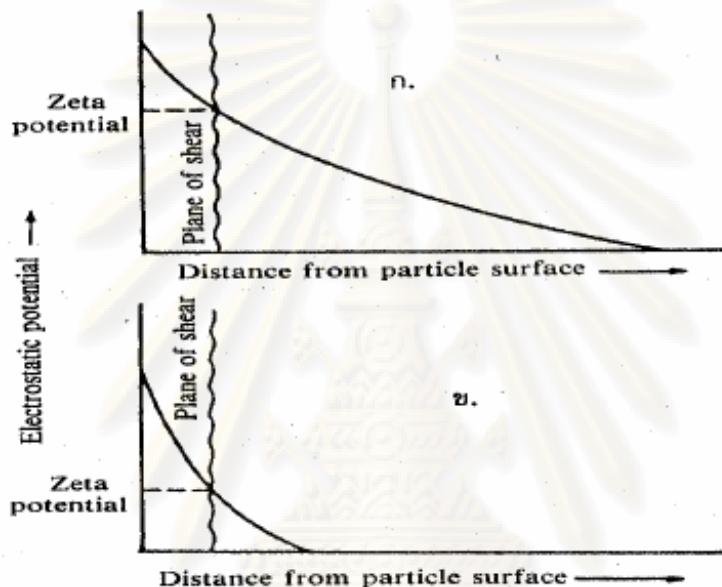
2.5.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (destabilization)

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ส่วนแรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ถ้าแรงดูดสูงกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการกลไก 4 แบบ คือ

1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) (เกียรติพงศ์ เจริญสุข, 2546)

เป็นการเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมีประจุเข้าไป

ออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้อำนาจประจุของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปไกลเท่าเดิม ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์

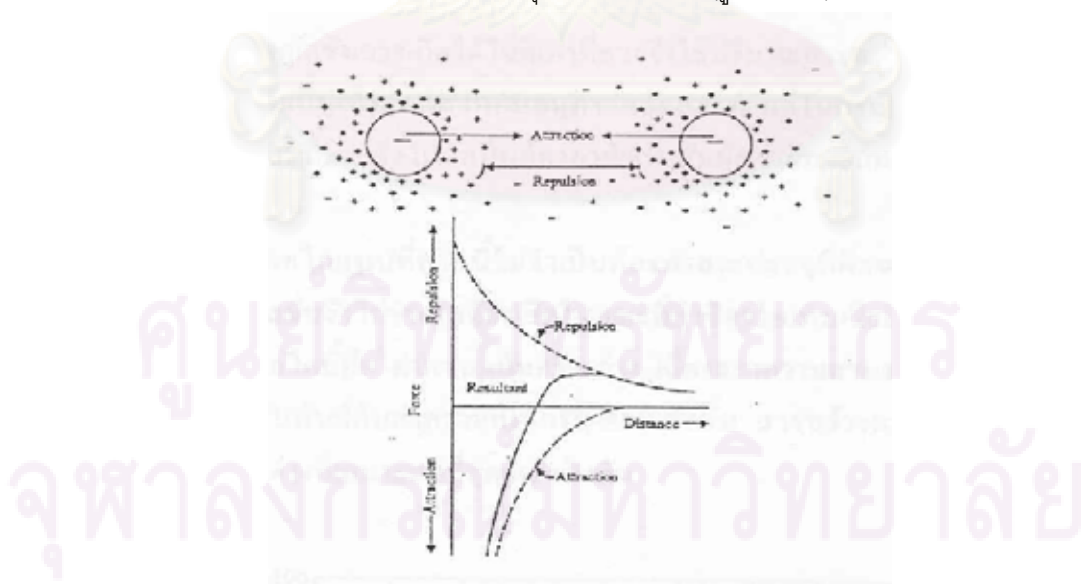
(ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากเติมไอออนแล้ว

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2537

2) การทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption and charge neutralization) (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดติด (adsorb) สารเคมีบางชนิดไว้ที่ผิวได้ ถ้าสารเคมีนั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ 3 ประการ ดังนี้

- กลไกแบบดูดติดผิวต้องการอิออนที่ต่างชนิดน้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากอิออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคของคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าอิออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้
- ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวนั้นเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (stoichiometric) ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้จะมากหรือน้อยตามปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ (ที่ถูกควรเป็นพื้นที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์) แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นไปตามสโตยชิโอเมตริก
- กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิมโดยการใช้สารสร้างตะกอนที่มากเกินไป โดยกลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้าม อาจเป็นเพราะจำนวนอิออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ อิออนต่างประจุ (สารสร้างตะกอน) ส่วนที่เติมที่เกินพอจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่ว่าจะใช้สารสร้างตะกอนมากเท่าใดก็ไม่สามารถเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ ข้อควรสังเกตเกี่ยวกับการเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ของกลไกแบบดูดติดผิว คือ การที่อิออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามย่อมแสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างอิออนต่างกับประจุกับอนุภาคคอลลอยด์จนเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้ (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ

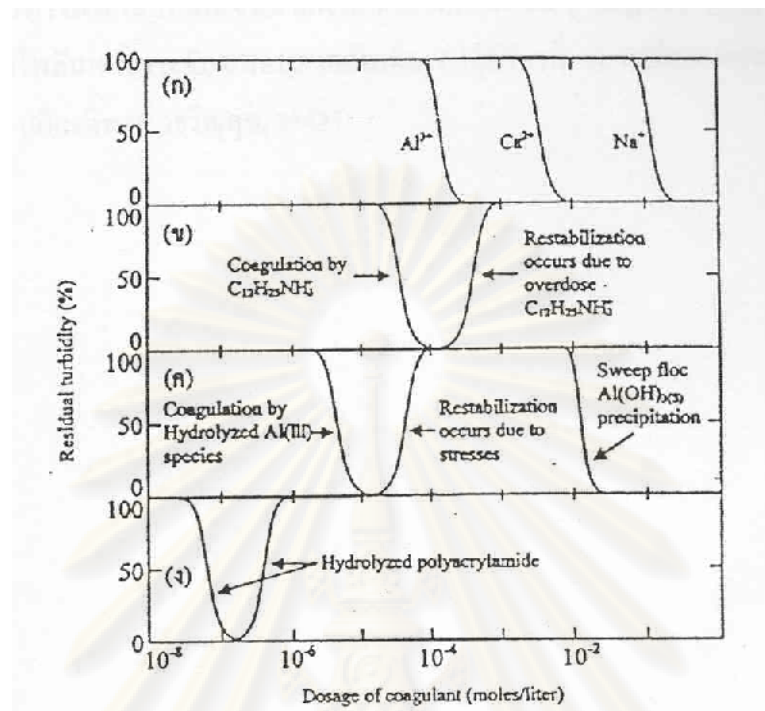
ที่มา : Samuel, D.F. และ Osman, M.A., 1983

3) การใช้ผลลิกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะเกิดการตกผลึกลงมาอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวนี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการตกตะกอนได้ สารสร้างตะกอนดังกล่าว เช่น ปูนขาว สารส้ม เฟริกคลอไรด์ และแมกนีเซียมคาร์บอเนต สามารถทำให้เกิดการโคแอกกูเลชันได้โดยการสร้าง CaCO_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งล้วนแต่เป็นผลลิกสาร (precipitation) ที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้มักเรียกว่าเป็น Sweep Floc Coagulation หรือ Sweep Coagulation

กลไกที่ใช้ผลลิกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนจำนวนมาก จึงจะเกิดการระบวณการโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีปริมาณสารมากอาจใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนน้อยกว่า เพราะน้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยจะมีโอกาสที่จะสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้วแต่กระบวนการโคแอกกูเลชันอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควรจึงใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีปริมาณมลสารอยู่มาก โอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก (รูปที่ 2.12)

เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ กระบวนการโคแอกกูเลชันจึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะที่ค่าซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุดแต่ค่าที่มีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกนี้คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของสารต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีระดับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ

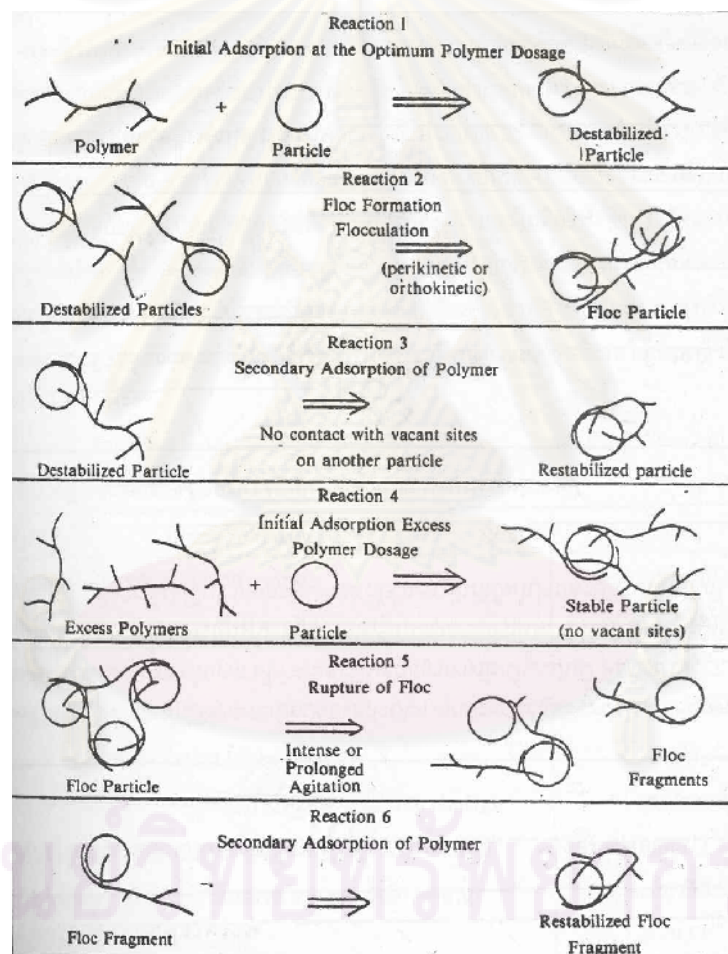
ที่มา : Samuel, D.F. and Osman, M.A., 1983

4) การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

อธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging Model (รูปที่ 2.13)

โมเลกุลของสารโพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับกับอนุภาคตัวอื่น ๆ โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ปฏิกิริยาที่ 2) การเชื่อมต่อดังกล่าวเกิดขึ้นได้ตลอดเท่าที่มีโพลิเมอร์และตำแหน่งว่างที่ผิวอนุภาคถ้าปลายอิสระของโพลิเมอร์ไม่มีที่สำหรับเกาะจับอนุภาคอื่น (ไม่ว่าจะเหตุผลใดก็ตาม) ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ปฏิกิริยาที่ 3) ซึ่งทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับกับอนุภาคอื่น และทำให้ตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะมีน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและ

ไม่มีที่ว่าง เรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) การใช้สารโพลิเมอร์มากเกินไปทำให้โพลิเมอร์หลายโมเลกุลไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น (ปฏิกิริยาที่ 4) การกวนน้ำที่แรงเกินไปหรือนานเกินไปทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นมาแล้วแตกออกเป็นส่วน ๆ (ปฏิกิริยาที่ 5) และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม (ปฏิกิริยาที่ 6) เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่ (เกียรติพงศ์ เจริญสุข, 2543)



รูปที่ 2.13 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์

ที่มา : Samuel, D.F. and Osman, M.A., 1983

2.5.2 การสร้างสัมผักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ (Transport of Colloidal Particles)

(เกียรติพงษ์ เจริญสุข, 2546)

ขั้นตอนแรกของการทำโคแอกกูเลชัน คือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ส่วนขั้นตอนต่อไป คือ การทำฟล็อกคูเลชัน เป็นการทำให้อนุภาคต่าง ๆ เคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกัน อนุภาคที่สัมผัสกันแล้วจะต้องเกาะติดกันจนเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกจึงจะถือว่าเกิดฟล็อกคูเลชัน ถ้ามีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคแต่ไม่จับตัวกันไม่ถือว่าเกิดฟล็อกคูเลชัน วิธีสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่าง ๆ มีหลายวิธี ดังนี้

1) การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น การกวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่าง ๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลที่แตกต่างกันเป็นเหตุให้อนุภาคต่าง ๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อทางเทคนิคว่า ฟล็อกคูเลชันแบบออร์โธไคเนติก (Orthokinetic Flocculation) อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูเลชันแบบออร์โธไคเนติกควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

2) การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเป็นการเคลื่อนที่แบบอาศัยความร้อน การสัมผัสระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนหรืออาศัยความร้อนนี้เรียกว่า ฟล็อกคูเลชันแบบเพอริไคเนติก (Perikinetic Flocculation) การเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลดังกล่าว สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอนเท่านั้น

3) การสัมผัสระหว่างอนุภาคเนื่องจากการตกตะกอน เกิดขึ้นจากการตกตะกอนที่มีอัตราความเร็วในการตกตะกอนไม่เท่ากันของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูเลชันแบบนี้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

4) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบออร์โธไคเนติก แต่อาจเกิดช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสมีน้อย การใช้เครื่องกรองจะช่วยเพิ่มอัตรา

สัมผัสและบังคับให้อนุภาคต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกัน แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีขีดจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล.

5) ในกรณีที่คอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน แต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

ความสำคัญของทั้ง 2 ขั้นตอนมีความเท่าเทียมกัน และต้องมีทั้ง 2 ขั้นตอนจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์ ปฏิกริยาโคแอกกูเลชันจะเกิดเกือบสมบูรณ์เมื่อสารเคมีละลายน้ำได้หมดโดยในขั้นแรกจะเกิดตะกอนขนาดเล็กและรวมตัวกันใหญ่ขึ้น เนื่องจากการลดประจุไฟฟ้าของอนุภาค และการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) จากนั้นจึงส่งเข้ากระบวนการฟล็อกคูเลชัน เพื่อกวนช้า ๆ ให้อนุภาคมาชนกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถแยกออกได้ง่าย (สวีนา เกตุสุวรรณ, 2543)

การที่จะแยกอนุภาคออกจากของเหลวได้นั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้การแยกโดยถังตกตะกอน แต่ถ้าแยกอนุภาคออกโดยการตกตะกอนและอาศัยแรงดึงดูดของโลกแล้ว ขนาดของอนุภาคที่จะแยกต้องมีขนาดใหญ่พอและตกตะกอนได้ง่าย จึงทำให้ต้องอาศัยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันร่วมกัน

แรงที่กระทำต่ออนุภาค นอกจากแรงดึงดูดของโลกแล้วยังมีแรง electrostatic และ interionic ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคจนไม่สามารถตกตะกอนได้ ดังนั้นจึงต้องใส่สารเคมี (coagulant) ลงไปเพื่อลดแรงที่กระทำที่ผิวโดยประจุไฟฟ้า ทำให้อนุภาคสามารถมาสัมผัสและรวมตัวกันให้ใหญ่ขึ้นได้ (สวีนา เกตุสุวรรณ, 2543)

2.6 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันเรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรืออาจเรียกว่า ฟล็อกคูแลนต์ (Flocculant) สารเคมีซึ่งช่วยทำให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid) หรือฟล็อกคูแลนต์เอ็ด (Flocculant Aid) (เกียรติพงศ์ เจริญสุข, 2546) สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอนในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) เป็นสารตัวใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อสะดวกในการใช้งานมีอำนาจในการสร้างตะกอนและรวมตัวตะกอนสูง ตกตะกอนเร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนเร็ว น้อยและละลายน้ำได้ดีแต่ราคา

ค่อนข้างสูง การใช้ปูนขาว (Lime) เพื่อให้เกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งวิธีนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อลดค่าซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอยได้ด้วย ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าซีโอดีควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการเลือกใช้สารเคมีเพื่อลดต้นทุนและก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

ในปัจจุบันสารสร้างตะกอนจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.6.1 กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

เมื่อเติมสารสร้างตะกอนในกลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ลงในน้ำโมเลกุลของมันจะแตกตัวออกเป็นอลูมิเนียมอิออน (Al^{+3}) และสารประกอบเชิงซ้อนจำนวนมาก (Complexion) อลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ที่ใช้จะมีหลายชนิด เช่น

1) Aluminium Sulphate ($Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) หรือสารส้ม (Alum) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Filter alum ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) ซึ่งละลายน้ำก็ได้

2) Liquid Alum จะมี Water-Soluble Alumina (Al_2O_3) อยู่ 5.8-8.5% ราคาถูกกว่าชนิดแรก

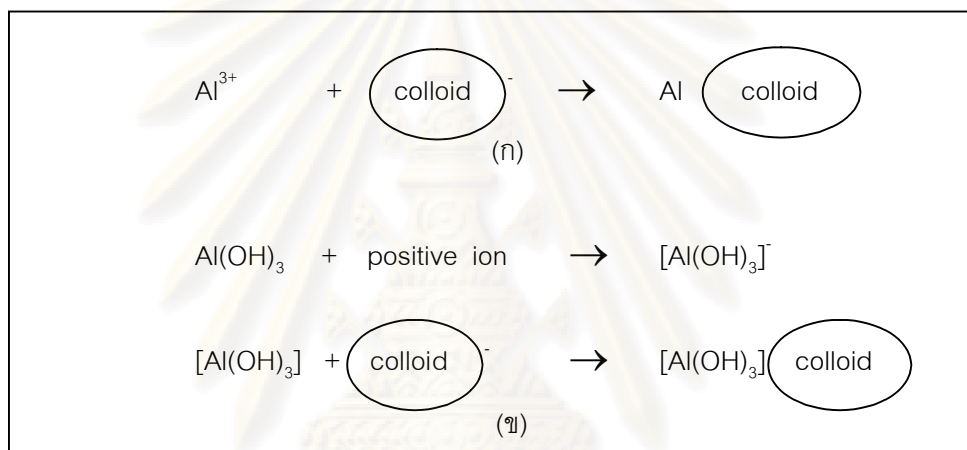
3) Sodium Aluminate ประกอบด้วย Al_2O_3 ซึ่งทำให้อยู่ตัวด้วย NaOH สารตัวนี้ไม่ใช่โคต ๗ มักใช้คู่กับสารส้มเพื่อให้ได้ผลที่ดี

4) Activated Silica มักใช้ร่วมกับ Alum ทำให้การตกตะกอนเกิดได้เร็วขึ้น

5) Polyaluminium Chloride (PAC) เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นช่วงพีเอชในการเกิดปฏิกิริยาที่กว้างกว่าโคแอกกูแลนต์ตัวอื่น ๆ สร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีสูตรโมเลกุลเป็น $[Al_n(OH)_mCl_{3-n}]$ ($n=2, 2.7, m=3.9, 1.0$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



Al(OH)_3 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ในน้ำเหมือนกับสารส้มคือ แตกตัวให้ Al^{3+} ซึ่งจะรวมกับอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถจับกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นอนุภาคใหญ่ได้ นอกจากนี้ Al^{3+} ยังทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น Al(OH)_3 ซึ่งเป็นตะกอนเล็กสามารถรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวก เกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวก เกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวกไปจับกันกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นตะกอนใหญ่ได้เช่นกัน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการทำงานของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC)

(ก) Al^{3+} รวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นอนุภาคใหญ่

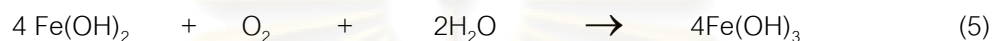
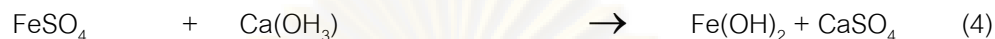
(ข) Al(OH)_3 รวมกับอนุภาคที่มีประจุบวกเกิดเป็นตะกอนใหญ่

ที่มา : มั่นสิน ตันฑุลเวศม์, 2532

2.6.2 กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือไอออนโคแอกกูแลนต์ (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

ไอออนโคแอกกูแลนต์จะทำงานในสภาวะที่มีพีเอชต่ำกว่าอลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ และสามารถทำงานในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า คือ 4-11 นอกจากนี้ Fe(OH)_3 floc ยังหนักกว่า Al(OH)_3 floc ทำให้ตกตะกอนได้เร็วกว่าไอออนโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่

1) Ferrous sulphate (FeSO_4) FeSO_4 จะทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็น Fe(OH)_3 ในสภาวะที่เป็นพีเอชสูงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ถ้าพีเอชต่ำกว่า 8.5 ดังนั้นจึงมักเติมปูนขาวลงไปดั่งสมการ

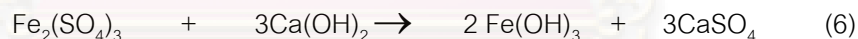


โดยทั่วไป FeSO_4 มักใช้คู่กับปูนขาวในการกำจัดน้ำกระด้างและตกตะกอนเหล็กและแมงกานีส

2) Ferric Sulfate ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ละลายได้ดีในน้ำอุ่น และจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำหรือปูนขาวที่เติมลงไป เกิดเป็น Fe(OH)_3 floc ในกรณีของ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ไม่จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในน้ำเพื่อออกซิไดส์ตามทฤษฎี

1 ppm ของ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ จะทำปฏิกิริยากับ 0.75 ppm alkalinity as CaCO_3
0.58 ppm 95% hydrate lime

ดั่งสมการที่ 6



โดยทั่วไป Ferric coagulation จะทำงานที่พีเอชต่ำกว่าเกลือของอลูมิเนียมและสามารถใช้ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าคือตั้งแต่ 4-11 ที่พีเอชต่ำ Ferric coagulant ใช้ได้ดีในการกำจัดสีและที่พีเอชสูง ๆ Ferric coagulant ก็ใช้ได้ดีในการกำจัดเหล็ก แมงกานีสซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสี นอกจากนี้ Fe(OH)_3 floc ยังหนักกว่า Al(OH)_3 floc และตกตะกอนได้เร็วกว่า

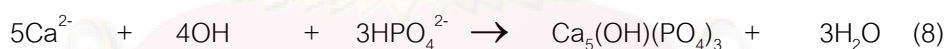
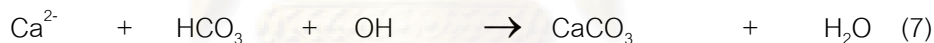
ข้อดีของ Ferric coagulant เปรียบเทียบกับ Aluminium coagulant คือ Fe(OH)_3 floc จะไม่กลับมาละลายที่ค่าความเป็นด่างสูง ๆ อย่างไรก็ตามเนื่องจากต้องใช้ที่พีเอชสูงทำให้เปลืองด่างจึงมักใช้กับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวเท่านั้น

3) Ferric chloride (FeCl_3) มีฤทธิ์กัดกร่อน ถ้ามีความเข้มข้นอยู่ด้วย FeCl_3 จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ในน้ำเกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$

การที่เกลือของเหล็กและอลูมิเนียมเหมาะที่จะใช้เป็นตัวตกตะกอน เพราะมีคุณสมบัติในการตกตะกอนคอลลอยด์ได้มากกว่าตัวอื่น ทั้งนี้เพราะการตกตะกอนของคอลลอยด์มีผลโดยอิออน ของอิเล็กโตรไลต์ที่เติมลงไปมีประจุตรงกันข้ามของอนุภาคคอลลอยด์ และผลที่เกิดขึ้นจากอิออนเหล่านั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุบนตัวของมัน

2.6.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาวผลึกน้ำ เป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการตกตะกอนผลึกความสามารถละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตกตะกอนผลึกในรูปหินปูน การเก็บรักษาจึงค่อนข้างยุ่งยาก การบ่อนปูนขาวผลึกน้ำ จะต้องให้ในลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) ข้อดีในการใช้ปูนขาวผลึกน้ำ คือ มีราคาถูก เมื่อเติมลงไปใต้น้ำ จะทำปฏิกิริยากับต่างและฟอสฟอรัสที่มีอยู่กลายเป็นสารตัวใหม่ตกตะกอนชะพาเอาสารแขวนลอยตกลงมาด้วย ดังสมการ



จากสมการ 8 สามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ด้วย

2.6.4 โพลีเมอร์ (Polymer)

สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารฟล็อกคูแลนต์ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ ในปัจจุบันฟล็อกคูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์แบบต่าง ๆ เรียกว่า โพลีเมอร์ (Polymer) หรือ โพลีอิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) สารโพลีเมอร์เป็นลูกโซ่ของสารโมโนเมอร์หลาย ๆ ตัวเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เช่น อาจมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่เพียงไม่กี่ร้อยไปจนถึงระดับที่สูงกว่าสิบล้าน เป็นต้น (เกียรติพงษ์ เจริญสุข, 2546)

การจำแนกประเภทของโพลิเมอร์ตามประจุมีดังนี้ คือ โพลิเมอร์ประจุบวก (cationic polymer) โพลิเมอร์ประจุลบ (anionic polymer) และโพลิเมอร์ไม่มีประจุ (nonionic polymer) ประจุของโพลิเมอร์เหล่านี้เกิดขึ้นจาก Functional group ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น คาร์บอกซิลซัลโฟเนต เป็นต้น (อุดมศักดิ์ เจียรวิชญ์, 2541)

ชนิดของโพลิเมอร์ (อุดมศักดิ์ เจียรวิชญ์, 2541)

การจัดหมวดหมู่สารโพลิเมอร์สามารถทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติและประโยชน์ใช้งานกล่าวคือ อาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดโครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุลหรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโมเลกุล เป็นต้น

1) แบ่งตามประจุที่อยู่บนสายโพลิเมอร์ (polymer chain) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- สารโพลิเมอร์ที่ให้ประจุบวก (cationic polymer) คือ สารโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีประจุบวกซึ่งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

- โพลีเอมีน
- โพลีเอทีลีนควอเทอร์นารี
- แคทไอออนนิคไซยานามีน
- คาโบไมอิลโพลิเมอร์แคทไอออน
- โพลีแอลฟาไวไนลไมดาไซด์
- โพลีไดอัลลีเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์
- ไดเมทิลอะมีโนอัลคิลอะครีลิก
- เมททาไซคลิกเอสเทอร์โพลิเมอร์
- เอ็นอัลคิลอะมีโนอัลคิลอะครีลาไมน์โพลิเมอร์

- สารโพลิเมอร์ที่ให้ประจุลบ (anionic polymer) คือ สารโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีประจุลบโดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูง มักใช้เป็นสารรวมตะกอนโพลิเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลทไอออน ได้แก่ พวกลโพลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิเลทและพวกลโพลิเมอร์ที่มีหมู่ซัลโฟเนต

- สารโพลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (nonionic polymer) คือ สารโพลิเมอร์ที่ไม่มีประจุทำให้เกิดการรวมตะกอนโดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมี

น้ำหนักโมเลกุลสูง ตัวอย่างสารโพลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน ได้แก่ โพลีเอทิลีนออกไซด์ โพลีอะครีลาไมด์ และโพลีไวนิลไพโรไลโดนอน มักใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

- สารโพลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและลบ (polyampholytes) คือ สารโพลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรดและเบสมักจะให้ประจุบวกที่พีเอชต่ำให้ประจุลบที่พีเอชสูงและเป็นกลางทางประจุที่บางค่าพีเอช

2) แบ่งตามแหล่งกำเนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- สารโพลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น เซลลูโลส (cellulose), เจลาติน (gelatin) และแป้ง (starch) เป็นต้น ส่วนใหญ่เป็นโพลิเมอร์ชนิดไม่มีประจุโดยมีลักษณะโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันในทางปฏิบัตินิยมใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ

- สารโพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นการนำเอาโมโนเมอร์หนึ่งหรือสองชนิดมารวมกันและสามารถจัดการสังเคราะห์ขึ้นให้ได้ตรงตามที่ต้องการ โดยสามารถทำให้ได้ขนาดที่แตกต่างกันเป็นผลทำให้มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ที่แตกต่างกันและสามารถกำหนดกลุ่มประจุรวมทั้งจำนวนประจุ (charge density) ที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถจัดการเกี่ยวกับโครงสร้างของโพลิเมอร์ให้เป็นแบบเส้นตรงหรือกิ่งก้านสาขาได้

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้

2.7.1 ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ ถ้าหากทราบชนิดของคอลลอยด์จะได้เลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม

2.7.2 ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน สารเคมีแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์ต่างชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอนและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำ ลักษณะของฟล็อก ความเร็วในการตกตะกอน ราคา ความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์และสารที่ใช้ในการตกตะกอน

2.7.3 พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดพีเอชหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในช่วงพีเอชนี้ ผลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นไม่ดีจึงต้องมีการปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการของสารเคมี

2.7.4 ปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน มีความสำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการตกตะกอน เพราะธรรมชาติสารใดก็ตามถ้าค่าผลคูณไอออนโปรดัก (ion product) ไม่เกินค่า K_{sp} (หรือค่าคงที่ในการละลาย) ของสารนั้นแล้ว สารนั้นจะไม่ตกผลึกตะกอนออกมาในน้ำ แต่ถ้าเกินค่า K_{sp} มันจะตกผลึกตะกอนทันที ดังนั้นปริมาณสารที่ช่วยในการตกตะกอนจึงต้องเหมาะสมต่อการตกตะกอนในแต่ละครั้ง ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่

2.7.5 เวลาและความแรงของการผสม การทำให้สารเคมีละลายน้ำได้อย่างทั่วถึงและเกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำอย่างรวดเร็วด้วยเวลาที่สั้น เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยได้ดี ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนั้นถ้าการใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องให้เกิดการรวมตัวของตะกอนจำเป็นต้องในการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนแตกแต่จะใช้เวลานานขึ้นเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันได้มากที่สุด

2.8 Pulp Powder และโพลีเมอร์ (Polymer) ที่ใช้ในงานทดลองนี้

ในงานทดลองนี้ใช้สาร 2 ชนิดในการทดลอง เพื่อเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี ที่ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเอทานอลในการเดินระบบ

2.8.1 Pulp Powder

ในการทดลองนี้ใช้ pulp powder เป็นสารสร้างตะกอน (flocculant) โดย pulp powder ผลิตมาจากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานเยื่อกระดาษ ถูกนำมาปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็น flocculant มีลักษณะภายนอกคล้ายผงแป้ง สีขาวขุ่น เนื้อละเอียด ละลายน้ำได้น้อย เป็นสารที่ถูกผลิตขึ้นมาใหม่และยังไม่ได้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

2.8.2 Polymer

สาร polymer Praestol 852 BC เป็น polymer ชนิดประจุบวก ใช้เป็นสารช่วยตกตะกอน (coagulant aid) ในงานทดลองนี้ โดย Praestol 852 BC ถูกใช้ในกระบวนการ dewatering และ thickening sludge ทั้งสำหรับน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม Praestol 852 BC นี้มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างเป็น polyacrylamide ลักษณะเป็นเม็ดสีขาว มีประสิทธิภาพในทุกช่วงพีเอช

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียกากสาโดยระบบยูเอเอสบี

Shin และคณะ (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นสุราในระบบไร้อากาศ ยูเอเอสบีแบบ 2 เฟส (Two-Phase UASB Reactor) เมื่อน้ำเข้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 4.1 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพของถังปฏิกริยายูเอเอสบีเฟสที่ 1 จะรับภาระได้ถึง 16.5 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร.วัน และผลิตกรดได้ 3.9 กรัมกรดอะซิติก/ลิตร.วัน ในถังปฏิกริยายูเอเอสบีที่มีแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะรับภาระได้สูงเป็น 44 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร.วัน และจะผลิตแก๊สได้ 16.5 ลิตร/ลิตร.วัน เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเข้าถูกกำจัดไปร้อยละ 80 ซึ่งหลังจากเกิด ตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ทั้ง 2 ถัง ปฏิกริยาแล้วจะสามารถรักษาพีเอชของเฟสแรกได้ด้วยการเวียนน้ำ ออกจากเฟสที่มีแบคทีเรียผลิตมีเทนกลับเข้ามาโดยปราศจากการเติมสารเคมี ซึ่งจากการทดลอง จะพบตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ที่มีสีและรูปร่างต่างกัน เมื่อผ่านไป 90 วัน ในส่วนของเฟสสร้างกรด สำหรับเฟสของการสร้างมีเทนจะพบหลังจากเริ่มต้นเดินระบบไปแล้ว 120 วัน

Harada และคณะ (1996) ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดแบบไร้อากาศ ยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียโรงกลั่นแอลกอฮอล์เข้มข้นมากภายใต้อุณหภูมิไซฟิลิค ในการทดลองจะใช้ ถังปฏิกริยายูเอเอสบีขนาด 140 ลิตร รวมระยะเวลาดำเนินการทั้งหมด 430 วัน โดยอัตราการ รับภาระสารอินทรีย์จะถูกปรับให้สูงขึ้นเป็น 28 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร.วัน เมื่อลดระยะเวลา กักเก็บทางชลศาสตร์ลงและกำหนดค่าชีโอดีในน้ำเข้าเท่ากับ 10 กรัมชีโอดี/ลิตร จากผลการ ทดลองพบว่าการกำจัดชีโอดีค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 39-67) แต่ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเป็นที่ น่าพอใจ (สูงกว่าร้อยละ 80) อีกทั้งมีการทำการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายชีโอดีของ กากน้ำตาลภายในขวดเซรัม (serum) อีกด้วย ส่วนสาเหตุที่ทำให้ถังปฏิกริยากำจัดชีโอดีได้น้อย น่าจะมาจากความสามารถในการย่อยสลายของเสียได้ต่ำ และความสามารถของตะกอนในการ ผลิตมีเทนจะเพิ่มขึ้นเป็น 24 เท่า สำหรับอะซิเตต และ 13 เท่าสำหรับไฮโดรเจนต่อ คาร์บอนไดออกไซด์ (H_2/CO_2) ซึ่งมากกว่าตะกอนในถังปฏิกริยา โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อ ความสามารถในการผลิตมีเทนของแบคทีเรียเมื่อขึ้นอยู่กับสารอาหารที่ใช้คือ 60 องศาเซลเซียส สำหรับอะซิเตต และ 60-65 องศาเซลเซียสสำหรับไฮโดรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2/CO_2) ส่วนกากน้ำตาลจะประมาณ 55 องศาเซลเซียส

Vlissidis (1993) ได้ศึกษาการย่อยแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงกลั่นแอลกอฮอล์ ภายใต้อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิค (50-55 องศาเซลเซียส) ถังปฏิกริยาที่ใช้คือขนาดจริงของโรงงาน โดย

การป้อนกลับของแบคทีเรียและของแข็งที่ไม่ถูกย่อย ซึ่งมีผลให้ปริมาณซัลเฟตและไนโตรเจนสูงขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความเข้มข้นกับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ในน้ำออกให้สูงขึ้นไปอีก จากผลการทดลองที่ดีที่สุดสำหรับการป้อนน้ำเสีย 60 กรัม/ลิตรซีโอดี เป็นดังนี้คือ อัตราภาระสูงถึง 6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.วัน การผลิตแก๊สชีวภาพประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกริยา.วัน (คิดเป็นปริมาณมีเทนร้อยละ 76) การผลิตมีเทนเท่ากับ 0.4 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนของแข็งอินทรีย์ไปเป็นมีเทนจะอยู่ที่ร้อยละ 70 และนั่นจะทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพอยู่เพียงร้อยละ 18

Goodwin และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตวิสกีด้วยระบบยูเอเอสบีที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก พบว่าเมื่อเจือจางน้ำเสียระบบจะมีความคงตัวที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 5.46 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือน้อยต่ำกว่านี้ โดยใช้ระยะเวลาเก็บน้ำเสียที่ 2.1 - 7 วัน แต่เมื่อใช้น้ำเสียที่ไม่ได้ทำการเจือจางพบว่าระบบบำบัดล้มเหลว โดยช่วงที่ระบบบำบัดคงที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ 70-90% อะซิเตทในน้ำออกมีค่าต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอชประมาณ 7.5 ในการทดลองนี้พบเพียงแบคทีเรียที่เป็นตะกอนลอยไม่พบแบคทีเรียที่มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นเม็ด

Akarsubasi และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการยูเอเอสบีสองชนิดคือ IUASB และ TUASB ในขนาดจริงที่ใช้ในโรงงาน เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการกลั่นแอลกอฮอล์โดยตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นของ TUASB นำมาจาก IUASB จากงานทดลองพบว่า IUASB บำบัดซีโอดีได้เฉลี่ย 90% ในช่วงอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 2.5-8.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และ TUASB บำบัดซีโอดีได้ 60-80% ในช่วงอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 6-11 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และมีประสิทธิภาพการผลิตมีเทนของแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ 350 และ 376 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมของแข็งแขวนลอยระยะเหย-วัน ตามลำดับ เมื่อศึกษาส่วนประกอบของแบคทีเรียชนิด archaea ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยเซลลูโลส ด้วยวิธี PCR (polymerase chainreaction) พบว่าทั้งสองระบบมี RNA gene ที่เหมือนกัน 83.1%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี

สมศักดิ์ ศรีวะโลสกุล (2534) ได้ศึกษาการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในช่วงเดินระบบถังหมักในระบบยูเอเอสบี ซึ่งใช้น้ำกากส่าจากโรงงานสุรา พบว่าระบบไบโอเทนไม่พบการเกิดตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด เนื่องจากความผิดพลาดในการควบคุมระบบทำให้เกิดสภาพไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดการสูญเสียตะกอนจุลินทรีย์ออกจากระบบในปริมาณมาก แต่ระบบยูเอเอสบีสามารถตรวจพบ ตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดที่ก้นถังหมักในวันที่ 113

Hulshoff Pol และคณะ (1983a) ได้ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในระดับห้องปฏิบัติการและได้รายงานว่าการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากเป็นขบวนการทางพลศาสตร์ แต่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2-5 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ของตะกอนจุลินทรีย์ จะเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด และเมื่อมีการเพิ่มตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในถังหมักเล็กน้อย จะมีผลให้ Methanogenic Activity เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดที่เพิ่มให้ จะเป็นตัวนำในการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด และพบว่าแคลเซียมที่ความเข้มข้น 150 มิลลิเมตร ต่อลิตร จะทำให้การตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดดีขึ้น ที่สำคัญเขากล่าวว่า จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่า น้ำเสียที่ได้จากการ กลั่นสุรา (Distillery Waste) Rendering Waste และ Com-starch Waste เมื่อใช้เดินระบบยูเอเอสบี สุดท้ายจะเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดได้แต่ก็มีปัญหา

Schulze และคณะ (1988) ได้รายงานถึงความสำเร็จในการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดของระบบยูเอเอสบี ที่มี Gelatine เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียและเป็นแหล่งของคาร์บอน แต่ในสภาพของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ NH_4^+ สูง จะได้ตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นต่ำ

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

Kato (1994) ได้ศึกษาการหมุนเวียนน้ำกลับในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำด้วยระบบยูเอเอสบีกล่าวว่าในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นน้อยกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ด้วยระบบยูเอเอสบี พบว่าระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำจะให้ปริมาณก๊าซน้อย ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กับน้ำเสียได้ไม่ดี ส่งผลให้อัตรากาแพร่ของสารอาหารต่ำกว่าอัตราการใช้สารอาหารในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้แบคทีเรียที่อยู่ชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เท่านั้นที่จะเจริญเติบโต ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จึงใหญ่ขึ้นแต่มีโพรงอยู่ภายในส่งผลให้การทำงานของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่ำลง และเกิดการหลุดออกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เนื่องจากลอยตัวจากก๊าซที่สะสมในโพรงอากาศนั้น ความเร็วของการไหลขึ้นของถังยูเอเอสบีที่เหมาะสมต้องทำให้เกิดการผสมอย่างเพียงพอ และไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายให้กับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หรือพัดพาให้ตะกอนเม็ดลอยออกจากระบบ

Ramos และคณะ (1994) ได้ศึกษาการเกิดตะกอนเม็ดจากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ น้ำเสียจากโรงกลั่นแอลกอฮอล์ ควบคุมให้พีเอชอยู่ในช่วง 7 โดยมีค่าซีไอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ (CON:N:P) เท่ากับ 100:1.75:0.25 จากการทดลองพบว่าอัตราเร็วไหลขึ้น มีผลอย่างมากต่อการเกิดตะกอนเม็ด ทั้งทางด้านขนาด รูปร่าง โดยความเร็วที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.25-0.5 เมตรต่อชั่วโมง โดยพบว่าขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.67 มิลลิเมตร ในวันที่ 124 ของการทดลอง มีค่าวีเอสเอสต่อเอสเอส (VSS/SS) ประมาณ 0.69-0.9 และพบแบคทีเรียพวก Methanotrix อยู่เป็นจำนวนมาก

Mamouni, Leduc, และ Guiot (1998) ได้ศึกษาผลของการเติม Percol 763 และ ไคโตแซนลงในระบบบำบัดยูเอเอสบีเทียบกับถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ไม่เติมโพลีเมอร์ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ควบคุมพบว่าถังที่มีการเติมโพลีเมอร์ไคโตแซนจะมีประสิทธิภาพการเกิดเม็ดตะกอนที่ดีกว่า Percol 763 และไม่เติมโพลีเมอร์เลยตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการสร้างเม็ดตะกอนที่เหนือกว่าของไคโตแซนอาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้าง polysaccharide ของไคโตแซน ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกับ Extracellular polymeric substance (ECP) ซึ่งเป็นสารพื้นฐานในโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน และยังพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเติมโพลีเมอร์ประจำวันคือ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งแขวนลอย

Gonzalez และคณะ (1998) ได้ศึกษา ผลของอัตราบำบัดสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) สัดส่วนอาหารหลักต่อธาตุอาหารเสริม (COD:N:P) และสัดส่วนของอาหารหลักต่อค่าความเป็นด่าง (COD:Alkalinity) ที่มีผลต่อการเกิดตะกอนเม็ด พวกเขาสังเกตพบว่าการ

เกิดตะกอนเม็ด หลังจากทำการทดลอง 30 วัน ขนาดของตะกอนเม็ดเฉลี่ยใหญ่ขึ้นเมื่อมีอัตรา
รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากขึ้น นอกจากนั้นพวกเขาพบว่า หลังจากที่เกิดตะกอนเม็ดเกิดสมบูรณ์
แล้วสารอาหารเสริมอาจไม่ต้องเติม และสัดส่วนของความเป็นต่างต่ออาหารหลักสามารถลดค่าลง
ได้โดยที่ประสิทธิภาพของระบบไม่ลดลง

Yu และคณะ (1999) ศึกษาผลของการเติมอนุภาคเฉื่อยสองชนิด คือ granular activated
carbon (GAC) และ powdered activated carbon (PAC) ขนาด 0.4 และ 0.2 มิลลิเมตร
ตามลำดับ โดยเติมปริมาณ 1500 มิลลิกรัม/ลิตร เพียงครั้งเดียวในช่วงเริ่มต้นระบบ พบว่าใช้
ระยะเวลาในการสร้างตะกอนเม็ดจุลินทรีย์สั้นกว่าถึงควบคุมที่ไม่ได้เติมอนุภาคเฉื่อย 35 และ 30
วัน ตามลำดับ

Teo, Xu, และ Tay (2000) ได้ทดลองสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในห้องทดลองเพื่อยืนยัน
ทฤษฎีที่เสนอโดย Tay และคณะ พวกเขาพบว่าความสามารถในการเปลี่ยนถ่ายโปรตอน (Proton
Translocating Activity) บนผิวของแบคทีเรียเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดเม็ดตะกอน
จุลินทรีย์ นอกจากนั้นพบว่าตะกอนเกิดขึ้นหลังจากทดลอง 45 วัน

Sharma และ Singh (2001) ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารรอง (Trace Nutrients)
ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พวกเขาพบว่า การเติมเหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ ช่วยให้เกิดเม็ด
ตะกอนได้ดีขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้เกิดเม็ดตะกอนน้อยลง

Yu และคณะ (2001a) ได้ศึกษาผลของแคลเซียมในการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
บำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี โดยทดลองเติม $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หลายค่า ตั้งแต่ 150 ถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซึ่งเขาพบว่าการเติมแคลเซียม 150 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตรจะเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดเม็ด
ตะกอนจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด

Yu และคณะ (2001b) ได้ศึกษาผลของการเติม AlCl_3 ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี ซึ่ง
เขาทำการทดสอบ โดยถังปฏิกรณ์ไบแรกไม่เติม AlCl_3 ส่วนถังปฏิกรณ์ไบที่สองเติมที่ความเข้มข้น
300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการเติม AlCl_3 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใน
ระบบยูเอเอสบีและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์สามารถพบในถังที่เติม AlCl_3 ได้เร็วกว่า และขนาดเม็ด
ตะกอนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่กว่าถังที่ไม่เติม AlCl_3

Kuan-Yeow Show และคณะ (2004) ได้ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
บำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี โดยเติมโพลิเมอร์ประจุบวกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสูตรทางเคมีว่า AA 184 H ซึ่ง
นำมาจาก Ondeo Nalco pacific Pre. Ltd. ซึ่งโพลิเมอร์นี้ใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสีย

อุตสาหกรรม โดยใช้เป็นตัวปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าการเติมโพลีเมอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และพบว่าเติมโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมากที่สุด ทั้งการตกตะกอน ความแข็งแรงของเม็ดตะกอน และการสร้างก๊าซมีเทน

Jeong และคณะ (2005) กล่าวว่าการรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้มีความเข้มข้นสูงเป็นสิ่งสำคัญของการบำบัดสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน การสร้างตะกอนจุลินทรีย์ให้อยู่ในลักษณะเม็ดเป็นวิธีที่ดี แต่มีข้อจำกัดคือ ใช้เวลามากกว่า 6 เดือน จึงจะเกิดเป็นเม็ดตะกอนที่คงตัว และจากการทดลองเติมโพลีเมอร์ผสม ระหว่างโพลีเมอร์อินทรีย์และอนินทรีย์ลงในตะกอนพบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดตั้งแต่ 1-5 มิลลิเมตรและมีค่าความเร็วในการจมตัวสูงกว่าเม็ดตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจริง เมื่อเม็ดตะกอนในการเดินระบบคงตัว ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูงถึง 90% ที่อัตราการบำบัดรวมทุกอินทรีย์สูงสุด 18 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

Sabry (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียของระบบยูเอเอสบี โดยใช้ตะกอนแบคทีเรียลักษณะเป็นฟlocs และแบบเป็นเม็ดเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียที่ระยะเวลาต่างๆกัน พบว่าตะกอนแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.1.1 การศึกษาความเข้มข้น pulp powder เบื้องต้นโดยวิธี Jar Test

1. นำหัวเชื้อตะกอนเริ่มต้นจากโรงงานวิเคราะห์หาค่าของแข็งแขวนลอยเพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่นอน จากนั้นนำตะกอนใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร (มล.) ปริมาณเท่ากันทุกบีกเกอร์

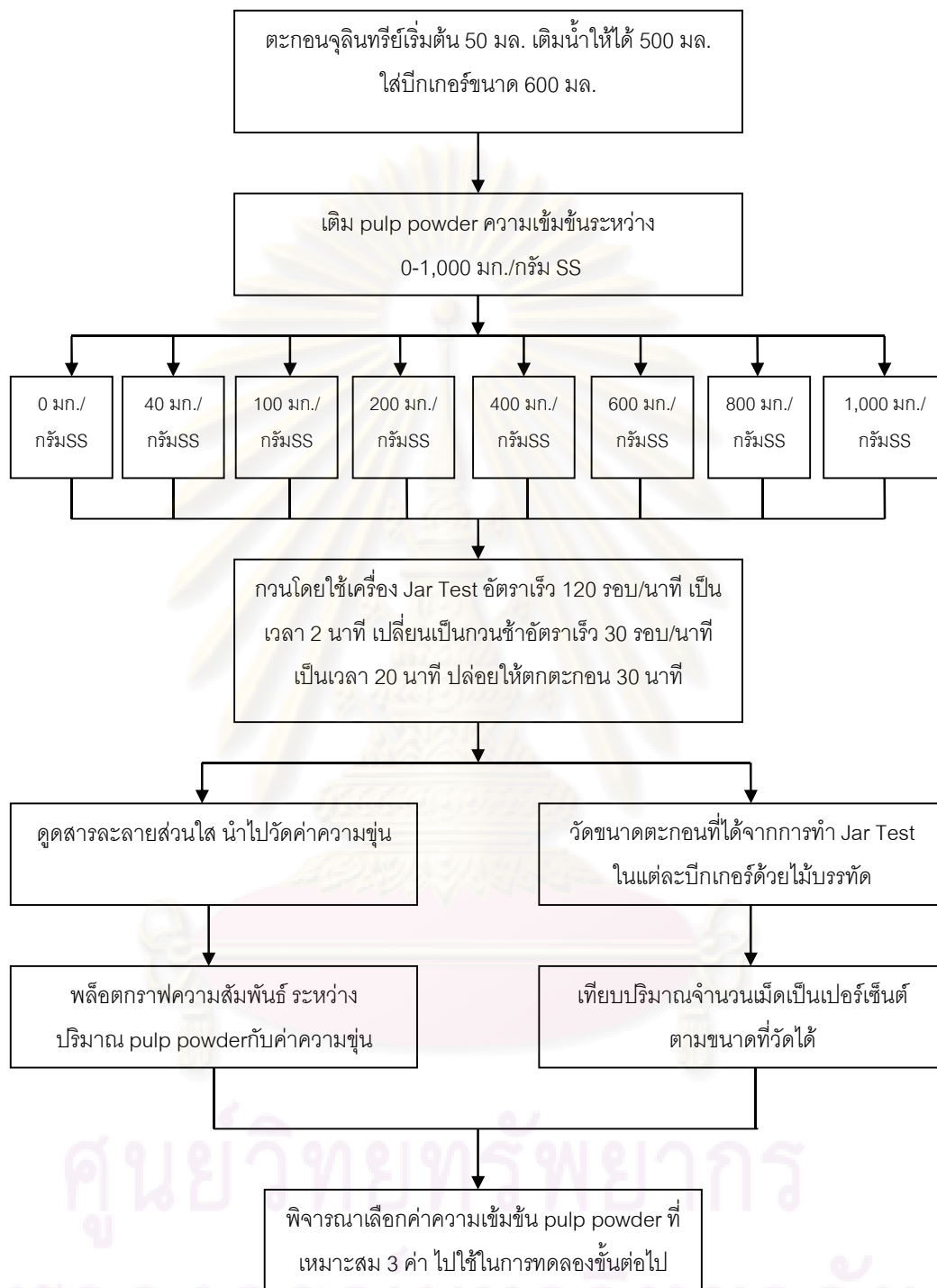
2. เติม pulp powder ปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 0-1,000 มิลลิกรัม/กรัม ของแข็งแขวนลอย (มก./ก. เอสเอส) กวนโดยใช้เครื่อง Jar Test อัตราเร็ว 120 รอบ/นาที เปลี่ยนเป็นกวนช้าที่อัตราเร็ว 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยให้ตกตะกอน 30 นาที

3. ดูดน้ำส่วนใส นำไปวัดค่าความขุ่น และดูลักษณะการรวมตัวของตะกอน พิจารณาเลือกปริมาณความเข้มข้น pulp powder ที่เหมาะสม 3 ค่า ในการทดลองเดินระบบ เปรียบเทียบกับการไม่เติม pulp powder แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3.1

3.1.2 ปริมาณสารช่วยตกตะกอน(coagulant aid) polymer ที่ใช้ในการทดลองนี้

อ้างอิงปริมาณ polymer ที่เหมาะสมจาก ธงชัย มหัจฉริยวงศ์ (2549) ที่ทดลองแล้วพบว่าปริมาณการใช้ polymer ที่เหมาะสม (Optimum Dose) ในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบยูเอเอสพีคือ 2 mg/g SS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหาปริมาณ pulp powder ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test

3.1.3 การศึกษาผลของการเติม pulp powder ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี

1) การปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มการทดลอง ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงงานจะถูกปรับสภาพให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีการเจือจางความเข้มข้น โดยใช้วิธีการเลี้ยงแบบ batch ใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพเป็นเวลา 1 เดือน

2) หลังจากปรับสภาพของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นแล้ว ทำการเติมตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ปริมาณ 20 มิลลิกรัม ของแข็งแขวนลอยระเหย/ลิตร

3) ภายหลังจากเติมตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังปฏิกรณ์แล้ว ทำการเติม pulp powder และ polymer ลงในถังปฏิกรณ์ โดยใช้วิธีการกวนรวมกับตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ ไม่ใช้การเติมทางสายสูบน้ำเข้าเพื่อป้องกันการอุดตันของตะกอนในสายยางและส่วนกระจายน้ำเข้า โดยเติม pulp powder และ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก เพียงครั้งเดียวตลอดการทดลอง

4) การเดินระบบ ทำการเดินระบบโดยใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เดินระบบจนกระทั่งระบบอยู่ในสภาวะคงตัว จึงทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 4 และ 6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ

5) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละถังปฏิกรณ์เปรียบเทียบกัน

3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ส่วนประกอบของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนำมาจากโรงงานผลิตเอทานอลในจังหวัดนครปฐม โดยจากข้อมูลการวิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานนี้มีพารามิเตอร์ต่างๆ ดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์น้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
พีเอช	4.2
บีโอดี (มก./ล.)	24,600
ซีโอดี (มก./ล.)	92,000
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	36,000
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	2,200-2,600
โพแทสเซียม (มก./ล.)	5,600-6,800
ซัลเฟต (มก./ล.)	4,000-7,000

3.2.2 วิธีการเตรียมน้ำเสีย

นำน้ำเสียจากโรงงานมาเจือจางด้วยน้ำประปาให้มีค่าซีโอดีเหลือ 500, 1,000 และ 1,500 มก./ล. เพื่อให้ได้อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ 2, 4 และ 6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ในแต่ละช่วงของการทดลองเดินระบบ โดยเตรียมน้ำเสียความถี่ 2 วัน/ครั้ง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

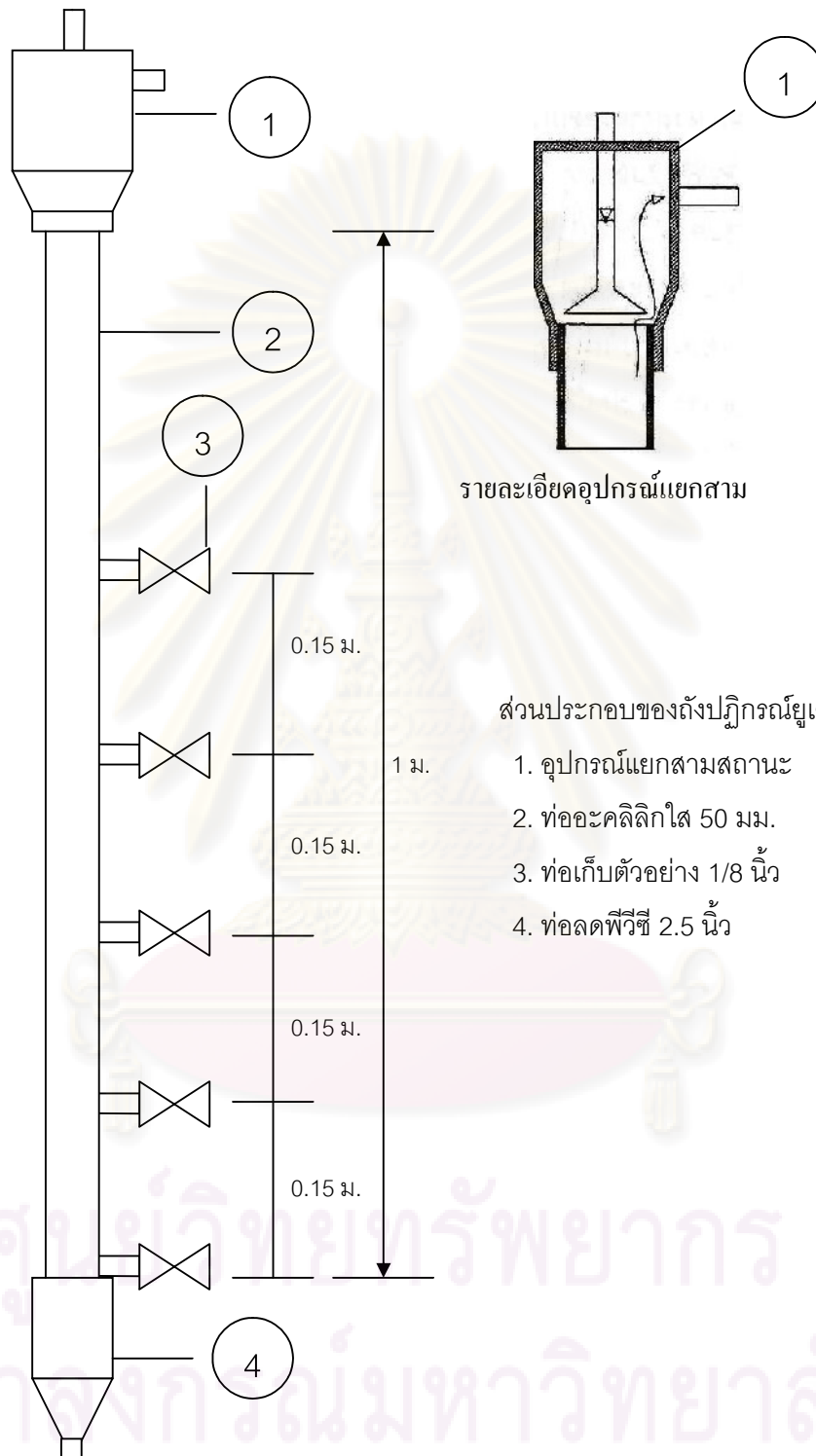
ในการทดลองนี้ใช้แบบจำลองถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบีทำจากท่ออะคริลิกใสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร จำนวน 4 ชุด มีส่วนย่อยสลายสูง 1 เมตร ปริมาตรกักเก็บน้ำ 2 ลิตร ด้านบนมีชุดอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator; GSS) ทำจากท่อพีวีซี ส่วนด้านข้างของถังปฏิกรณ์มีวาล์วสำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนตามความสูงของถังจำนวน 5 ตำแหน่ง ซึ่งรายละเอียดแบบจำลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี แสดงดังรูปที่ 3.2

3.3.2 ถังพักน้ำเสีย

- 1) ถังพักน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เป็นถังพลาสติก ขนาด 20 ลิตร จำนวน 4 ถัง
- 2) ถังพักน้ำเสียออกจากระบบ เป็นถังพลาสติก ขนาด 20 ลิตร จำนวน 4 ถัง
- 3) ถังเตรียมน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ ใช้ถังพลาสติกที่มีปริมาตร 120 ลิตร จำนวน 1 ถัง

3.3.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 1 ชุด ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำ 1 ตัว สำหรับสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบ Diaphragm Pump จะสูบน้ำเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.2 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

3.3.4 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซ

ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 1 ชุด ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซ 1 ชุดต่อเข้ากับท่อ นำก๊าซจากระบบยูเอเอสบีทางด้านบน โดยใช้หลักการแทนที่น้ำและทำการปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าต่ำกว่าพีเอช 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตรที่วัดได้คือก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ

3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน

การติดตั้งถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีต้องระวังเรื่องแสงแดดที่ส่องผ่านระบบ เนื่องจากแสงแดดจะทำให้เกิดสาหร่ายสีเขียวซึ่งจะสังเคราะห์แสงและผลิตก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ระบบ ซึ่งระบบในการทดลองนี้ไม่ต้องการออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องนำถุงพลาสติกสีดำมาคลุมส่วนย่อยสลายของระบบที่ทำจากอะคริลิกใสไว้เพื่อเป็นการป้องกันแสงส่องผ่าน โดยทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีบริเวณชั้นล่าง ตึกวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยมีหลักการทำงาน ดังนี้

3.4.1. น้ำเสียในถังพักน้ำเสียเข้าระบบจะถูกสูบเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow)

3.4.2. น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะไหลออกทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีไปยังถังพักน้ำทิ้งออกจากระบบ

3.4.3. ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบจะไหลผ่านอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator; GSS) ทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ



รูปที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

3.5 การเดินระบบและการควบคุมระบบ

3.5.1 การเดินระบบ

ระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีการป้อนน้ำเสียเข้าระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยตรง ซึ่งการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างโดยตรงนั้นมีข้อเสียที่สำคัญ คือ ในกรณีที่น้ำเสียในถังพักน้ำเสียหมดจะทำให้มีการสูบอากาศเข้าสู่ระบบได้ซึ่งเป็นการนำออกซิเจนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ทำให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องหาวิธีป้องกันปัญหาดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นโดยเตรียมน้ำเสียให้มีปริมาณเพียงพอต่อการทำงานของระบบในแต่ละวัน ด้วยการเติมน้ำเสียใหม่ทุกวันให้เพียงพอเพื่อป้องกันน้ำเสียหมดถัง นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันปัญหาฟิเอซของน้ำเสียเข้าระบบต่ำจนเกินไปซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่ำลงไปด้วย

3.5.2 การควบคุมระบบ

การควบคุมระบบสำหรับงานวิจัยนี้ ทำการควบคุมปัจจัยต่างๆของระบบให้เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตการทดลอง เพื่อควบคุมการทดลองให้ได้ผลที่มีความถูกต้องมากที่สุดโดยทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ

ในงานวิจัยนี้เมื่อเริ่มเดินระบบ จะทำการวัดอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำให้ได้ตามที่กำหนดไว้ คือ 8 ลิตรต่อวัน เท่ากันทั้ง 4 ถึงปฏิกรณ์ นอกจากนั้นยังต้องหมั่นสังเกตปริมาณน้ำในถังพักน้ำเสียเข้าระบบทั้งหมดในแต่ละวันด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อทำการทดลองไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง อัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำจะลดลง เนื่องจากการอุดตันของเมือกแบคทีเรีย ดังนั้นจึงต้องหมั่นถอดออกมาล้างทำความสะอาดบ่อยๆ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว

2) สภาพแวดล้อมทางกายภาพ

ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบคือ แสงสว่างและอุณหภูมิ เนื่องจากถ้าแสงสว่างสามารถส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้จะทำให้เกิดสาหร่ายสีเขียวขึ้นบริเวณผนังด้านในของถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนลดลง ดังนั้นจึงต้องป้องกันไม่ให้แสงสว่างส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ โดยการใช้ถุงพลาสติกสีดำมาคลุมส่วนย่อยสลายของระบบที่ทำจากอะคริลิกใสไว้เพื่อเป็นการป้องกันแสงส่องผ่านและต้องคลุมในลักษณะที่แกะหรือเปิดออกได้ง่าย เพื่อให้สามารถตรวจลักษณะของแบคทีเรียที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ได้โดยง่าย

การควบคุมอุณหภูมิ จะทำในกรณีที่มีสภาพอากาศมีอุณหภูมิลดลงกว่าสภาพอากาศปกติทั่วไป ซึ่งอุณหภูมิต่ำมากจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทมีไซฟิลิค (Mesophilic) โดยจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส และเนื่องจากสภาพอากาศของกรุงเทพมหานครโดยทั่วไปแล้วจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทมีไซฟิลิค (Mesophilic) อยู่แล้ว ดังนั้นปัจจัยด้านอุณหภูมิจึงไม่มีผลกระทบมากนัก

3) อุปกรณ์ต่างๆของระบบ

การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบให้ทำงานได้อย่างปกติเป็นสิ่งสำคัญ โดยสิ่งที่จำเป็นต้องทำ ได้แก่ การล้างทำความสะอาดถังพักน้ำเสีย การตรวจสอบไม่ให้มีการอุดตันของตะกอนภายในท่อสายยางและหัวปั๊มเครื่องสูบน้ำ การตรวจสอบความเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นกับสายยาง เช่น การเกิดรูรั่ว ซึ่งต้องเปลี่ยนสายยางใหม่ เพื่อควบคุมอัตรา

การไหลเข้าของน้ำเสียให้เท่ากับที่กำหนด ตลอดจนตรวจสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ใช้สูบน้ำเสียเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอ

3.6 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์

จุดเก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ความถี่	วิธีการวิเคราะห์
1. ถังพักน้ำเสียเข้า	ซีโอดี	3 ครั้ง / สัปดาห์	Close Reflux
	พีเอช	5 ครั้ง / สัปดาห์	pH meter
	อุณหภูมิ	5 ครั้ง / สัปดาห์	Thermometer
2. น้ำออก	สภาพต่างทั้งหมด	2 ครั้ง / สัปดาห์	Direct titration
	กรดไขมันระเหย	2 ครั้ง / สัปดาห์	Direct titration
	ของแข็งแขวนลอย	3 ครั้ง / สัปดาห์	Standard Method
	ปริมาณก๊าซทั้งหมด	3 ครั้ง / สัปดาห์	วัดปริมาตรแบบแทนที่น้ำ
3. อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน	เมื่อสิ้นสุดการทดลอง	Gas Chromatographic Method
	ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน	เมื่อสิ้นสุดการทดลอง	SMA (Specific Methanogenic Activity)
4. ช่องเก็บตัวอย่าง	การกระจายขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	1 ครั้ง/เดือน	เครื่อง Particle Size Analyser
		เมื่อสิ้นสุดการทดลอง	Sieve Analysis
	โครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	เมื่อสิ้นสุดการทดลอง	Scanning Electron Microscope (SEM)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของ pulp powder

เนื่องจาก pulp powder เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเศษวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตของโรงงานเยื่อกระดาษ ถูกนำมาปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นสารสร้างตะกอน (flocculant) แต่ยังไม่ได้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรม จึงยังไม่มีรายงานการศึกษาในเรื่องของทฤษฎีกระบวนการสร้างตะกอนของสารตัวนี้ ในการทดลองนี้จึงทดลองศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นในทางกายภาพและเคมีของ pulp powder

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ pulp powder

1) การสังเกตลักษณะภายนอก พบว่า pulp powder มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น เมื่อนำมาทดลองละลายน้ำพบว่า ละลายน้ำยาก ส่วนที่ไม่ละลายน้ำสามารถตกตะกอนได้เร็ว และบางส่วนเกิดเป็นคอลลอยด์เจือปนในน้ำทำให้น้ำมีสีขาวขุ่น แสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อลองกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Microfiber Filters) พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีลักษณะใส



ก. ลักษณะของ pulp powder

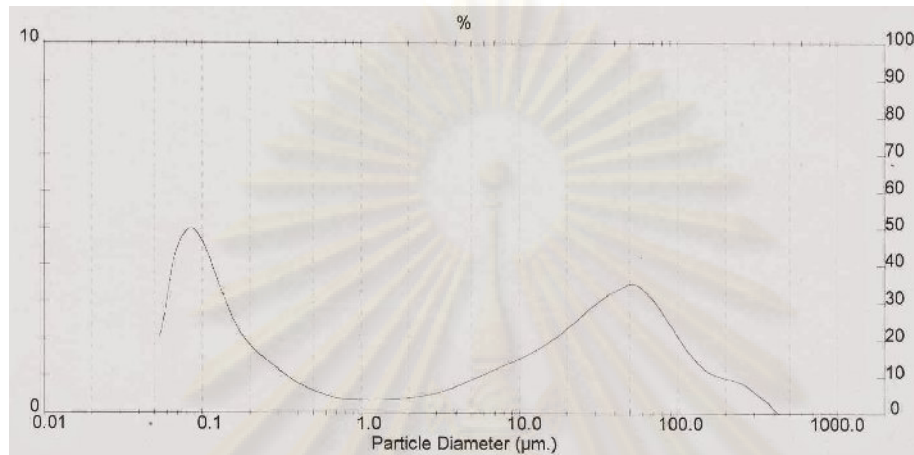


ข. pulp powder เมื่อนำไปละลายน้ำ

รูปที่ 4.1 ลักษณะ pulp powder ก่อนและหลังละลายน้ำ

2) ดูลักษณะการกระจายขนาดขณะอยู่ในน้ำด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer พบว่ามีค่า $D(0.1) = 0.08$ ไมโครเมตร, $D(0.5) = 8.52$ ไมโครเมตร, $D(0.9) = 40$ ไมโครเมตร ค่า $D(0.1)$, $D(0.5)$, และ $D(0.9)$ หมายความว่า มีขนาดของ pulp powder ที่มีขนาดเล็กกว่านี้อยู่ 10, 50, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยลักษณะกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่ากราฟที่

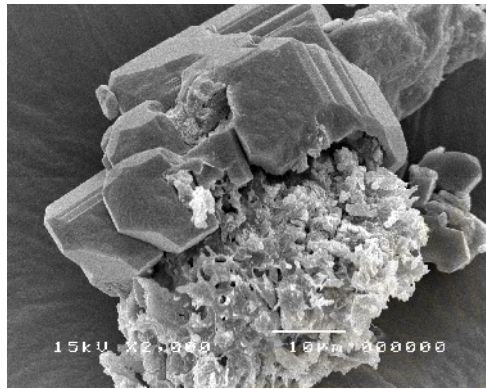
ได้มีจุดสูงสุดแบ่งออกเป็น 2 peak ซึ่งน่าจะเป็นส่วนที่เป็นคอลลอยด์และส่วนที่เป็นตะกอนที่จมตัวได้เร็ว



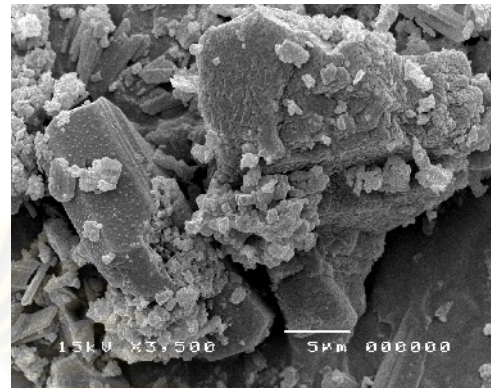
รูปที่ 4.2 กราฟการกระจายขนาดของ pulp powder ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง particle size analyzer

3. ลักษณะพื้นผิวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยดูลักษณะของ pulp powder ก่อนและหลังนำมาละลายน้ำเพื่อเปรียบเทียบลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าลักษณะของ pulp powder จะมีทั้งลักษณะของผลึกขนาดใหญ่และขนาดเล็กอยู่รวมกัน ซึ่งผลึกขนาดเล็กนี้คาดว่าจะแตกออกมาจากผลึกขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงเมื่อนำมาละลายน้ำพบว่า มีลักษณะผลึกบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปโดยพื้นผิวจะเป็นรอยลักษณะเป็นร่องตื้นๆ ในรูปที่ 4.3 (ข) แต่ผลึกส่วนใหญ่หลังจากทดลองนำมาละลายน้ำแล้วยังคงมีลักษณะเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

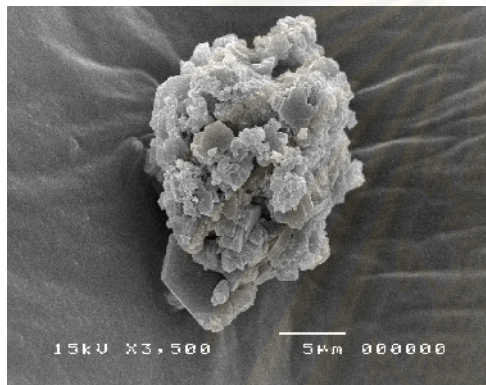
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก.



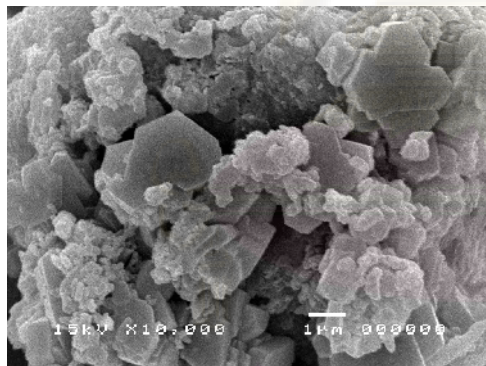
ข.



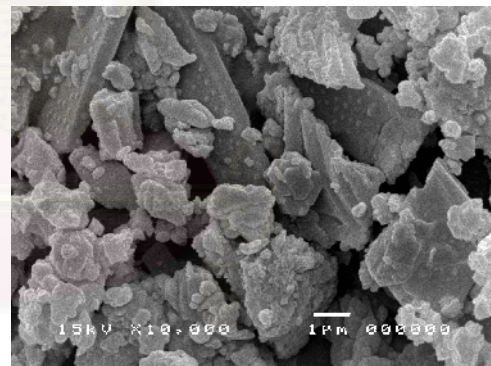
ค.



ง.



จ.



ฉ.

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของ pulp powder ก่อนและหลังนำไปละลายน้ำ

หมายเหตุ : ก. pulp powder ก่อนนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 2,000 เท่า

ข. pulp powder หลังนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 3,500 เท่า

ค. pulp powder ก่อนนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 3,500 เท่า

ง. pulp powder หลังนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 3,500 เท่า

จ. pulp powder ก่อนนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 10,000 เท่า

ฉ. pulp powder หลังนำไปละลายน้ำ กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของ pulp powder

1) หาค่าดัชนีซีต้า ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano ZS พบว่า pulp powder มีค่าดัชนีซีต้า 17.47 มิลลิโวลต์ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าเป็นบวกหมายความว่า ประจุที่ผิวรอบๆของ pulp powder เป็นประจุบวก

2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีใน pulp powder ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer ได้องค์ประกอบธาตุและออกไซด์ของธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุและออกไซด์ใน pulp powder

ปริมาณธาตุและออกไซด์ในตัวอย่าง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
ธาตุ	pulp powder	ออกไซด์	pulp powder
O	34.41		
Na	6.52	Na ₂ O	8.80
Mg	0.09	MgO	0.15
Al	5.10	Al ₂ O ₃	9.64
Si	1.39	SiO ₂	2.98
P	0.02	P ₂ O ₅	0.04
S	11.74	SO ₃	29.31
Cl	0.62	Cl	0.62
K	0.06	K ₂ O	0.08
Ca	20.63	CaO	28.87
Ti	<0.01	TiO ₂	<0.01
Mn	<0.01	MnO	<0.01
Fe	0.25	Fe ₂ O ₃	0.36
Sr	0.03	SrO	0.04
Total	80.86	Total	80.89

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าใน pulp powder มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักที่มีในปริมาณมากคือ O, Ca, S, Na และ Al โดยมีปริมาณ 34.41, 20.63, 11.74, 6.52 และ 5.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.1.3 ประมวลผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของ pulp powder

จากข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้น ทำให้ประมาณการกลไกการทำลายเสถียรคอลลอยด์ของ pulp powder ได้ โดยน่าจะเป็นไปได้ใน 2 กลไกด้วยกัน คือ

1) อธิบายได้จากกลไกการทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (กลไกแบบดูดติดผิว) คอลลอยด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตะกอนแบคทีเรีย ซึ่งโดยทั่วไปแบคทีเรียที่กระจายในน้ำเสีย (Dispersed Bacteria) มักจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบและเกิดแรงผลัทางไฟฟ้าสถิตย์ ผลการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า พบว่า pulp powder มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวก หมายความว่าประจุบริเวณผิวรอบของ pulp powder เป็นประจุบวกนั่นเอง ดังนั้น อนุภาคคอลลอยด์ของแบคทีเรียที่เป็นประจุลบจึงถูกทำลายเสถียรภาพด้วย pulp powder โดยการถูกดูดติดผิวทำให้สามารถลดแรงผลัทางไฟฟ้าสถิตย์ได้

2) อธิบายได้จากกลไกการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่มากพอ จะเกิดการตกตะกอนผลึกลงมาอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวนี้ ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพและตกตะกอนได้ สารสร้างตะกอนจำพวกนี้ได้แก่ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว ทำให้เกิดการสร้าง $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Mg(OH)_3$ และ $CaCO_3$ ซึ่งเป็นสาร (precipitation) ที่ไม่ละลายน้ำ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุใน pulp powder ก็พบว่ามีความองค์ประกอบของสารสร้างตะกอนประเภทนี้ด้วยเช่นกัน โดยพบ Ca และ Al ซึ่งเป็นธาตุหลักในปูนขาวและสารส้ม ในปริมาณ 20.65 และ 5.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจากการดูลักษณะภายนอกของ pulp powder ด้วยเครื่อง SEM ก็พบว่า pulp powder มีลักษณะเป็นผลึกขนาดใหญ่และเล็กอยู่รวมกัน เมื่อทดสอบนำไปละลายน้ำพบว่า ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือมีการละลายน้ำได้น้อย ซึ่งคล้ายกับคุณสมบัติของปูนขาวที่เป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการตกตะกอนผลึก และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยเช่นกัน

การที่ไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจนว่า pulp powder มีคุณสมบัติการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกใดกลไกหนึ่ง เนื่องจากไม่ทราบถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของเคมีขององค์ประกอบธาตุใน pulp powder ที่แน่ชัด สารที่มีองค์ประกอบของธาตุเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวของธาตุต่างกันทำให้สารนั้นมีคุณสมบัติต่างกันไปด้วย

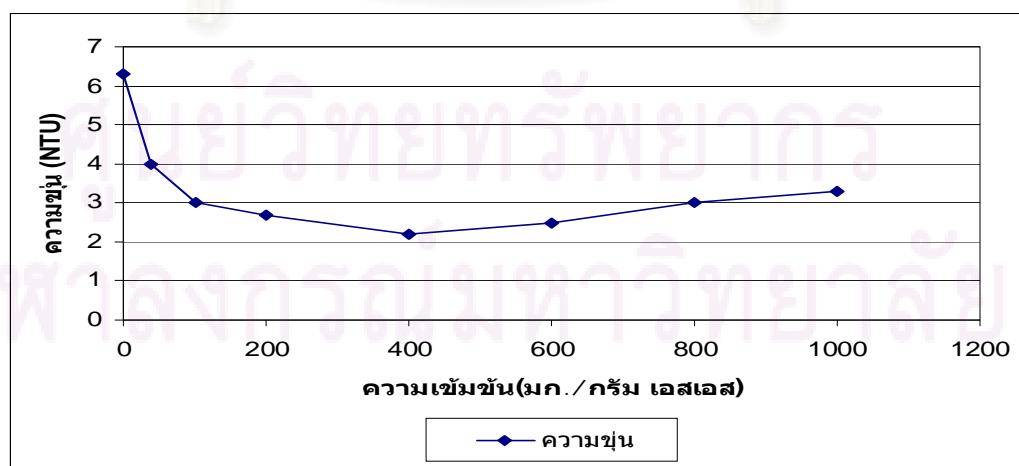
4.2 การศึกษาความเข้มข้นของ pulp powder ที่เหมาะสมโดยวิธี Jar Test

4.2.1 การทำ Jar Test หาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของ pulp powder

การทดลองนี้จะเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม 3 ค่าเพื่อใช้ในการทดลองเดินระบบ โดยพิจารณาเลือกค่าที่เหมาะสมจาก ค่าความขุ่นและลักษณะการจับตัวของเม็ดตะกอน ซึ่งทำโดยการนับจำนวนตะกอนที่ได้จากการทำ Jar Test ที่มีลักษณะจับตัวเป็นก้อนกลม และวัดขนาดของตะกอนที่จับตัวกันด้วยไม้บรรทัด โดยเทียบจำนวนตะกอนที่ทำกรนับเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงผลตาม ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ผลการทำ Jar Test ของ pulp powder

ความเข้มข้นของ pulp powder (มก./กรัม เอสเอส)	ความขุ่น (NTU)	การกระจายขนาด (เปอร์เซ็นต์โดยจำนวน)		
		0 – 2 มม.	2 – 4 มม.	4 – 6 มม.
0	6.3	มีลักษณะเป็น floc ไม่สามารถนับจำนวนได้		
50	4	มีลักษณะเป็น floc ไม่สามารถนับจำนวนได้		
100	3	มีลักษณะเป็น floc ไม่สามารถนับจำนวนได้		
200	2.7	63.16	36.84	-
400	2.2	23.08	76.92	-
600	2.5	18.29	73.46	8.25
800	3	34.50	59.29	6.21
1000	3.3	62.54	27.13	8.33

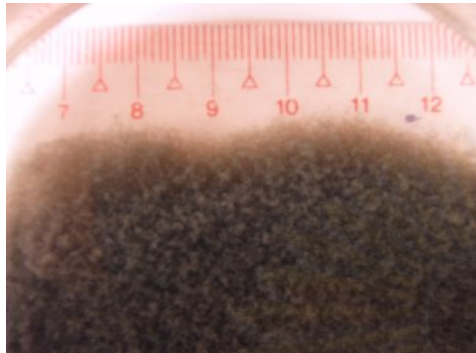


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความขุ่นที่ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างของ pulp powder

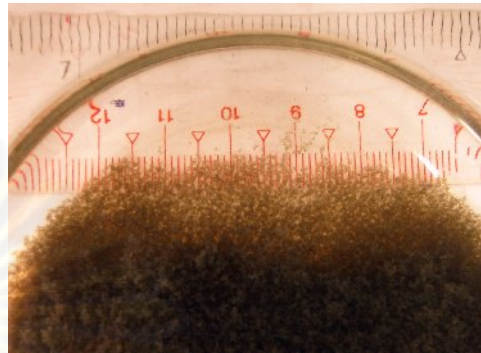
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าความขุ่นของน้ำในบีกเกอร์ที่ไม่มีการเติม pulp powder จะมีค่า 6.3 NTU เมื่อเติม pulp powder ความเข้มข้น 50 มก./กรัม เอสเอส ความขุ่นจะเหลือ 4 NTU และค่าความขุ่นของน้ำในบีกเกอร์จะมีใกล้เคียงกันเมื่อเติม pulp powder ความเข้มข้นที่ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มก./กรัม เอสเอส โดยมีค่าความขุ่นที่ 3, 2.7, 2.2, 2.5, 3 และ 3.3 NTU ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการรวมตัวของตะกอนเมื่อเติม pulp powder ที่ความเข้มข้น 0, 50, 100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มก./กรัม เอสเอส ผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ตะกอนที่ไม่มีการเติม pulp powder ตะกอนจะมีเนื้อละเอียด เมื่อเติม pulp powder ความเข้มข้น 50 มก./กรัม เอสเอส การรวมตัวของตะกอนมีลักษณะเป็น floc มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ที่การเติม pulp powder ความเข้มข้น 100 มก./กรัม เอสเอส ตะกอนมีการจับตัวเป็น floc ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดย floc ที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร การเติม pulp powder ความเข้มข้น 200 มก./กรัม เอสเอส ตะกอนที่ได้มีการรวมตัวเป็นก้อนที่จับตัวกันแน่นกว่า floc และมีรูปทรงค่อนข้างกลม แต่ส่วนหนึ่งก็ยังมีลักษณะที่เป็น floc อยู่ ส่วนที่ความเข้มข้น 400, 600, 800 และ 1,000 มก./กรัม เอสเอส ตะกอนมีการจับตัวเป็นก้อนกลมค่อนข้างสมมาตร และตะกอนจับตัวค่อนข้างแน่น แต่ที่ความเข้มข้น pulp powder ที่ 1,000 มก./กรัม เอสเอส พบว่ามีตะกอนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ซึ่งน่าจะเกิดจากการแตกออกของตะกอนขนาดใหญ่ และจากการวัดขนาดของตะกอนที่จับตัวกันเป็นก้อน แสดงผลในตารางที่ 4.2 พบว่าในบีกเกอร์ที่มีการเติม pulp powder ที่ความเข้มข้น 400, 600 และ 800 มก./กรัม เอสเอส มีปริมาณตะกอนที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 2 - 4 มิลลิเมตร อยู่ 76.92, 73.46 และ 59.29 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวน ตามลำดับ ซึ่งให้ผลในการรวมตะกอนดีกว่าในบีกเกอร์อื่นๆ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกความเข้มข้นของ pulp powder 400, 600 และ 800 มก./กรัม เอสเอส ที่สามารถทำให้เกิดการจับตัวของตะกอนดีที่สุด ไปใช้ในการทดลองช่วงการเดินระบบยูเอเอสบีต่อไป

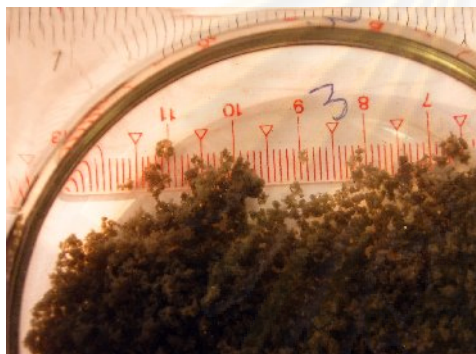
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. 0 มก./กรัม เอสเอส



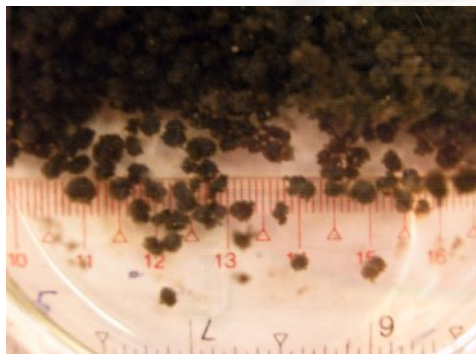
ข. 50 มก./กรัม เอสเอส



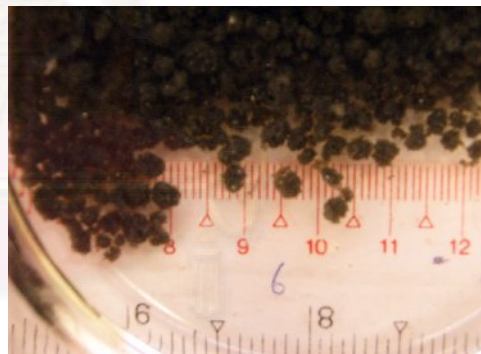
ค. 100 มก./กรัม เอสเอส



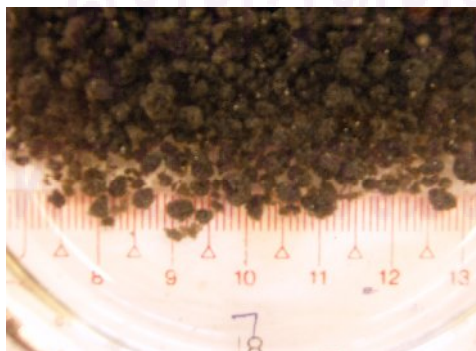
ง. 200 มก./กรัม เอสเอส



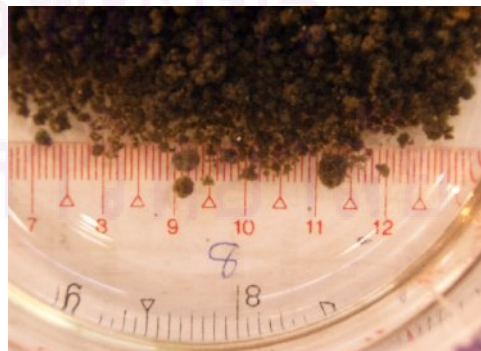
จ. 400 มก./กรัม เอสเอส



ฉ. 600 มก./กรัม เอสเอส



ช. 800 มก./กรัม เอสเอส



ซ. 1,000 มก./กรัม เอสเอส

รูปที่ 4.5 ลักษณะตะกอนที่ได้จากการเติม pulp powder ที่ความเข้มข้นต่างๆ

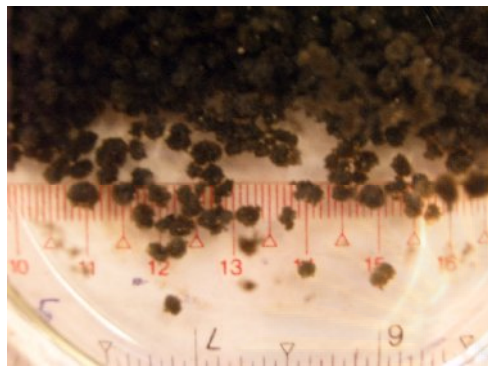
4.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของสารช่วยตกตะกอน (coagulant aid) polymer

Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก

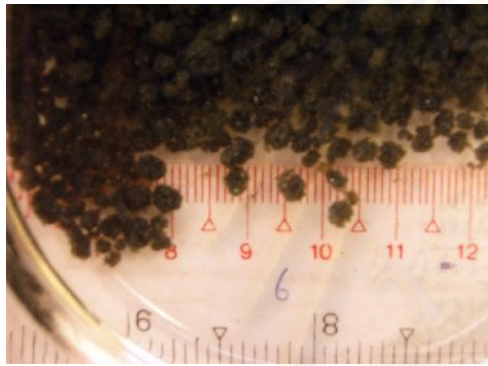
อ้างอิงปริมาณ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ที่เหมาะสมจาก รัชชัย มหัจฉริยวงศ์ (2549) ที่ทดลองแล้วพบว่าปริมาณการใช้ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ที่เหมาะสม (optimum dose) ในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีคือ 2 มก./กรัม เอสเอส ในการศึกษานี้ใช้ pulp powder ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2.1 ที่ปริมาณ 400, 600 และ 800 มก./กรัม เอสเอส ทดลองทำ jar test วิธีเดียวกับในการทดลองที่ 4.2.1 เพียงแต่เติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส ในช่วงการกวนช้าที่อัตราเร็ว 30 รอบ/นาที ในบีกเกอร์ทั้ง 3 ดูลักษณะตะกอนที่ได้เทียบกับการไม่เติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก โดยลักษณะตะกอนที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส ในช่วงการกวนช้าที่อัตราเร็ว 30 รอบ/นาที จะเห็นว่าตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นในทุกปริมาณความเข้มข้นของ pulp powder ทั้ง 3 ค่า ในการทดลองเดินระบบจึงทำการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ลงในทุกถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่เท่ากันให้เป็นตัวแปรควบคุมเพื่อที่จะศึกษาผลของการเติม pulp powder ในปริมาณความเข้มข้นที่ต่างกันต่อประสิทธิภาพในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้

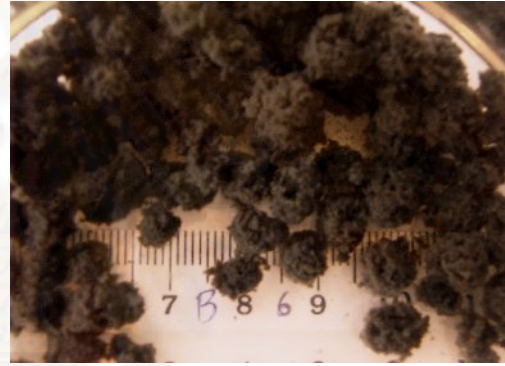
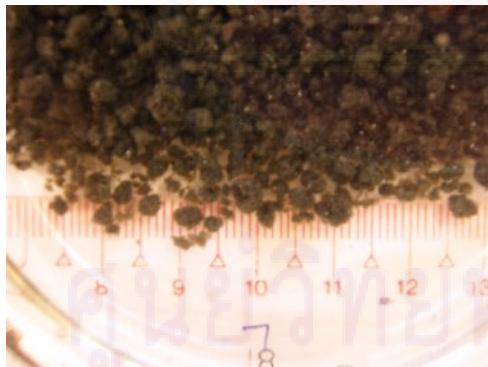
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส

pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส
+ polymer 2 มก./กรัม เอสเอส

pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส

pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส
+ polymer 2 มก./กรัม เอสเอส

pulp powder 800 มก./กรัม เอส

pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส
+ polymer 2 มก./กรัม เอสเอส

รูปที่ 4.6 ตะกอนที่ได้หลังจากเติม polymer ในขั้นตอนการกวนซ้ำ

หมายเหตุ : ด้านหัวลูกศร คือ การเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมของตะกอน polymer

ด้านหางลูกศร คือ ตะกอนเมื่อยังไม่ทำการเติม polymer

4.3 สภาวะการเดินระบบ

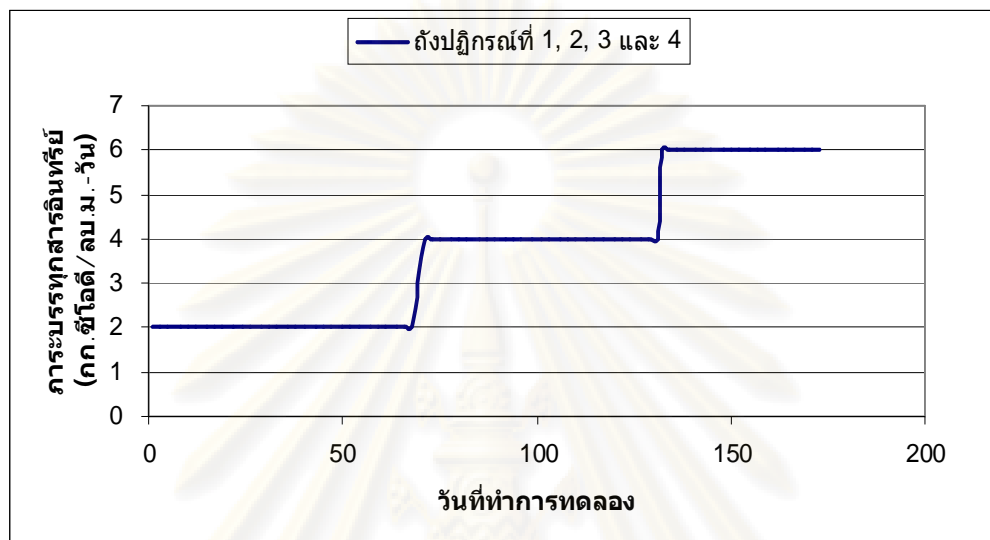
การเริ่มต้นของการศึกษานี้เริ่มจากการนำตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นจากระบบยูเอเอสพีของโรงงานผลิตเอทานอล ในจังหวัดนครปฐม มาปรับสภาพให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่เจือจางความเข้มข้นและภาวะบรรทุทสารอินทรีย์ต่ำ ให้พร้อมกับการเดินระบบเพื่อสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้เวลาเตรียมความพร้อมของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นมีลักษณะสีดำ เหลวคล้ายโคลน พบลักษณะการจับตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เล็กน้อย แต่ส่วนใหญ่เป็นตะกอนเหลวที่ไม่จับตัวกันเป็นเม็ด หลังจากนำตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นปรับสภาพและพร้อมที่จะดำเนินการแล้ว จะนำตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นมาเติมในถังปฏิกรณ์จำนวน 4 ถัง แต่ละถังปฏิกรณ์จะเติมตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 20 กรัม ของแข็งแขวนลอยระยะเหยย/ลิตร จากนั้นจะทำการเติมสารช่วยในการสร้างตะกอน (floculant) pulp powder และสารช่วยในการตกตะกอน (coagulant aid) polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ในปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาในการทดลองนี้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการเติม pulp powder และ polymer ในแต่ละถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่	ปริมาณการเติม pulp powder	ปริมาณการเติม polymer
1	800 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส	2 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส
2	600 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส	2 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส
3	400 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส	2 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส
4	0 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส	2 มิลลิกรัม/กรัม เอสเอส

โดยวิธีการเติม pulp powder และ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก จะใช้วิธีการกวนรวมกับตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ โดยไม่ได้เติมสารทางสายยางสูบน้ำเสียเข้าระบบ และเติมเพียงครั้งเดียวตลอดการทดลอง โดยเติม pulp powder เข้าไปก่อน ทำการกวนรวมกับตะกอน แล้วจึงเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ตามลงไป แล้วกวนรวมกับตะกอนจุลินทรีย์อีกครั้ง หลังจากนั้นจะทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน จึงทำการเดินระบบด้วยน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่องในวันรุ่งขึ้น เริ่มต้นที่อัตราภาวะบรรทุทสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และทำการเพิ่มภาวะบรรทุทสารอินทรีย์เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) โดยพิจารณา

จากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ตลอดการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ตลอดช่วงการทดลอง

รวมระยะเวลาในการเดินระบบตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 173 วัน ในการทดลองนี้จะควบคุมสภาวะการเดินระบบให้เหมือนกันทั้ง 4 ถึงปฏิกรณ์ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ควบคุมระบบและระยะเวลาทดลอง

วันที่เดินระบบ	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ซีโอดี (มก./ลิตร)	อัตราการสูบน้ำเสีย (ลิตร/วัน)	เวลากักเก็บน้ำเสีย (ชั่วโมง)	ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)
1-68	2	500	8	6	0.17
68-131	4	1000	8	6	0.17
132-173	6	1,500	8	6	0.17

4.4 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์

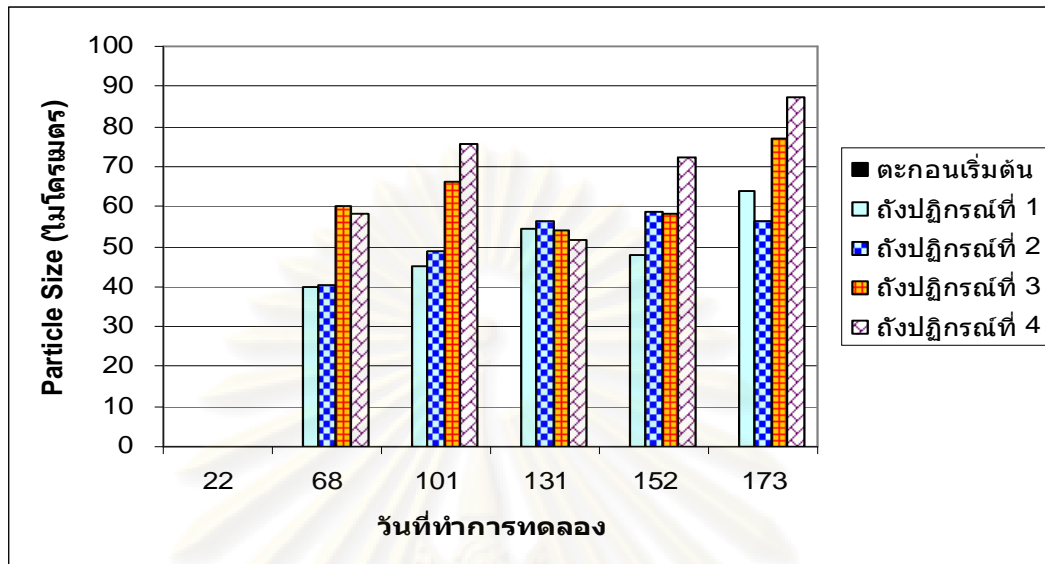
4.4.1 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

1) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer

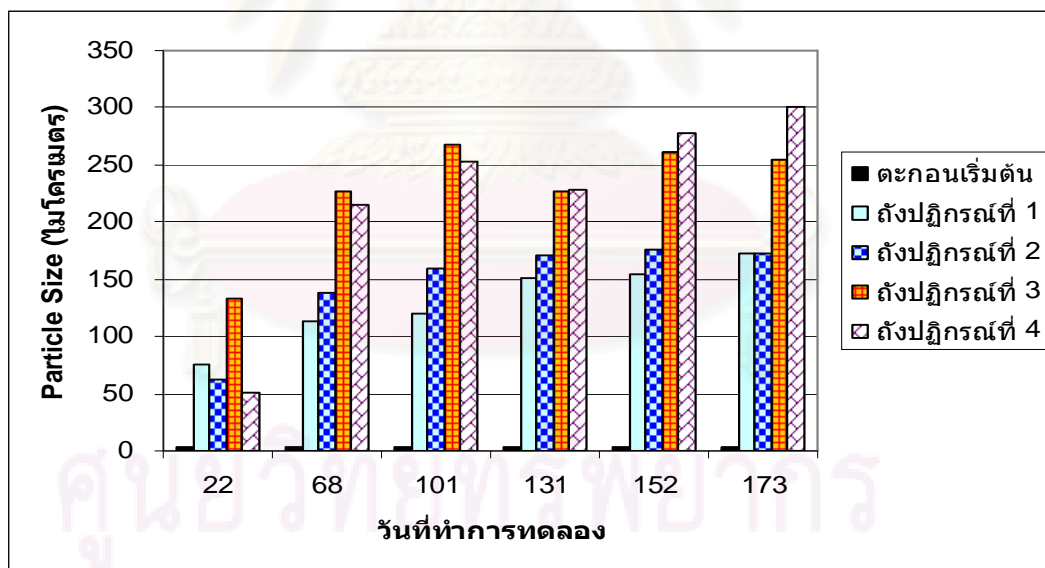
การวัดขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะวิเคราะห์ในรูปแบบของการกระจายขนาด โดยเครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern โดยอาศัยหลักการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของเม็ดตะกอนด้วยระบบเซ็นเซอร์ที่ส่งแสงมากระทบกับอนุภาค ขณะที่เม็ดตะกอน จุลินทรีย์ถูกสูบลไหลผ่านเลนส์ อนุภาคที่มีรูปร่างกลมหรือค่อนข้างกลมจะถูกวัดเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริง ขณะที่อนุภาคที่เป็น floc ซึ่งมีรูปทรงหลากหลาย จะถูกตั้งสมมติฐานว่ามีรูปทรงกลมและคำนวณกลับเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้เป็นตัวแทนของ floc นอกจากนี้ปัญหาที่พบจากการใช้เครื่องมือนี้ในการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์คือ การที่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดที่หลากหลายแตกต่างกัน และข้อจำกัดในเรื่องช่วงขนาดของเลนส์ที่สามารถวัดได้ ทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กมาก และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่อยู่ในช่วงขนาดที่เลนส์สามารถวัดได้ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่ถูกต้องมากนัก (จันทิมา สกุลพานิชย์, 2548) โดยเลนส์ในการวิเคราะห์นั้นสามารถวัดได้ในช่วง 0.05 - 878.67 ไมโครเมตร

ข้อมูลของการวัดขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นการกระจายตามขนาดต่างๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จึงเลือกค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลอง โดยเลือกค่า D(0.1), D(0.5), และ D(0.9) ซึ่งเป็นขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่านี้อยู่ 10, 50, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดตามลำดับ โดยหากการเปลี่ยนแปลงของค่า D ใดๆลดลง แสดงว่ามีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กอยู่ในปริมาณที่สูงขึ้น หรือกล่าวคือ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่มีการแตกตัว เช่นกันในทางตรงข้าม หากค่า D ใดๆเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการเพิ่มขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า D(0.1), D(0.5) และ D(0.9) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 เทียบกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

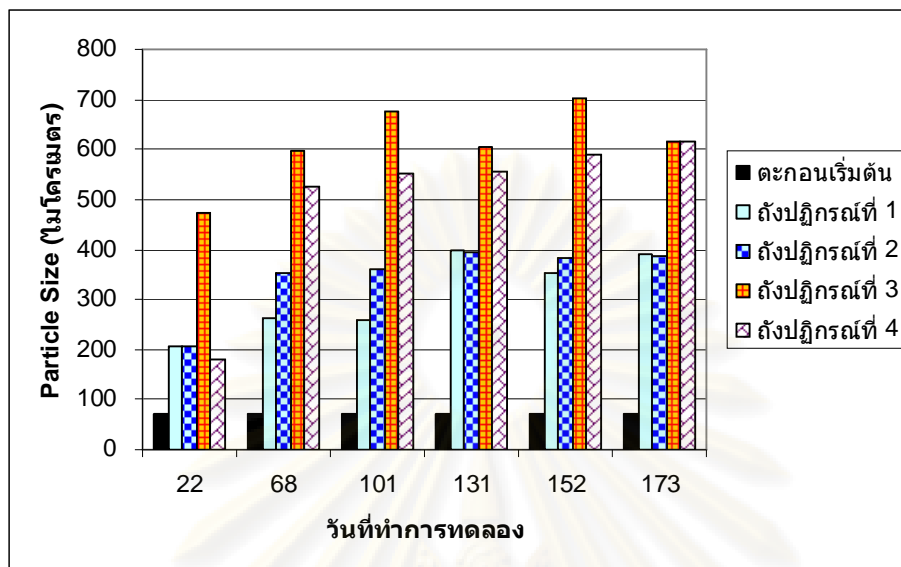
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ D(0.1) ตลอดการทดลอง



ข. การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ D(0.5) ตลอดการทดลอง



ค. การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ D(0.9) ตลอดการทดลอง

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง

หมายเหตุ

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าตะกอนจุลินทรีย์ของทุกถึงปฏิกรณ์มีการพัฒนาใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ ซึ่งดูได้จากค่า D ใดๆตลอดการทดลอง

โดยวันที่ 22 ของการทดลอง ค่า D(0.1) ในทุกถึงปฏิกรณ์มีค่าไม่แตกต่างจากตะกอนเริ่มต้น แต่เมื่อดูจากค่า D(0.5) และ D(0.9) ของทุกถึงปฏิกรณ์ ในวันที่ 22 พบว่ามีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับตะกอนเริ่มต้นอย่างมาก จึงสันนิษฐานได้ว่าในระยะแรกของการเดินระบบ ตะกอนจุลินทรีย์ในถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 มีการพัฒนาตัวยังไม่สมบูรณ์ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะมีการปั่นเหวี่ยงด้วยใบพัดเพื่อให้ตะกอนมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในมวลน้ำ แรงจากการปั่นเหวี่ยงทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่รวมตัวกันไม่สมบูรณ์ อนุภาคเกาะกันอย่างหลวมๆ เกิดการแตกออกเป็นตะกอนขนาดเล็ก ทำให้ค่า D(0.1) มีค่าไม่แตกต่างจากตะกอนเริ่มต้น

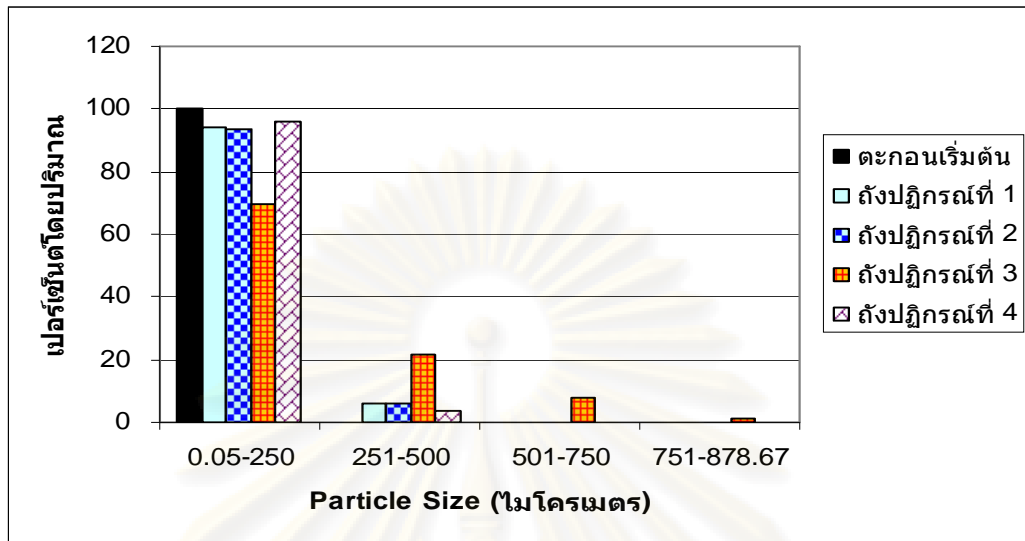
ค่า D(0.5) และ D(0.9) ในวันที่ 22 ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 อย่างมาก โดยมีค่า D(0.9) มากกว่าหนึ่ง เท่า เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ถังอื่นทุกถัง มีค่า D(0.5) มากกว่าหนึ่งเท่า เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และมีค่า D(0.5) มากกว่าเกือบหนึ่งเท่า เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ค่า D(0.5) และ D(0.9) ในวันที่ 68 ของการทดลอง จนถึงสิ้นสุดการทดลอง พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) อย่างมาก

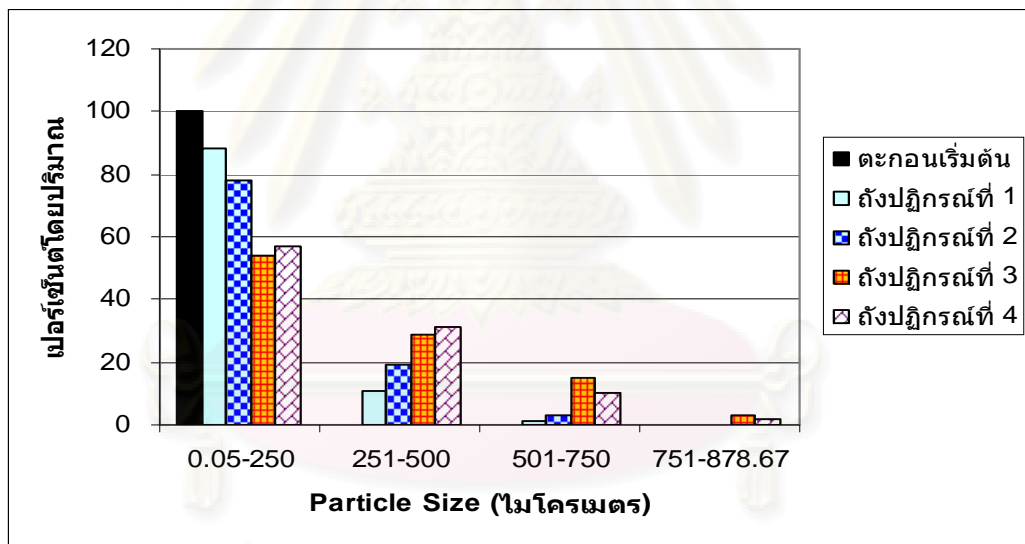
ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ในวันที่ 68 ถึงวันที่ 101 มีค่า D(0.9) น้อยกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่ในระยะยาวตั้งแต่วันที่ 131 ถึงสิ้นสุดการทดลอง พบว่ามีค่า D(0.9) ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า D(0.5) ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ในวันที่ 68 ถึงวันที่ 152 ของการทดลอง มีค่าน้อยกว่าของถังปฏิกรณ์ที่ 2 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้ว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ค่า D(0.5) ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ในวันที่ 68 ถึงวันที่ 101 ของการทดลอง มีค่าสูงกว่าของถังปฏิกรณ์ที่ 4 และมีค่าใกล้เคียงกันในวันที่ 131 ของการทดลอง แต่ในวันที่ 152 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ค่า D(0.5) ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีค่ามากกว่าค่า D(0.5) ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ส่วนค่า D(0.9) ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ในวันที่ 68 ถึงวันที่ 152 ของการทดลอง มีค่าสูงกว่าของถังปฏิกรณ์ที่ 4 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่า D(0.9) ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 มีค่าใกล้เคียงกัน จากการเปรียบเทียบข้อมูลข้างต้น หากดูค่า D(0.9) ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีปริมาณตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดนี้อยู่ 10% พบว่า โดยตลอดการทดลองถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ในปริมาณมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 4 แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 173 วัน ค่า D(0.9) ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่ 4

จากข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer สามารถนำมาทำเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณต่อตะกอนขนาดต่างๆได้เพื่อให้เห็นภาพมากขึ้น โดยนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของตะกอนเริ่มต้น เพื่อแสดงถึงการพัฒนารูปแบบของขนาดตะกอน จุลินทรีย์ในระบบ ดังรูปที่ 4.9

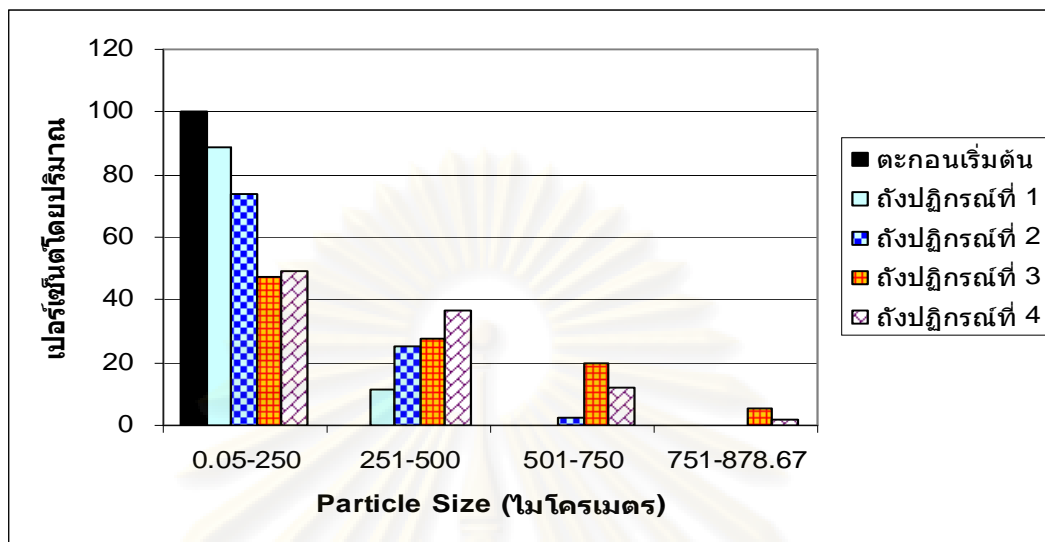


ก. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 22

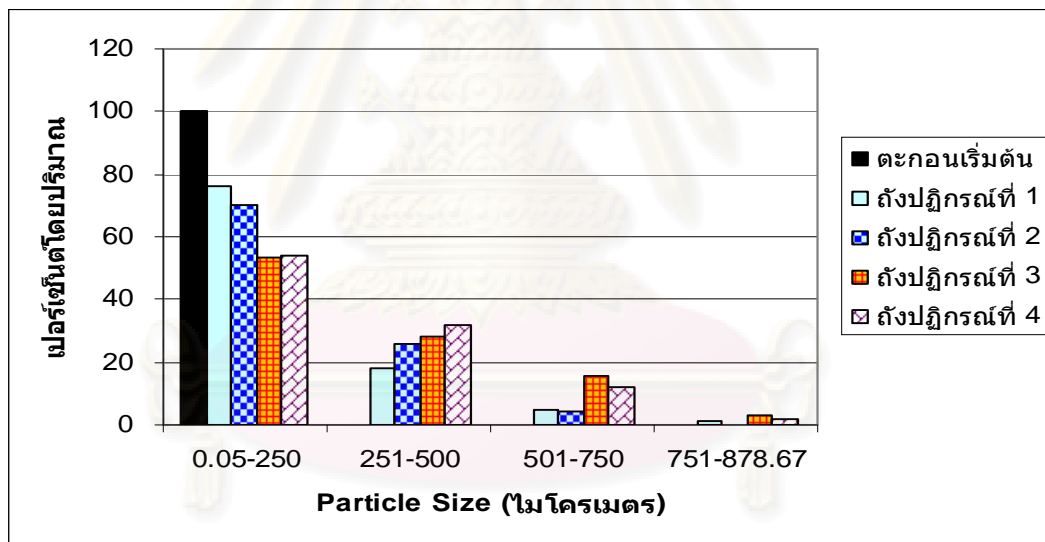


ข. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 68

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

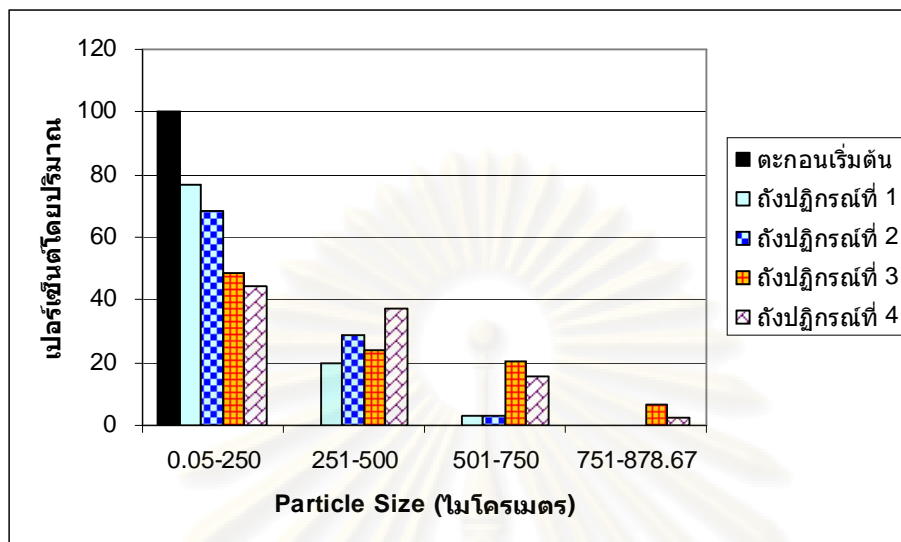


ค. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 101

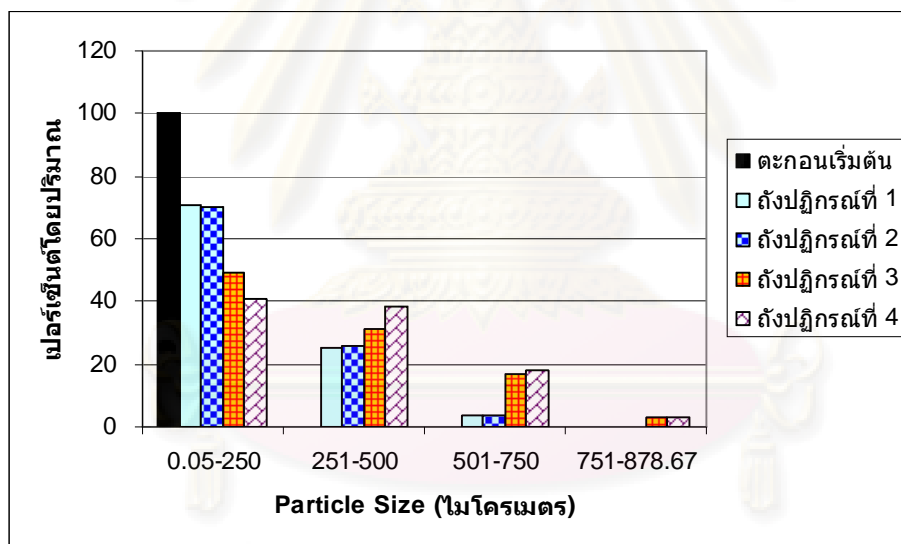


ง. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 131

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



๑. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 152



๒. การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนเมื่อวันที่ 173

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตลอดการทดลอง

หมายเหตุ

ถึงปฏิบัติการที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิบัติการที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิบัติการที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิบัติการที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยใช้ค่า D(0.5) ซึ่งเป็นค่าที่นิยมในการใช้เป็นตัวแทนของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุด จะเห็นได้ว่าในวันที่ 22 ของการทดลอง ถึงปฏิบัติการที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีค่า D(0.5) ที่สูงกว่าถึงปฏิบัติการอื่นอยู่มาก โดยมีขนาด D(0.5) ที่ 133.28 ไมโครเมตร เมื่อดำเนินการทดลองมาจนถึงวันที่ 68 ถึงปฏิบัติการที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) จึงมีขนาด D(0.5) ที่ใกล้เคียงกับถึงปฏิบัติการที่ 3 และพิจารณาการกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในวันเดียวกันนั้น (วันที่ 22 ของการทดลอง) รูปที่ 4.9 ก จะเห็นได้ว่าถึงปฏิบัติการที่ 3 มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ขนาด 251-500 ไมโครเมตร อยู่ 21.71% โดยปริมาณ ขณะที่ถึงปฏิบัติการอื่นๆมีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดในช่วง 251-500 ไมโครเมตร อยู่ไม่ถึง 7% ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ขนาด 501-750 ไมโครเมตร ถึงปฏิบัติการที่ 3 มีตะกอนจุลินทรีย์อยู่ 7.66% ขณะที่ถึงปฏิบัติการอื่นๆยังไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดอยู่ในช่วงนี้ และที่ขนาด 751-878.67 ไมโครเมตร ถึงปฏิบัติการที่ 3 มีตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 1.11% ขณะที่ถึงปฏิบัติการอื่นๆไม่มีตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในช่วงนี้ เช่นเดียวกัน

เมื่อดูจากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร หรือ 1 มิลลิเมตร ก็มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสมบูรณ์แล้ว นั่นแสดงว่าถึงปฏิบัติการที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีการพัฒนาของตะกอนจุลินทรีย์เกิดเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เร็วกว่าถึงปฏิบัติการอื่นถึง 22 วัน นั่นแสดงให้เห็นถึงผลของการเติม pulp powder ปริมาณ 400 มก./กรัม เอสเอส ร่วมกับการเติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส ที่ช่วยเร่งให้เกิดการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เร็วกว่าการเติม polymer เพียงอย่างเดียว และเร็วกว่า การเติม pulp powder ปริมาณ 600 และ 800 มก./กรัม เอสเอส ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก 2 มก./กรัม เอสเอส

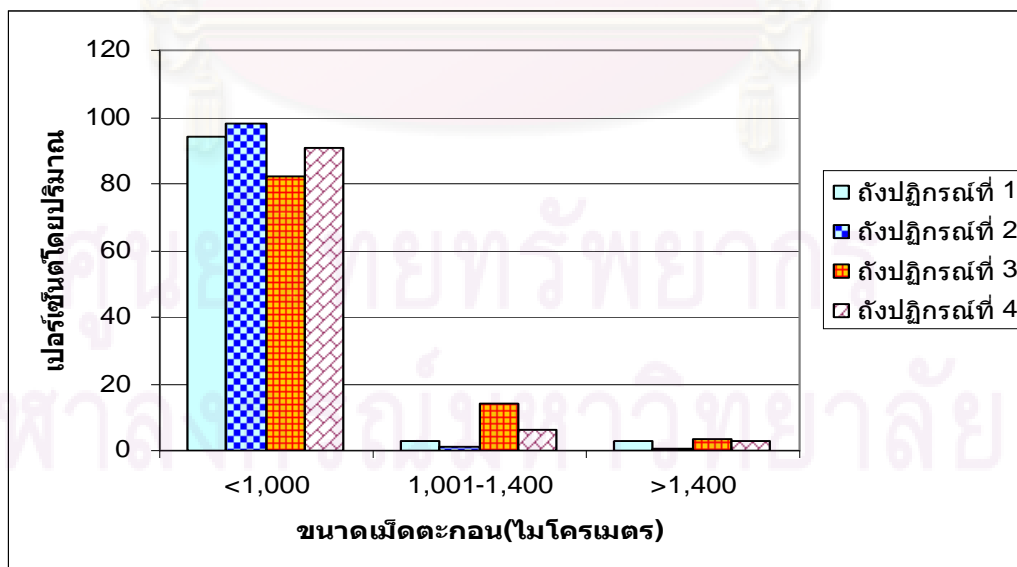
รูปที่ 4.9 สังกเกตได้ว่าเม็ดตะกอนส่วนใหญ่กว่า 40% อยู่ในช่วงขนาด 0.05-250 ไมโครเมตร และจะมีเปอร์เซ็นต์โดยปริมาณลดลงในช่วงขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นแล้วว่าเครื่อง Particle Size Analyzer สามารถวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ในช่วงความกว้างของเลนส์เท่านั้น โดยเลนส์ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องนี้สามารถวัดได้ในช่วง 0.05-878.67 ไมโครเมตร แต่จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าตะกอนจุลินทรีย์ในระบบน่าจะมีขนาดใหญ่กว่า 878.67 ไมโครเมตร ซึ่งเกินกว่าช่วงที่เครื่อง Particle Size Analyzer จะวัดได้ ในการวิเคราะห์ขนาดตะกอนที่ใหญ่กว่านี้จึงต้องทำด้วยวิธี sieve analysis



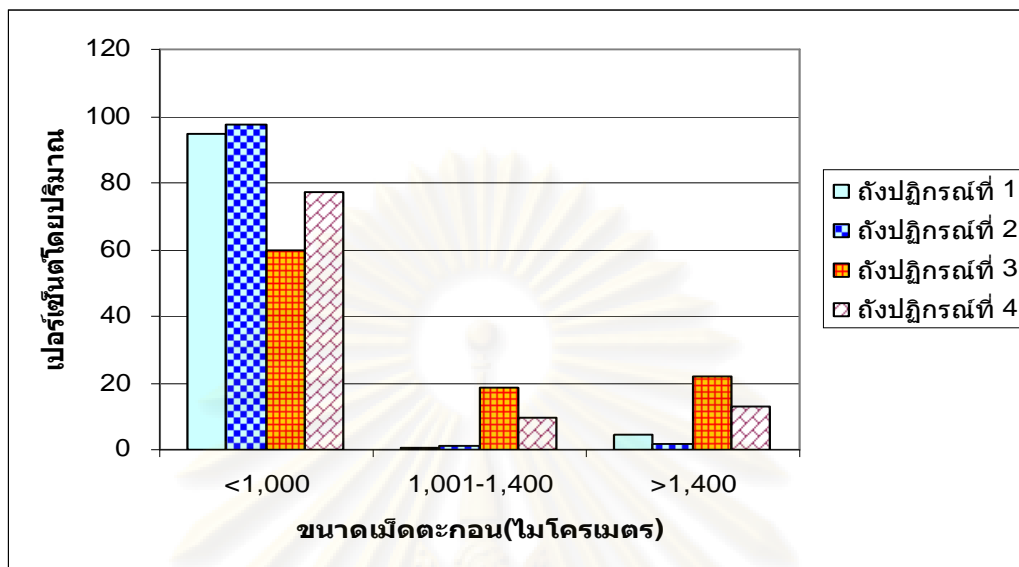
รูปที่ 4.10 ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร

2) การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี sieve analysis

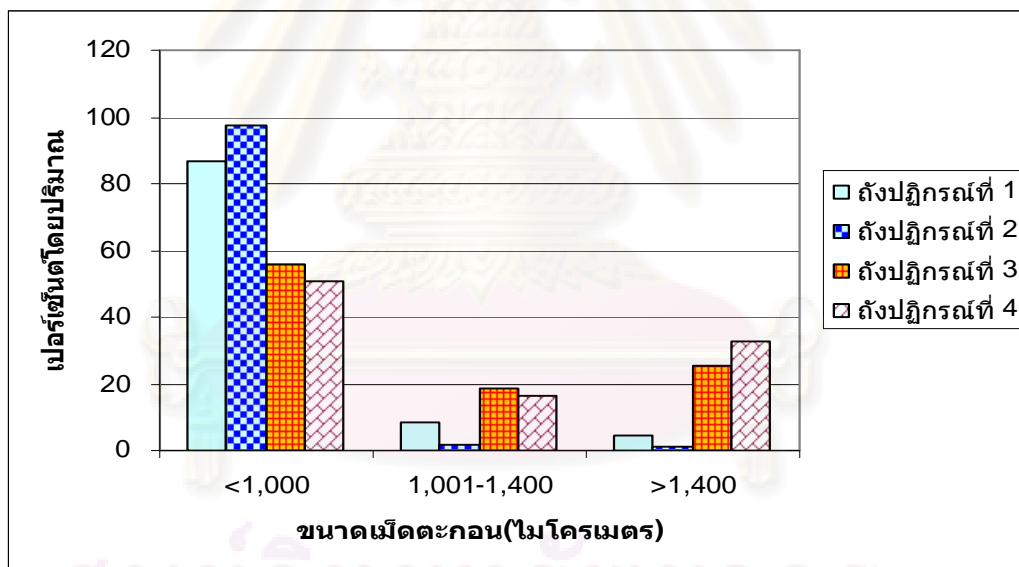
เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer มีข้อจำกัดในการวัดขนาดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 878.67 ไมโครเมตร ในการศึกษาขนาดเม็ดตะกอนจึงต้องทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี sieve analysis ร่วมด้วย โดยทำการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 2, 4 และ 6 กก.ซีไอดี/ ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11



ก.ขนาดเม็ดตะกอนหลังการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน



ข. ขนาดเม็ดตะกอนหลังการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน



ค. ขนาดเม็ดตะกอนหลังการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 6 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

รูปที่ 4.11 ขนาดเม็ดตะกอนหลังการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆกัน

หมายเหตุ

ถังปฏิบัติการที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิบัติการที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิบัติการที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิบัติการที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

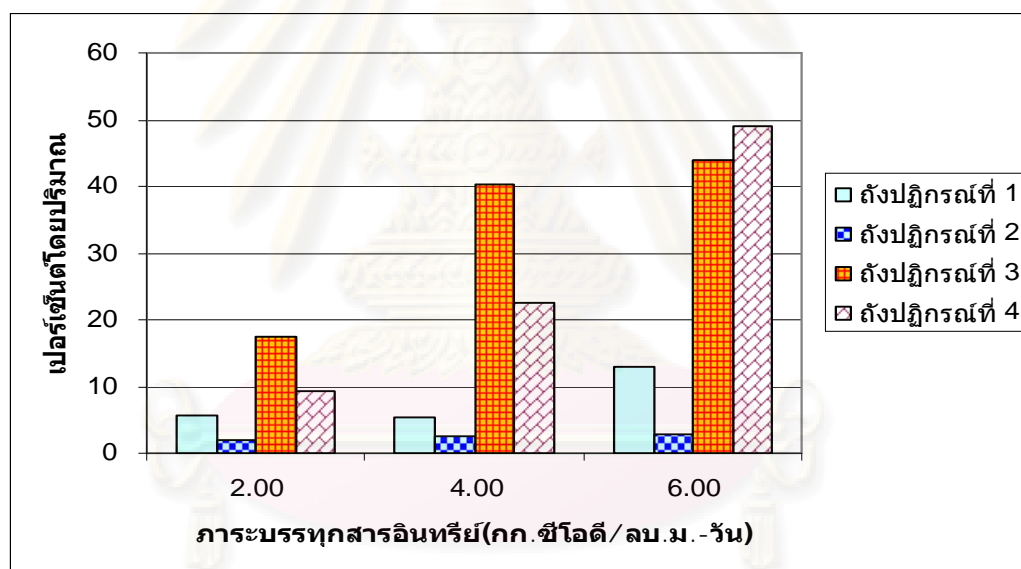
เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน หรือที่ระยะเวลา 68 วันของการทดลอง พบว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีการพัฒนาขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ดีกว่าถึงปฏิกรณ์อื่นอยู่มาก โดยมีปริมาณตะกอนขนาด 1,001-1,400 ไมโครเมตร สูงถึง 14.30% ขณะที่ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส), ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีปริมาณตะกอนขนาด 1,001-1,400 ไมโครเมตร อยู่ 2.73, 1.38 และ 6.17 ตามลำดับ ส่วนตะกอนขนาดใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร ยังพบในปริมาณน้อยกว่า 4% ในทุกถึงปฏิกรณ์

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน หรือที่ระยะเวลา 131 วันของการทดลอง ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ยังคงมีปริมาณเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ที่มากกว่าถึงปฏิกรณ์อื่นๆ โดยมีเม็ดตะกอนขนาด 1,001-1,400 ไมโครเมตร อยู่ 18.32% และเม็ดตะกอนขนาดใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร มีอยู่ 21.82% รองลงมาเป็นถึงปฏิกรณ์ที่ 4 มีเม็ดตะกอนขนาด 1,001-1,400 ไมโครเมตร อยู่ 9.68% และเม็ดตะกอนขนาดใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร มีอยู่ 12.95% ซึ่งถึงปฏิกรณ์ 3 และ 4 มีการพัฒนาขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ส่วนถึงปฏิกรณ์ 1 และ 2 มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์น้อยมาก โดยมีการปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดมากกว่า 1,400 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร โดยมีอยู่ในปริมาณมากกว่า 90%

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน หรือที่ระยะเวลา 173 วันของการทดลอง พบว่า ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 มีการพัฒนาขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์นำหน้าถึงปฏิกรณ์ที่ 3 โดยมีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดมากกว่า 1,400 ไมโครเมตร อยู่ 32.5% ส่วน ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณ 25.30% โดยถึงปฏิกรณ์ที่ 3 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับตอนสิ้นสุดทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ขณะที่ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่อย่างมาก เมื่อเทียบกับตอนสิ้นสุดทดลองที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 1 มีปริมาณเม็ดตะกอนขนาด 1,001-1,400 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 8.23% จาก 0.62% ส่วนเม็ดตะกอนขนาดใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร มีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และในถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ยังคงมีปริมาณตะกอนส่วนใหญ่ขนาดต่ำกว่า 1,000 ไมโครเมตร อยู่มากกว่า 90%

จากข้อมูลข้างต้นพบออกได้ว่า การเติม pulp powder ในปริมาณ 400 mg/g SS เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สามารถเร่งให้เกิดตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้นในช่วงเริ่มต้นเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 และ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งให้ผลดีว่าการเติม polymer เพียงอย่างเดียว แต่ในระยะยาวแล้วพบว่าการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก เพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เหมาะสมที่ 2 mg/g SS จะให้ผลดีกว่าในการพัฒนาของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ส่วนการเติม pulp powder ในปริมาณสูงถึง 600 และ 800 mg/g SS จะเป็นผลเสียต่อการพัฒนาของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ sieve analysis ที่ได้มาทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับปริมาณเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร แสดงผลในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนที่ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร

หมายเหตุ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

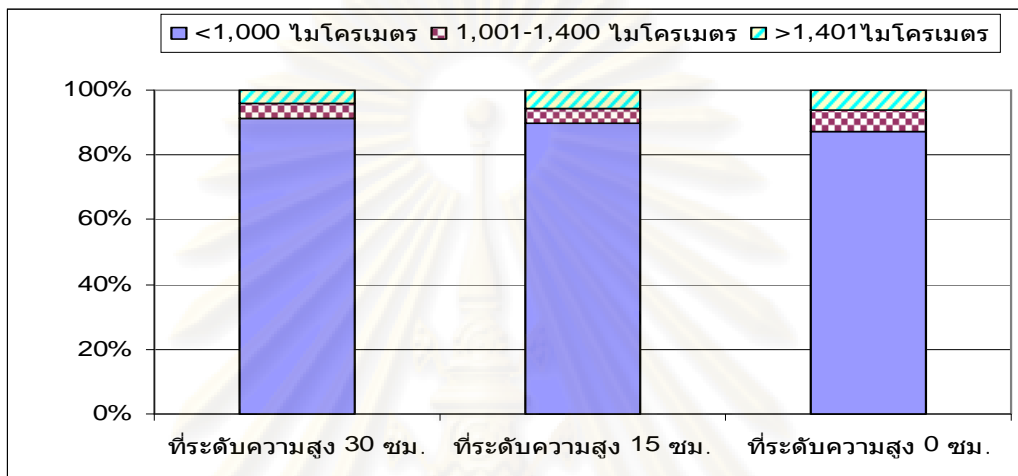
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

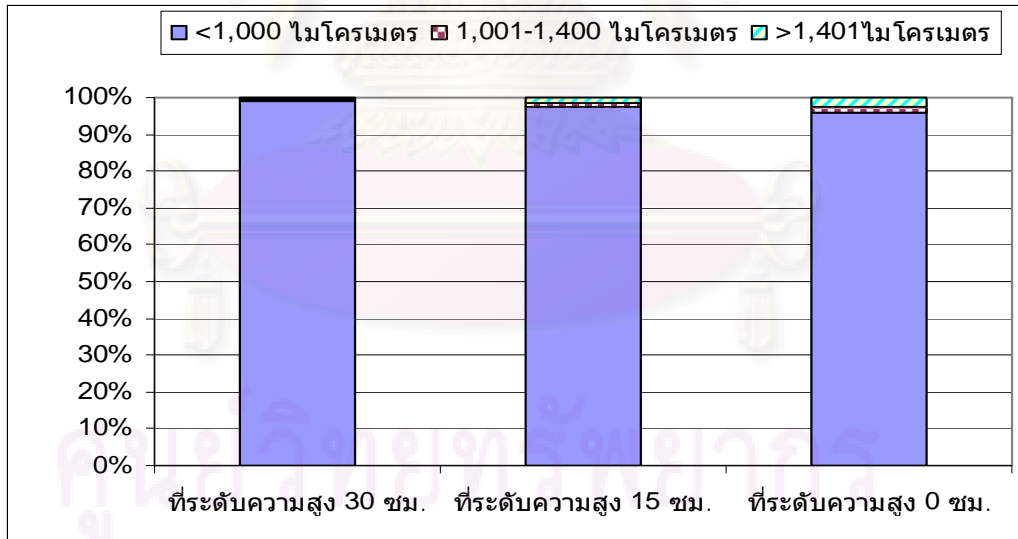
ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มภาวะบรรจุสารอินทรีย์มากขึ้น ในถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร จะมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าอัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hulshoff Pol (1983) ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน มี 3 ขั้นตอน คือ ช่วงที่หนึ่งตะกอนขนาดเบา จะหลุดออกจากระบบ ช่วงที่สอง ช่วงก่อตัวเป็นเม็ด และช่วงที่สามคือช่วงเพิ่มขนาดเม็ดตะกอน (สุรพี เบญจปัญญาวงศ์, 2549 อ้างถึงใน จีรพงษ์ อินทร์จวบ, 2537) ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) หลังสิ้นสุดการเดินระบบที่ภาวะบรรจุสารอินทรีย์ที่ 2 และ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ปริมาณเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยมีปริมาณเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร ประมาณ 5% แต่มีการเพิ่มปริมาณเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร เป็น 13.99% เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ที่ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) พบว่าปริมาณเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร มีปริมาณไม่ถึง 3% เมื่อเทียบกับปริมาณตะกอนทั้งหมด แม้ว่าจะมีการเพิ่มภาวะบรรจุสารอินทรีย์ขึ้น สาเหตุของการที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีการพัฒนาของเม็ดตะกอนช้ากว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) อย่างมาก ส่วนหนึ่งมาจากผลของการเติม pulp powder ในปริมาณที่มากเกินไป ส่วนสาเหตุอื่นๆอาจเนื่องมาจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอลมีปริมาณซัลเฟตและสารอินทรีย์ไนโตรเจนสูง อาจส่งผลให้มีการแข่งขันกันของแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงในระบบ ซึ่งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตขาดความสามารถในการเกาะตัวเป็นเม็ดตะกอน (จันทิมา สกุลพานิชย์, 2548 อ้างถึงใน Visser และคณะ, 1993) และหากโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีการพัฒนาที่ไม่สมบูรณ์ มีการจับตัวกันอย่างหลวมๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะบรรจุสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้มีความปั่นป่วนทางกลศาสตร์เพิ่มขึ้นในระบบเนื่องจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดการแตกสลายได้

4.4.2 การกระจายตัวของขนาดเม็ดตะกอนจลนทรีย์ตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์
 การกระจายตัวของขนาดเม็ดตะกอนจลนทรีย์ตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์
 วิเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 173 วัน แสดงผลในรูปที่ 4.13

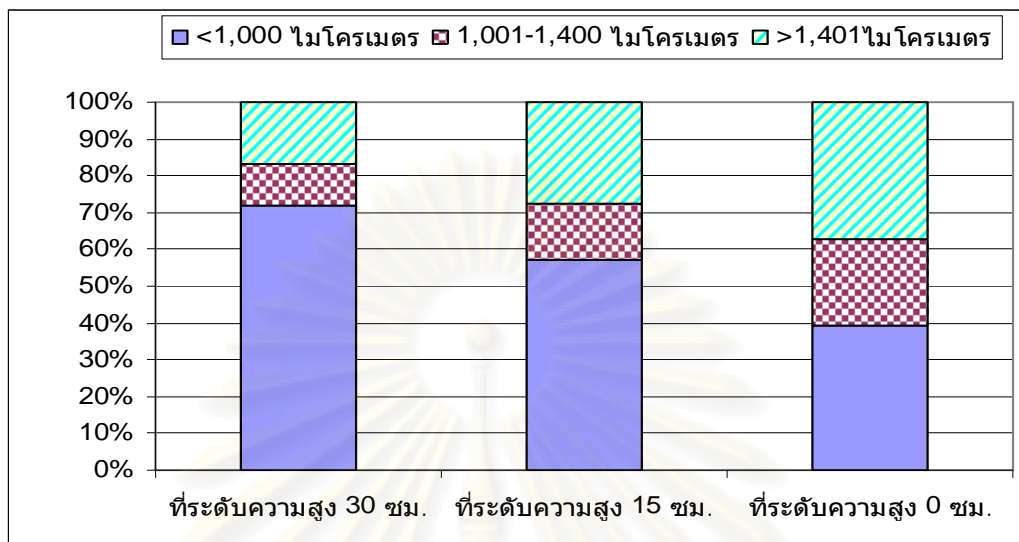


ก.ขนาดเม็ดตะกอนตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ที่ 1

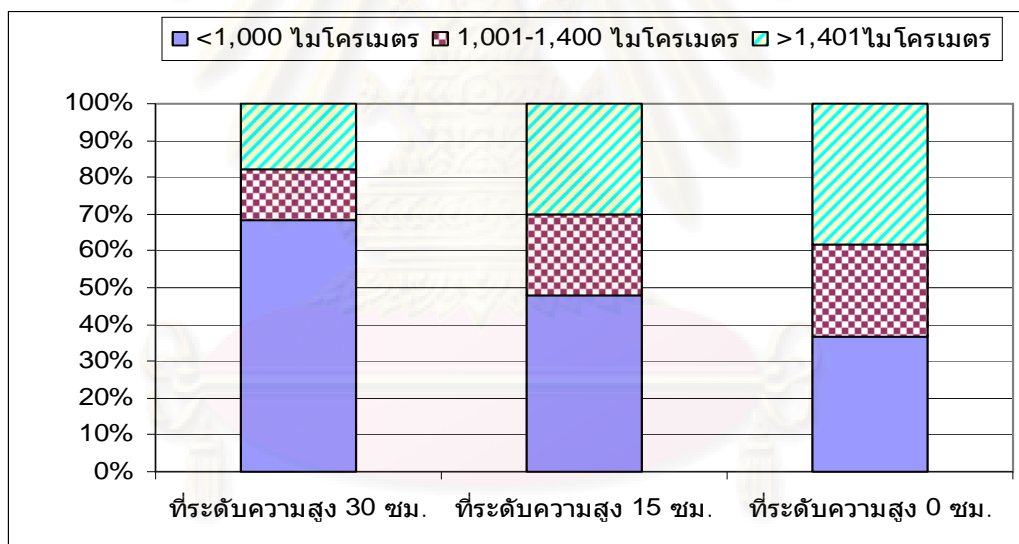


ข.ขนาดเม็ดตะกอนตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค.ขนาดเม็ดตะกอนตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ที่ 3



ง.ขนาดเม็ดตะกอนตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ที่ 4

รูปที่ 4.13 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุดินทรีย์ตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์

หมายเหตุ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

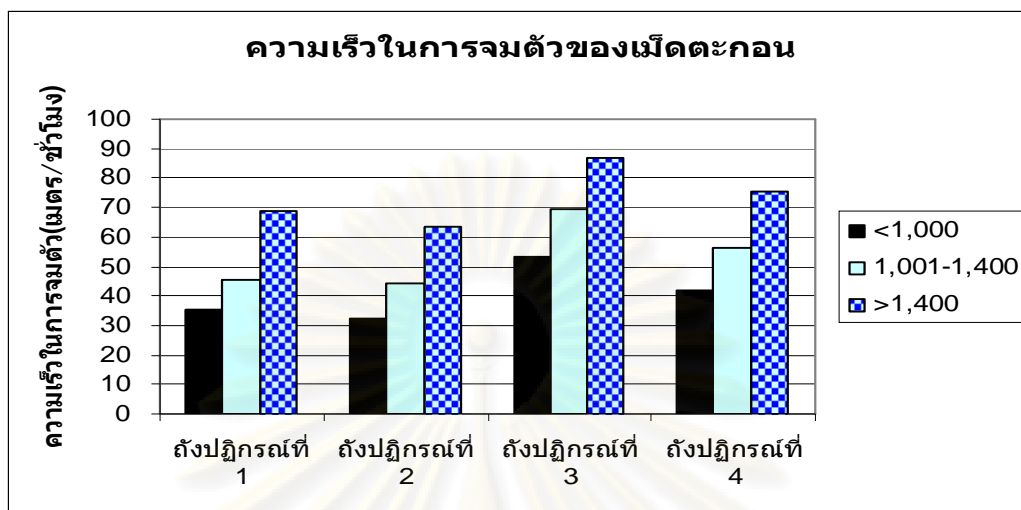
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จากรูปที่ 4.13 แสดงขนาดตะกอนจูลินทรีย์แยกตามระดับความสูงของส่วนย่อยสลายของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ที่ระดับ 30, 15 และ 0 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าในทุกถังปฏิกรณ์การกระจายตัวของตะกอนจูลินทรีย์จะมีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันคือ ตะกอนขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร จะกระจายตัวในปริมาณมากที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นจากก้นถังปฏิกรณ์ และกระจายตัวน้อยลงที่ระดับความสูงต่ำลงมา ส่วนตะกอนขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร จะกระจายตัวในปริมาณมากที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ และค่อยๆกระจายตัวน้อยลงในระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนขนาดเล็กจะมีน้ำหนักเบาความเร็วในการจมตัวน้อยกว่าตะกอนขนาดใหญ่ ทำให้ตะกอนขนาดเบาแยกตัวด้วยความเร็วของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ความเร็วในการจมตัวมากกว่าจึงอยู่ในส่วนล่างของถังปฏิกรณ์

4.4.3. ความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจูลินทรีย์

ผลการทดลองความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนในถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ถัง เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 173 วัน แสดงผลในรูปที่ 4.14 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจูลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเรื่องการกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจูลินทรีย์ตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ ที่พบว่าเม็ดตะกอนขนาดใหญ่จะมีการกระจายตัวหนาแน่นบริเวณก้นถังปฏิกรณ์ และเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กจะกระจายตัวหนาแน่นในระดับความสูงจากก้นถังปฏิกรณ์ที่มากกว่า เนื่องจากเม็ดตะกอนขนาดใหญ่มีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าจะสามารถต้านทานแรงจากความเร็วในการไหลขึ้นของน้ำเสียได้ดีกว่า ทำให้เม็ดตะกอนขนาดใหญ่กว่าจะอยู่บริเวณก้นถังปฏิกรณ์มาก



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนแต่ละขนาด

หมายเหตุ

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

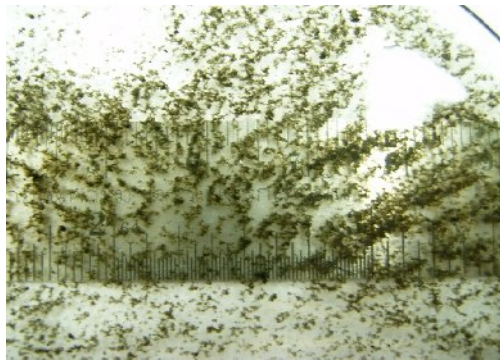
ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

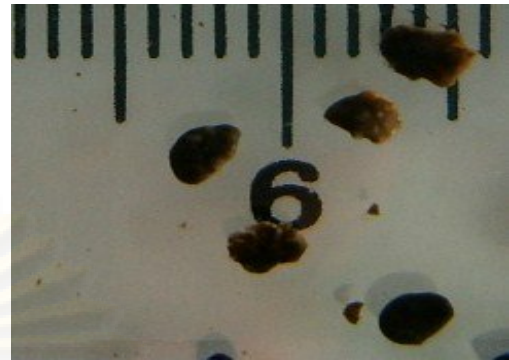
4.4.4 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลอง

เมื่อนำตะกอนจุลินทรีย์หลังสิ้นสุดการทดลองมาแยกขนาดด้วยวิธี sieve analyzer และถ่ายรูปดูลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าตะกอนที่ได้จากทุกถึงปฏิกรณ์มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ มีรูปทรงใกล้เคียงทรงกลมแต่ไม่สมมาตร เม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีสีดำ เม็ดตะกอนขนาดใหญ่สามารถแตกและหลุดออกเป็นเศษเล็กๆได้หากมีการเสียดสีหรือถูกระแทก โดยตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร ที่พบในการทดลองนี้ มีขนาดอยู่ในช่วง 2,000 - 3,000 ไมโครเมตร เป็นส่วนใหญ่ โดยบางเม็ดพบว่ามีความยาวถึง 6,000 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.15 ข ซึ่งพบในถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ส่วนรูปที่ 4.15 ก แสดงลักษณะตะกอนเริ่มต้นที่ใช้ในงานทดลองนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



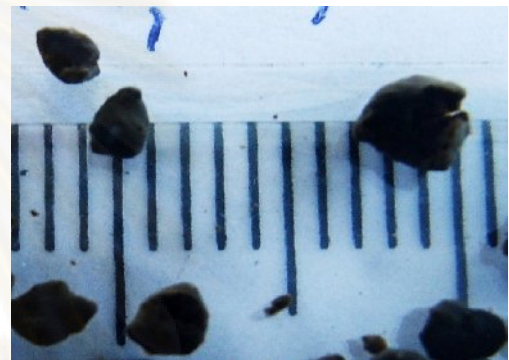
ก



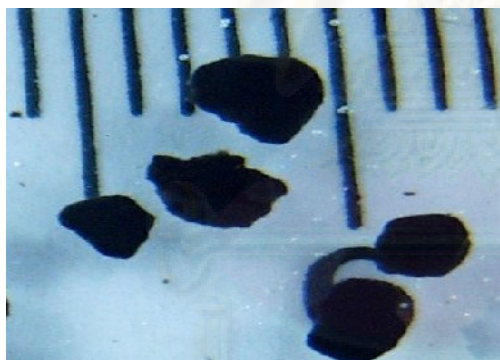
ข



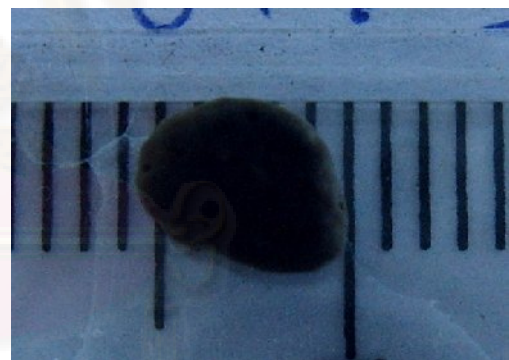
ค



ง



จ



ฉ

รูปที่ 4.15 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

ก) ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

ข) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ 1

ค) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ 2

ง) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ 3

จ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ 4

ฉ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่พบในการทดลองนี้

หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างเส้นในรูปบอกความยาวเป็น 1 มิลลิเมตร หรือ 1,000 ไมโครเมตร

4.4.5 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของกลุ่มแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลองไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning Electron Microscope; SEM) ตัวอย่างที่ทดลองเป็นตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบ และตะกอนจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดจากถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ถัง เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2, 4 และ 6 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน

1) โครงสร้างภายนอก

ลักษณะภายนอกของตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบจะมีลักษณะเป็น floc (flocculent sludge) เป็นส่วนใหญ่ และพบลักษณะของการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์บ้างในปริมาณที่น้อยมากๆ จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 4.16 เมื่อส่องดูด้วยกำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่มากและมีแบคทีเรียลักษณะกลมอยู่เล็กน้อย

รูปที่ 4.17 – รูปที่ 4.20 เป็นรูปตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ถัง เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อัตราบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2, 4 และ 6 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ตามลำดับ เมื่อสังเกตลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากแต่ละการทดลองพบว่ามีรูปร่างที่หลากหลายและแตกต่างกันมาก บางเม็ดกลมค่อนข้างสมมาตร บางเม็ดกลมรี บางเม็ดค่อนข้างแบน พื้นผิวไม่เสมอกันตามรูปร่างแต่จะมีบางจุดนูนขึ้นบางจุดยุบตัวต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าต่ำประมาณ 0.17 เมตร/ชั่วโมง ความปั่นป่วนที่เกิดจากการไหลขึ้นของน้ำเสียน้อยนี้ ส่งผลให้การเคลื่อนตัวกระทบกันและการเสียดสีระหว่างเม็ดตะกอนน้อยตามไปด้วย และอาจมีการไหลลัด (Short Circuit) ของน้ำเสียเกิดขึ้น ลักษณะตะกอนที่ได้จึงมีรูปร่างแตกต่างกันมากและไม่ค่อยเป็นทรงกลม

ลักษณะพื้นผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่ามีแบคทีเรียหลายชนิดอาศัยอยู่ร่วมกัน พบแบคทีเรียรูปร่างแบบเส้นใย แบบกลม และแบบแท่ง ในทุกการทดลองและทุกถังปฏิกรณ์ แบคทีเรียที่พบที่ผิวภายนอกจะเป็นแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) ที่มีความหลากหลายเนื่องมาจากการแข่งขันในการแย่งอาหารสูงเพราะเป็นสัมผัสกับสารอาหารในน้ำเสียโดยตรง (จันทิมา สกุลพานิชย์, 2548 อ้างใน Fang และคณะ, 1994) โดยอาศัยการยึดเกาะด้วยแบคทีเรียที่เป็นเส้นใย ทำให้สามารถรวมกันเป็นเม็ดได้ ซึ่งการรวมกันโดยอาศัยการเกาะด้วยแบคทีเรียที่เป็นเส้นใยทำให้โครงสร้างของแบคทีเรียมีความแข็งแรง

ขึ้น จึงสามารถทนอยู่ในระบบที่มีแรงเฉือนหรือความปั่นป่วนภายในระบบได้ ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวชั้นนอกน้อย

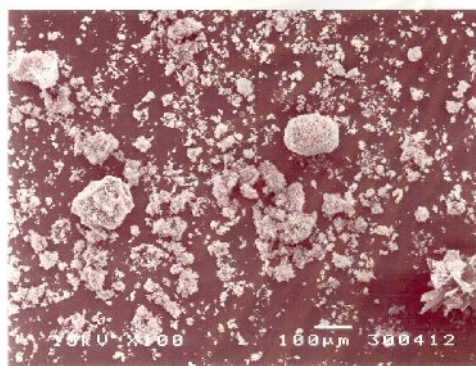
จากรูปที่ 4.17 – รูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างของชนิดและปริมาณแบคทีเรียที่พื้นผิวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในแต่ละอัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2 - 6 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ในทุกถังปฏิกริยาจะสังเกตเห็นแบคทีเรียชนิดกลมและชนิดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มภาวะบรรทุksารอินทรีย์ และสังเกตเห็นแบคทีเรียชนิดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-5 ไมโครเมตร มีปริมาณน้อยลงเมื่อภาวะบรรทุksารอินทรีย์สูงขึ้น และสังเกตไม่พบอีกเลยที่ภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 6 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ในตัวอย่างจากถังปฏิกริยาที่ 3 และ 4 ส่วนถังปฏิกริยาที่ 1 และ 2 พบบ้างในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนแบคทีเรียชนิดกลมและชนิดแท่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงว่ามีการคัดเลือกทางธรรมชาติของชนิดแบคทีเรียในระบบ โดยแบคทีเรียที่ปรับตัวไม่ได้ก็จะมีปริมาณน้อยลงและหายไปในที่สุด ตรงข้ามกับแบคทีเรียที่สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมในระบบจะสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้และเพิ่มปริมาณมากขึ้น

2) โครงสร้างภายใน

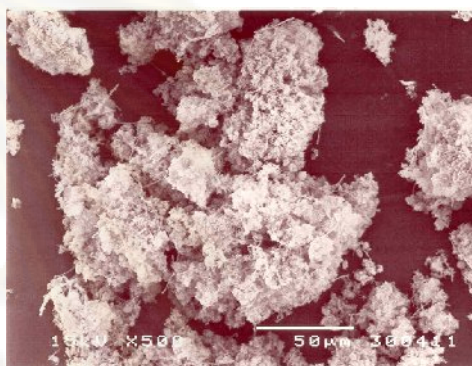
การศึกษาโครงสร้างภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต้องผ่าครึ่งเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เพื่อศึกษาโครงสร้างภายใน ตัวอย่างจากถังปฏิกริยาที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกริยาที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) ในช่วงการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2 และ 4 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ไม่สามารถผ่าเม็ดตะกอนเพื่อดูภายในได้ เนื่องจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดเล็กเกินไป แต่ที่อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 6 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ถังปฏิกริยาที่ 1 และ 2 สามารถผ่าเม็ดตะกอนได้ ส่วนถังปฏิกริยาที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกริยาที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) สามารถผ่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ตั้งแต่ที่อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ 2 กิโลกรัม ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน โดยขนาดเม็ดตะกอนที่แตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกริยาเป็นผลมาจากปริมาณการเติม pulp powder ที่แตกต่างกัน

ในงานทดลองนี้พบว่ามีการแบ่งชั้นของแบคทีเรียเกิดขึ้นภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ตามรูปที่ 4.17 – รูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าบริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะพบแบคทีเรียที่หลากหลายน้อยกว่าบริเวณผิว และพบแบคทีเรียชนิดเดียวกันอยู่รวมกลุ่มกันเป็นจำนวนมากและสังเกตไม่พบแบคทีเรียชนิดเส้นใยบริเวณตรงกลางภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

เลย แแบคทีเรียที่พบในบริเวณแกนกลางนี้จะเป็นแบคทีเรียชนิดท่อนสั้นขนาดยาวประมาณ 2 ไมโครเมตร จากตัวอย่างเม็ดตะกอนในถังปฏิกริยาที่ 1,3 และ 4 และพบแบคทีเรียชนิดกลมขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร จากตัวอย่างเม็ดตะกอนในถังปฏิกริยาที่ 2 ซึ่งแบคทีเรียที่อยู่บริเวณชั้นในของเม็ดตะกอนนี้ส่วนใหญ่เป็น *Methanoseata* spp. ทั้งนี้เพราะ กรดอะซิติกที่ถูกผลิตขึ้นจากแบคทีเรียสร้างกรดที่ผิวนอกเม็ดตะกอนจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Guiot และคณะ, 1992)



ก



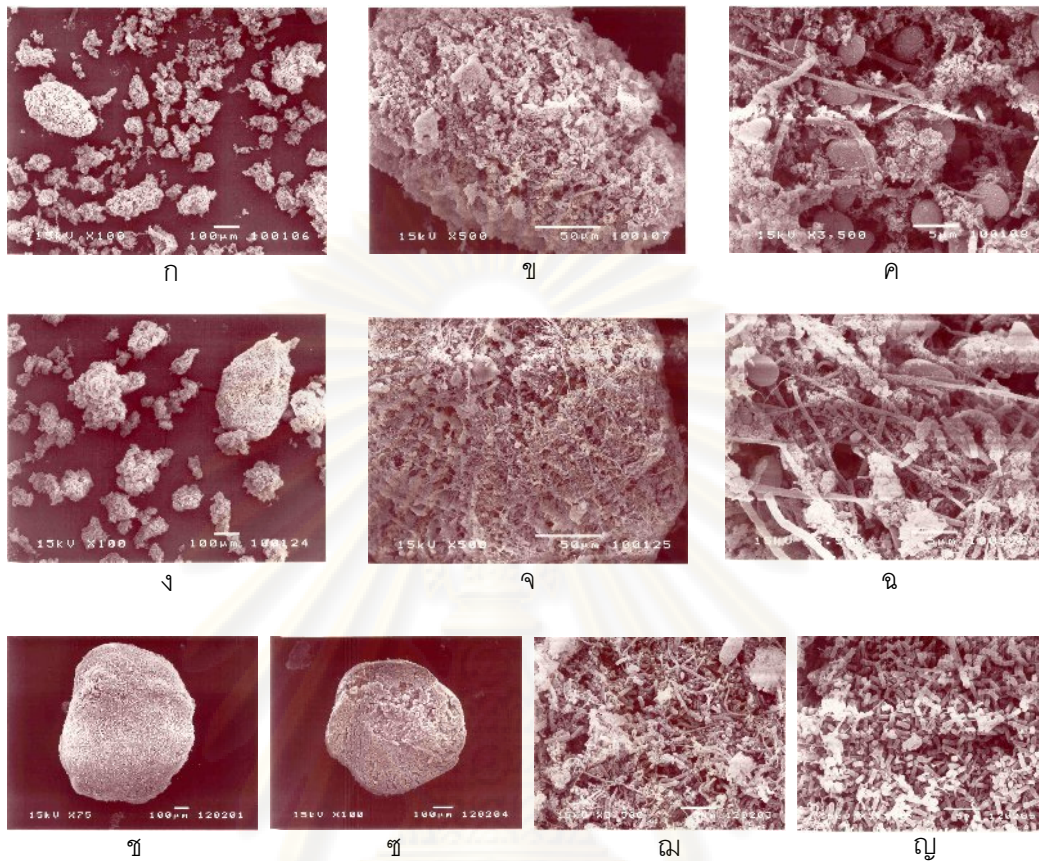
ข



ค

รูปที่ 4.16 ตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบ
หมายเหตุ

- ก. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ กำลังขยาย 100 เท่า
- ข. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ กำลังขยาย 500 เท่า
- ค. ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ กำลังขยาย 3,500 เท่า



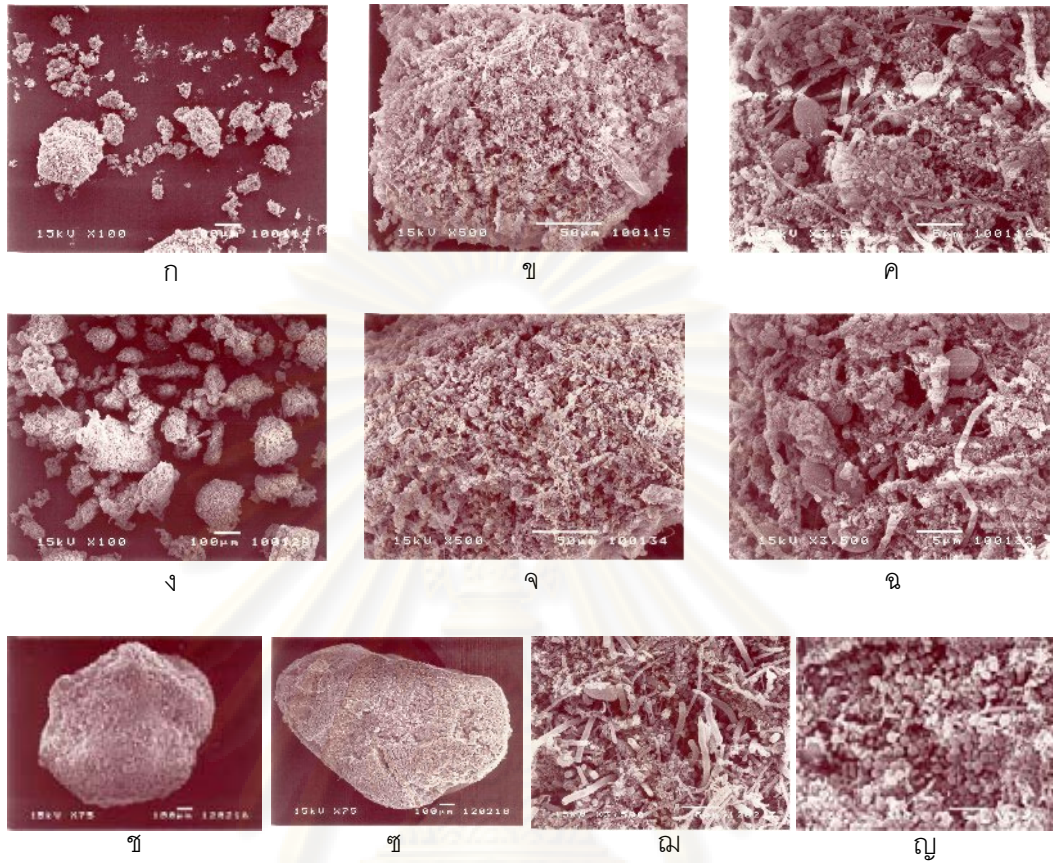
รูปที่ 4.17 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังปฏิกรณ์ที่ 1 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- ก) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- ข) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 500 เท่า
- ค) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ง) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- จ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 500 เท่า
- ฉ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ช) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 75 เท่า
- ซ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
- ฅ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ญ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า

หมายเหตุ : ก, ข, ค คือช่วงการเดินระบบที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ง, จ, ฉ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ช,ซ,ฅ,ญ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน



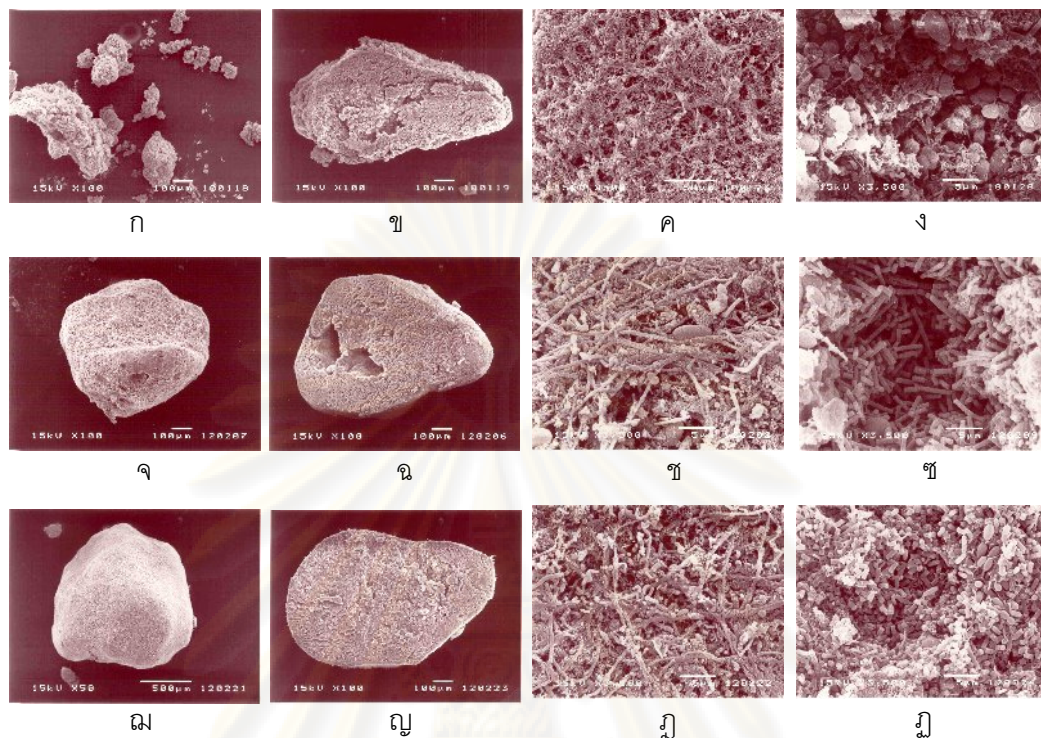
รูปที่ 4.18 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- ก) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- ข) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 500 เท่า
- ค) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ง) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- จ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 500 เท่า
- ฉ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ฐ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 75 เท่า
- ฑ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 75 เท่า
- ฒ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ณ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า

หมายเหตุ : ก, ข, ค คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ง, จ, ฉ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ข, ฐ, ฒ, ณ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



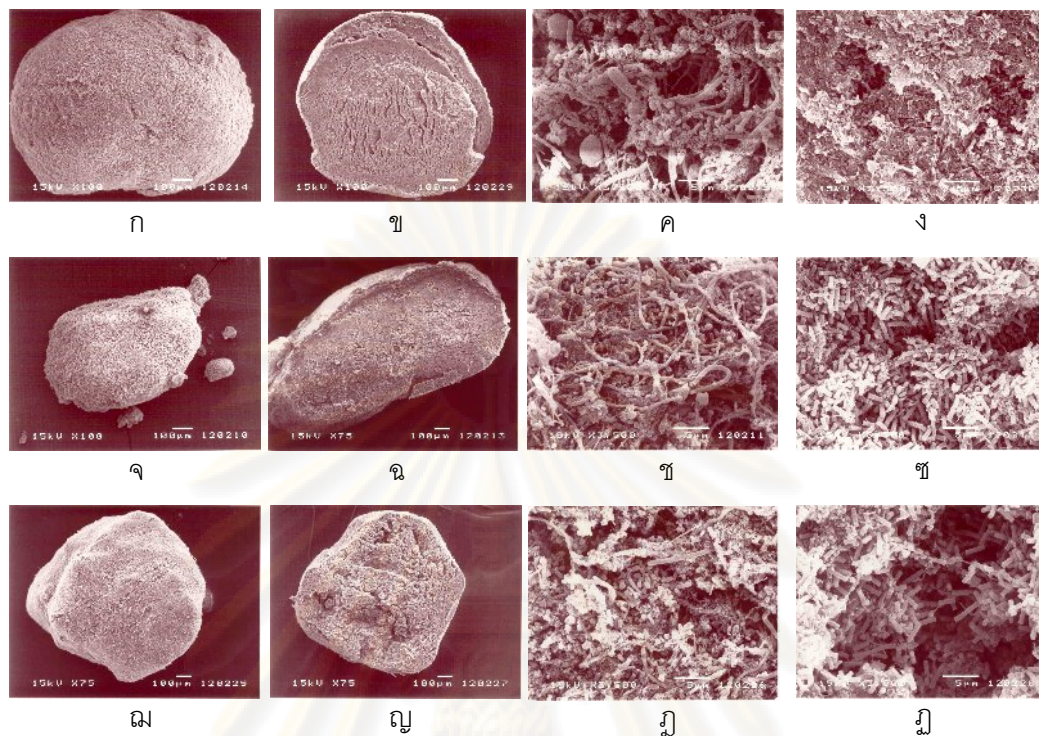
รูปที่ 4.19 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- ก) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- ข) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
- ค) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 500 เท่า
- ง) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- จ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- ฉ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
- ช) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ซ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ฅ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
- ญ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
- ฎ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
- ฏ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า

หมายเหตุ : ก,ข,ค,ง คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

จ,ฉ,ช,ซ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ฅ,ญ,ฎ,ฏ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน



รูปที่ 4.20 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- ก) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
 ข) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
 ค) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
 ง) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
 จ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 100 เท่า
 ฉ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 100 เท่า
 ช) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
 ซ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
 ณ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 75 เท่า
 ญ) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ผ่าครึ่งกำลังขยาย 75 เท่า
 ฎ) ผิวด้านนอกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า
 ฏ) บริเวณตรงกลางเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กำลังขยาย 3,500 เท่า

หมายเหตุ : ก,ข,ค,ง คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

จ,ฉ,ช,ซ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ณ,ญ,ฎ,ฏ คือช่วงการเดินระบบที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

4.4.6 เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน

ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเพียงครั้งเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 2, 4 และ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 68, 131 และ 173 ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Model Trace GC ยี่ห้อ Thermo Finigan ใช้ Columen Molecular Sieve แสดงผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน

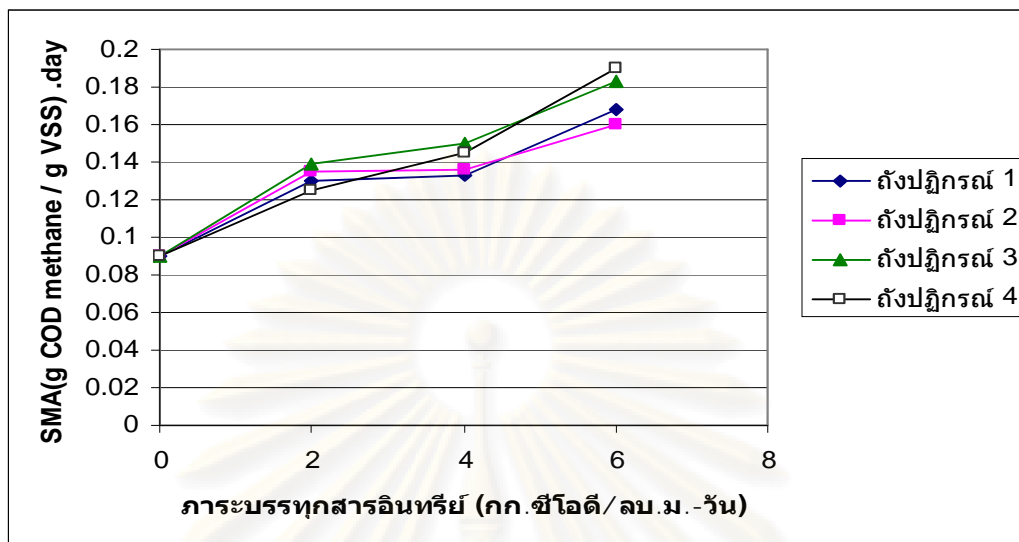
ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
2	73.0	76.9	78.4	78.8
4	64.7	79.3	80.3	80.0
6	86.6	87.5	86.9	90.0 ***

***หมายเหตุ ค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในช่วงระหว่างการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์

4.4.7.ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน

ศึกษาถึงความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity ; SMA) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ โดยเป็นการศึกษาถึงความสามารถของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบว่า มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากน้อยเพียงใด โดยดูจากอัตราการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งแบคทีเรียที่มีอัตราการสร้างก๊าซมีเทนสูง จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง

โดยเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูง 0, 15, 30 เซนติเมตร ในปริมาณที่เท่ากันแล้วนำมารวมกันเพื่อเป็นตัวแทนของตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ โดยทำการหาค่า SMA ของตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ และหลังจากทดลองในแต่ละช่วงที่ระบบรับภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แสดงวิธีการหาค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.21 แสดงค่า SMA ของถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 ตลอดการทดลอง

หมายเหตุ

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

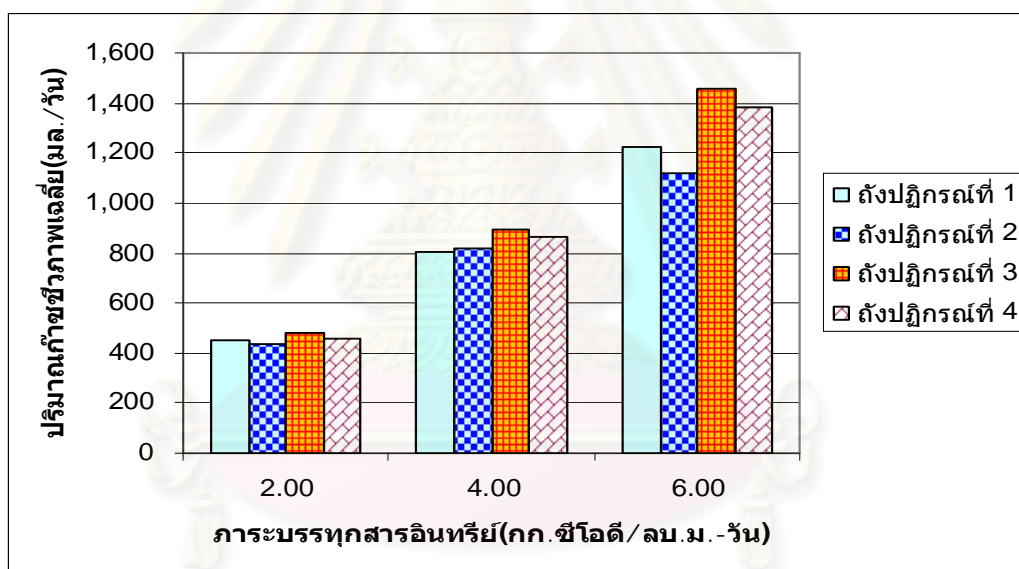
ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่า SMA ของแต่ละถึงปฏิกรณ์เทียบกับตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นมีค่า SMA ต่ำ แสดงว่าตะกอนที่นำมาจากระบบยูเอเอสบีของโรงงานผลิตเอทานอลในจังหวัดนครปฐมมีความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนน้อย ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีในช่วงแรกของการเดินระบบที่มีค่าน้อยเช่นเดียวกัน หลังจากทำการเดินระบบได้ระยะเวลาหนึ่ง พบว่าจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมในน้ำเสียได้ ทำให้จุลินทรีย์มีค่าความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์สูงขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกถึงปฏิกรณ์เมื่อทำการเพิ่มอัตราภาระบำบัดทูลสารอินทรีย์

4.4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.22 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระบำบัดทูลสารอินทรีย์ ระบบจะผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมากขึ้น ทำให้แบคทีเรียในระบบเปลี่ยนสารอินทรีย์

ไปเป็นก๊าซชีวภาพในปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดในถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 จะมีปริมาณมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 โดยถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 ผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ยตลอดการทดลองที่ 937 และ 894.67 มิลลิลิตร/วัน ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ผลิตได้ 815.67 และ 786 มิลลิลิตร/วัน ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดน้อยกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเติม pulp powder ในปริมาณที่แตกต่างกันในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ที่มีผลต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ โดยปกติตะกอนจุลินทรีย์ส่วนที่ไม่เป็นเม็ดจะมีน้ำหนักเบาและหลุดออกจากระบบได้ง่ายกว่าตะกอนเม็ด เป็นผลให้เกิดการชะล้างแบคทีเรียสร้างมีเทนออกจากระบบได้ง่ายส่งผลให้ระบบที่มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มากกว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณที่มากกว่า



รูปที่ 4.22 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์

หมายเหตุ

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

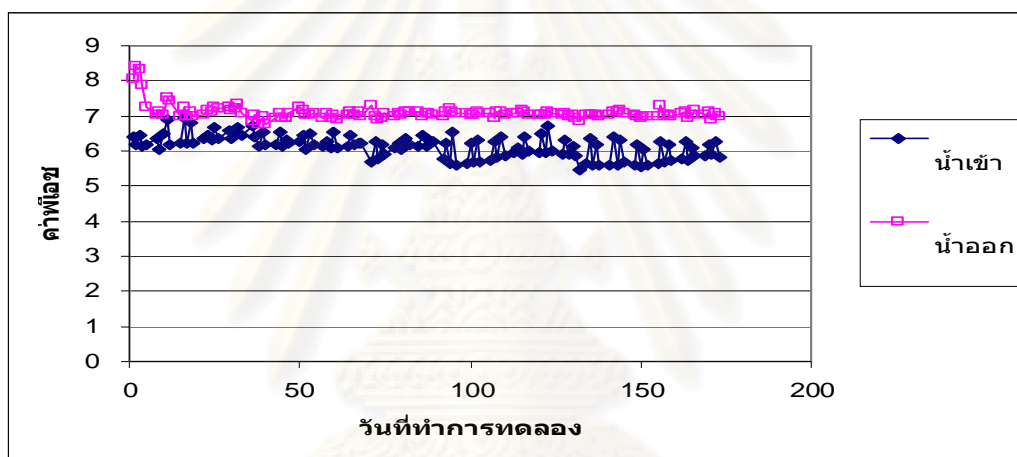
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

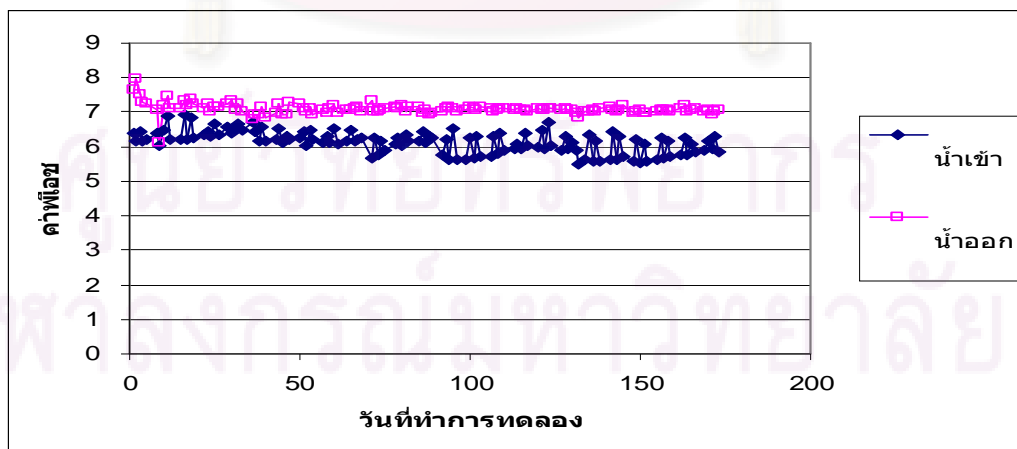
4.5 สภาพแวดล้อมของการเดินระบบและประสิทธิภาพของระบบ

4.5.1 พีเอช

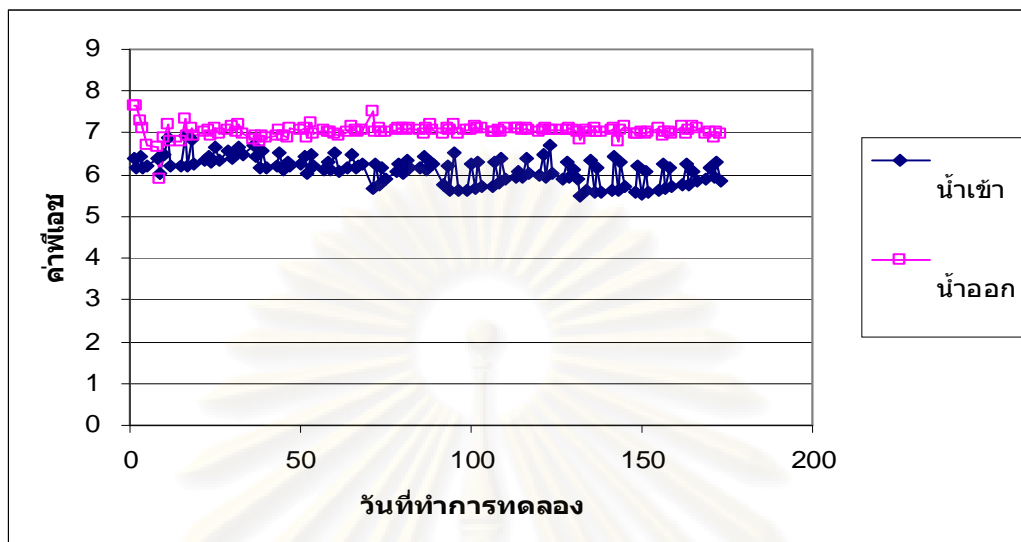
ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเอทานอลมาเจือจางให้มีความเข้มข้นค่าซีโอดีตามต้องการโดยไม่ได้ปรับค่าพีเอชแต่อย่างใด โดยจะเตรียมน้ำเสียในถังขนาดใหญ่ถึงเดียว แล้วจึงแบ่งน้ำเสียนลงในถังน้ำเข้า ซึ่งมีทั้งหมด 4 ถัง ตามจำนวนถังปฏิกรณ์ แสดงข้อมูลค่าพีเอชตลอดการทดลองในรูปที่ 4.23



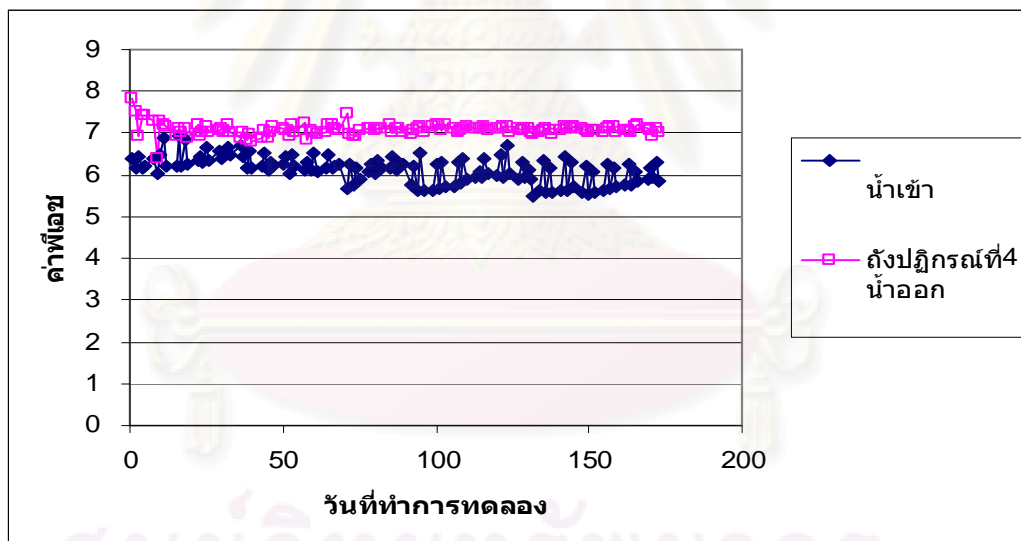
ก. ค่าพีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ข. ค่าพีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ด. ค่าพีเอสตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ง. ค่าพีเอสตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

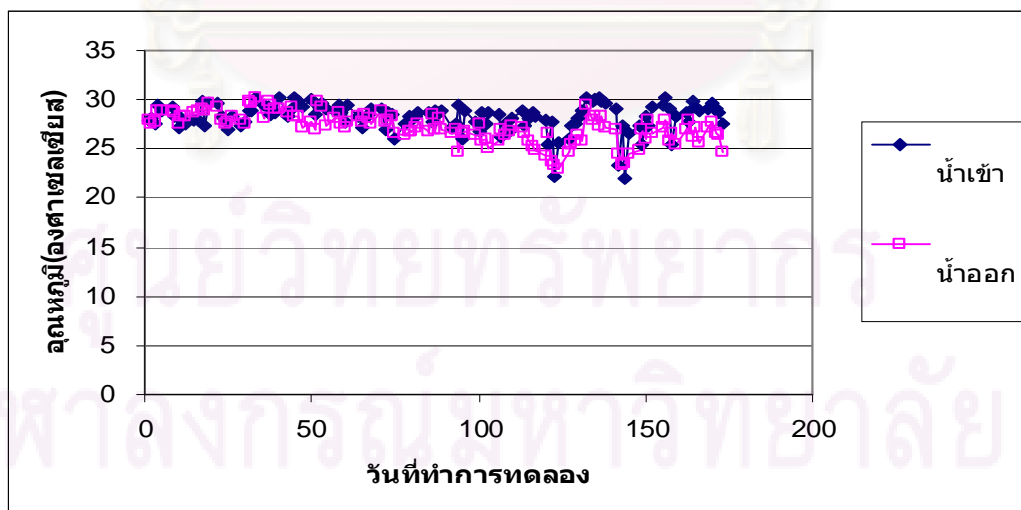
รูปที่ 4.23 ค่าพีเอสของน้ำเสียที่เข้าและน้ำออกจากระบบของทุกถังปฏิกรณ์

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของพีเอสของน้ำเข้าระบบมีค่าลดต่ำลงทุกครั้งที่มีการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เนื่องจากใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเอทานอลซึ่งมีค่าพีเอสต่ำอยู่แล้ว เมื่อเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเจือจาง

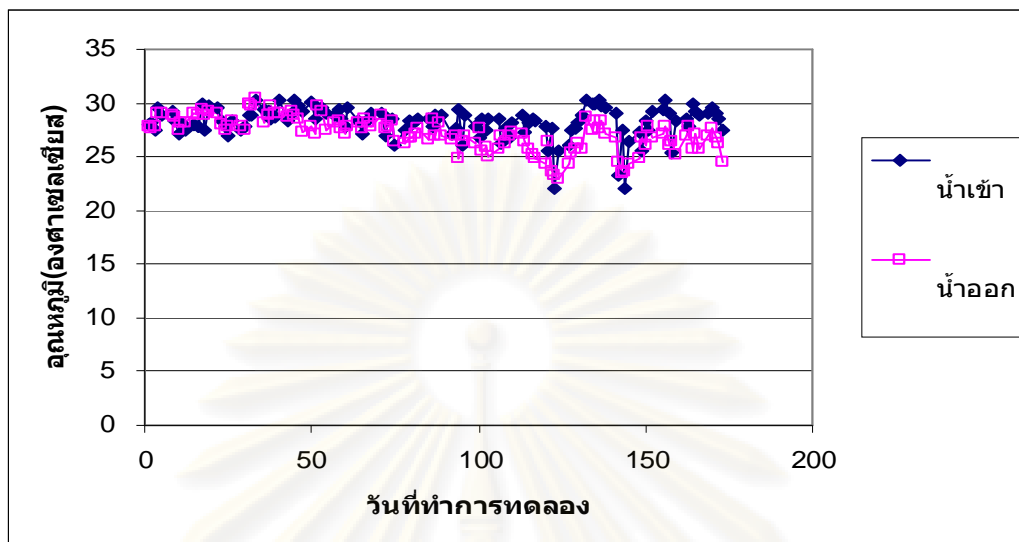
น้ำน้อยลงเป็นผลให้ค่าพีเอชต่ำลงด้วย โดยค่าเฉลี่ยพีเอชน้ำเข้าตลอดการทดลองอยู่ที่ 6.14 ซึ่งอยู่ในช่วงต่ำกว่าระดับพีเอชที่เหมาะสมกับการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนที่ 6.5-8.2 แต่เมื่อพิจารณาค่าพีเอชน้ำออกเฉลี่ยตลอดการทดลองของถังปฏิกริยาที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่า 7.10, 7.09, 7.04, 7.08 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมกับการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทน และการที่พีเอชมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าระบบสามารถปรับเข้าสู่สมดุลได้เองโดยไม่ต้องทำการปรับค่าพีเอชน้ำเข้าระบบ แม้ว่าพีเอชของน้ำเข้าระบบจะอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนก็ตาม ระบบก็ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดทุกถังปฏิกริยาพบว่ามีความน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่สูงพอ

4.5.2 อุณหภูมิ

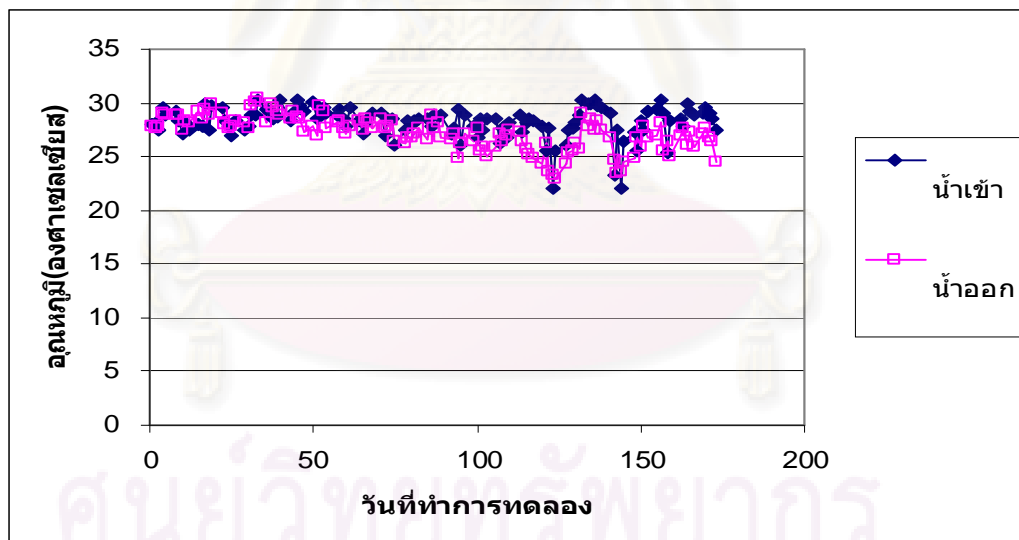
การทดลองนี้ทั้ง 4 ถังปฏิกริยา ตั้งอยู่บริเวณที่เดียวกัน โดยทำการติดตั้งที่ชั้น 1 ตึกวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าอุณหภูมิน้ำออกของทั้ง 4 ถังปฏิกริยา จึงมีค่าไม่แตกต่างกันมาก แสดงผลในรูปที่ 4.24 โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลองของน้ำเข้าระบบอยู่ที่ 28.2 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำออกจากระบบอยู่ที่ประมาณ 27.2 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ อยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) อุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตลอดการทดลองนี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบ



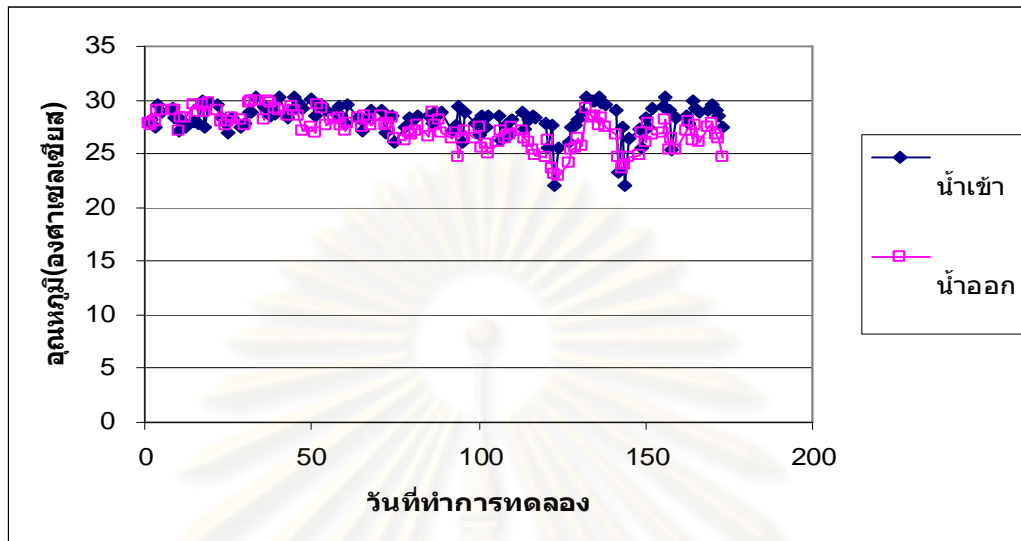
ก. อุณหภูมิตลอดการทดลองของถังปฏิกริยาที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ข. อุณหภูมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ค. อุณหภูมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



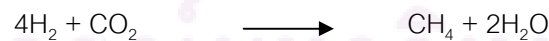
ง. คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

รูปที่ 4.24 คุณหมุมิตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์

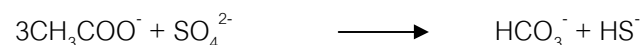
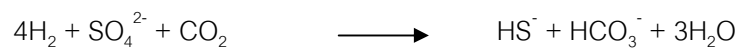
4.5.3 สภาพต่างทั้งหมด

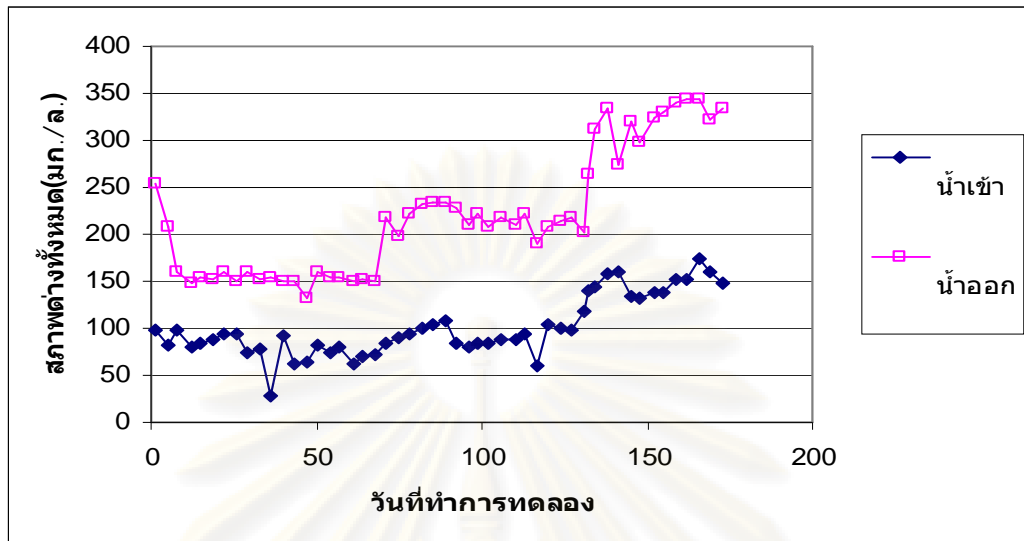
น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองถูกเตรียมขึ้นในถังเดียวกัน น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบของถัง 4 ถังปฏิกรณ์จึงมีค่าสภาพต่างทั้งหมดเท่ากัน ดังรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลองเมื่อน้ำออกจากระบบจะมีสภาพต่างที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับสภาพต่างของน้ำเสียเข้าระบบ เนื่องจากในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอลจะมีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย การย่อยสลายซัลเฟตจะเกิดสภาพต่างขึ้นในระบบ (มันสิน, 2545) และสภาพต่างยังเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พัชรินทร์ นันทิวาวัดณ์ (2546) ที่สภาพต่างทั้งหมดของน้ำทิ้งจะสูงกว่าน้ำเข้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

ปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายของแบคทีเรียสร้างมีเทน

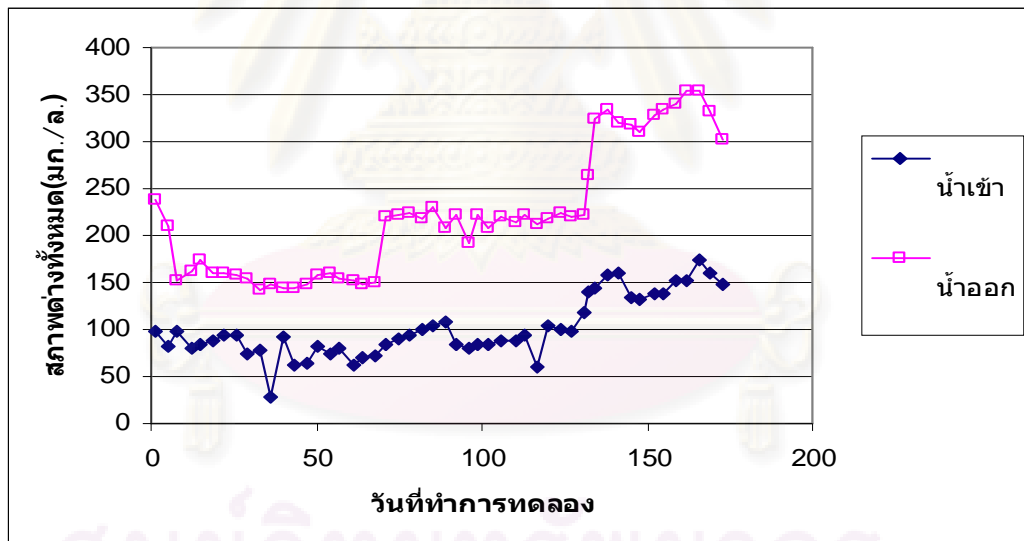


ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต



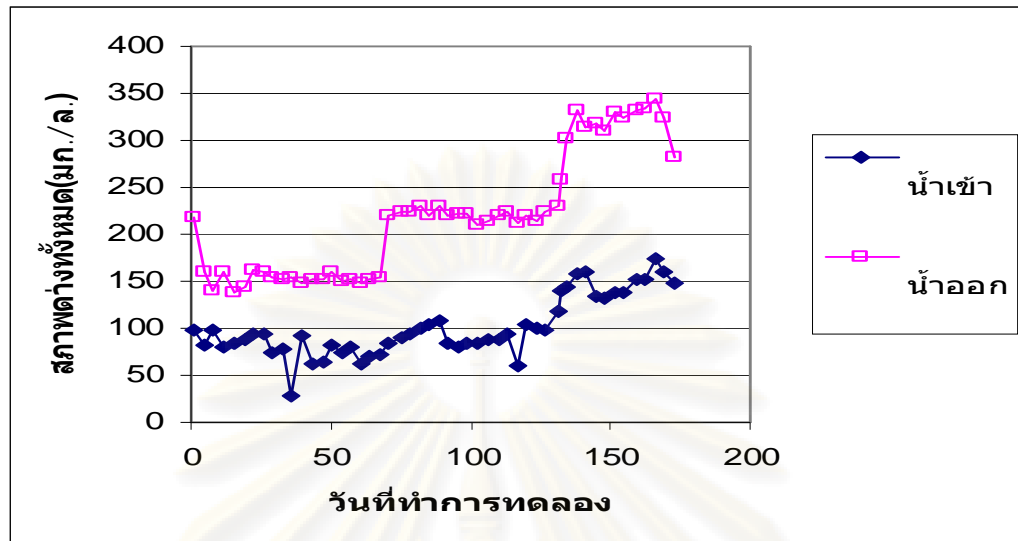


ก. สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม
เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

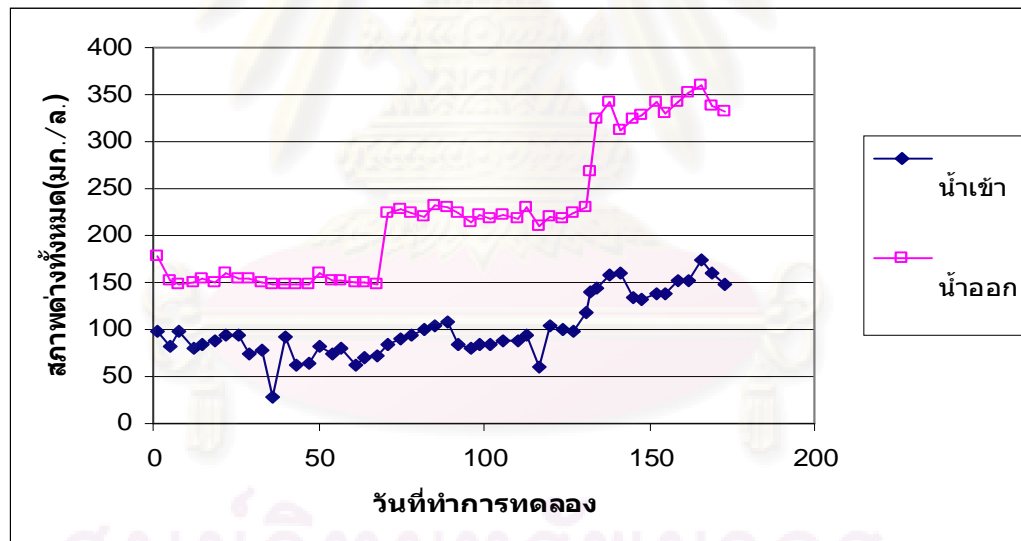


ข. สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม
เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค. สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม
เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

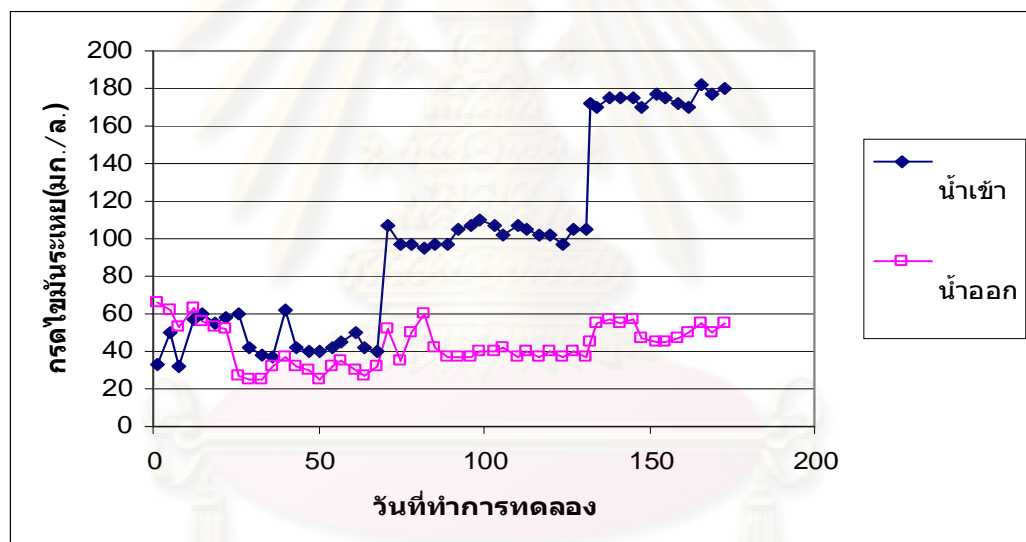


ง. สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

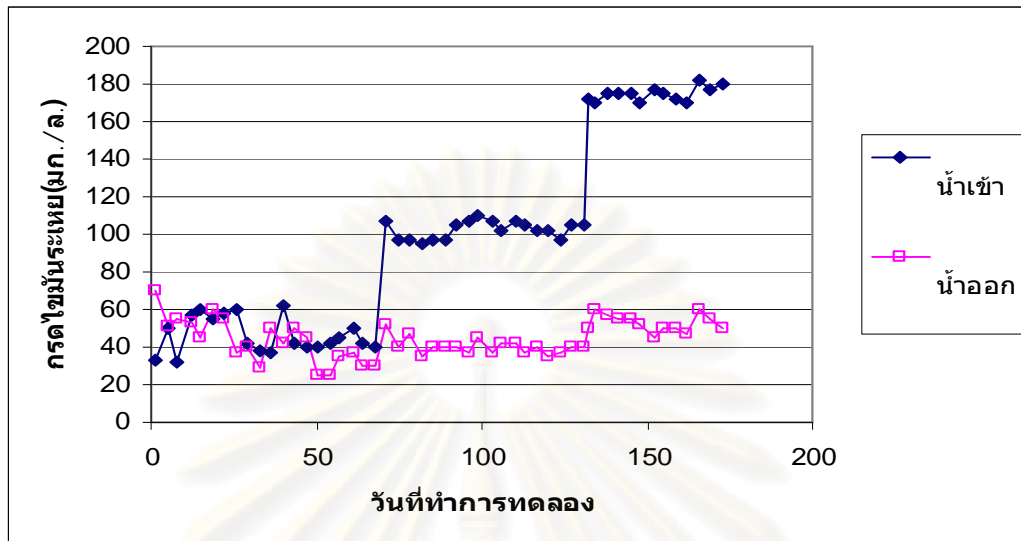
รูปที่ 4.25 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์

4.5.4 กรดไขมันระเหย (VFA)

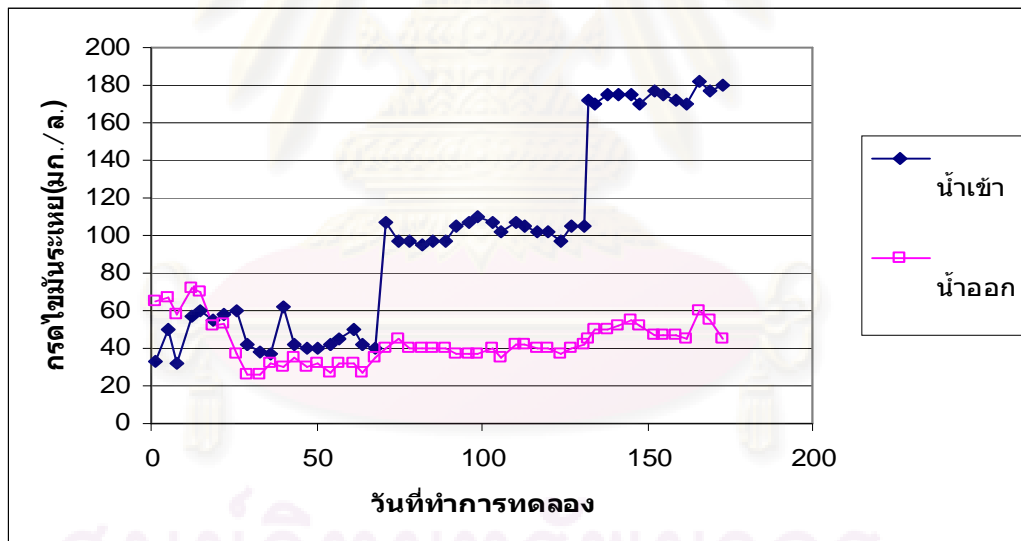
ปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ตรวจสอบการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยกรดไขมันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณเตือนว่าระบบกำลังเสียสมดุล บ่งบอกได้ว่าระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนน้อยเกินไปหรือแบคทีเรียสร้างกรดผลิตกรดไขมันระเหยได้เร็วเกินไป กรดไขมันระเหยจะส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำลง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ทำการเก็บจากโรงงานผลิตเอทานอลเพียงครั้งเดียว น้ำเสียบางส่วนที่ยังไม่ได้นำออกมาใช้เมื่อเก็บไว้ในแกลลอนเป็นเวลานานอาจเกิดการหมักภายในแกลลอนได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นในน้ำเสียของแกลลอนที่ยังไม่ได้เปิดใช้ จึงส่งผลให้น้ำเสียที่เตรียมเข้าระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นได้ ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.26



ก. กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

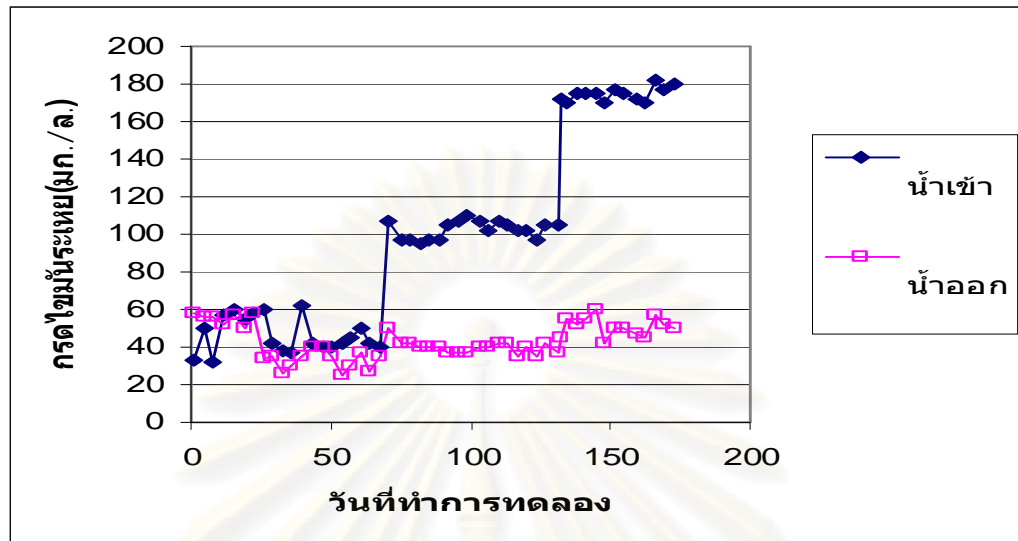


ข. กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม
เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ค. กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม
เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



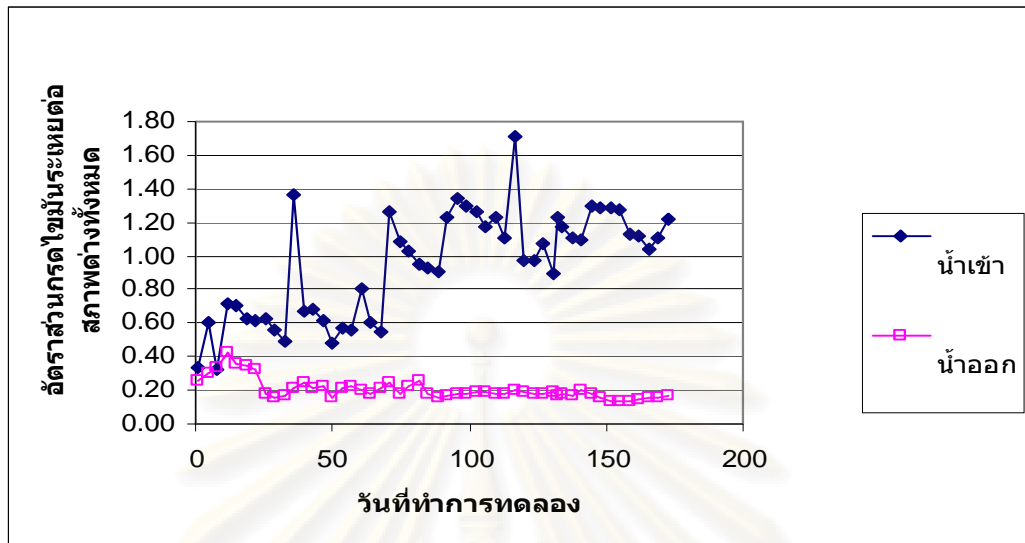
ง. กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

รูปที่ 4.26 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์

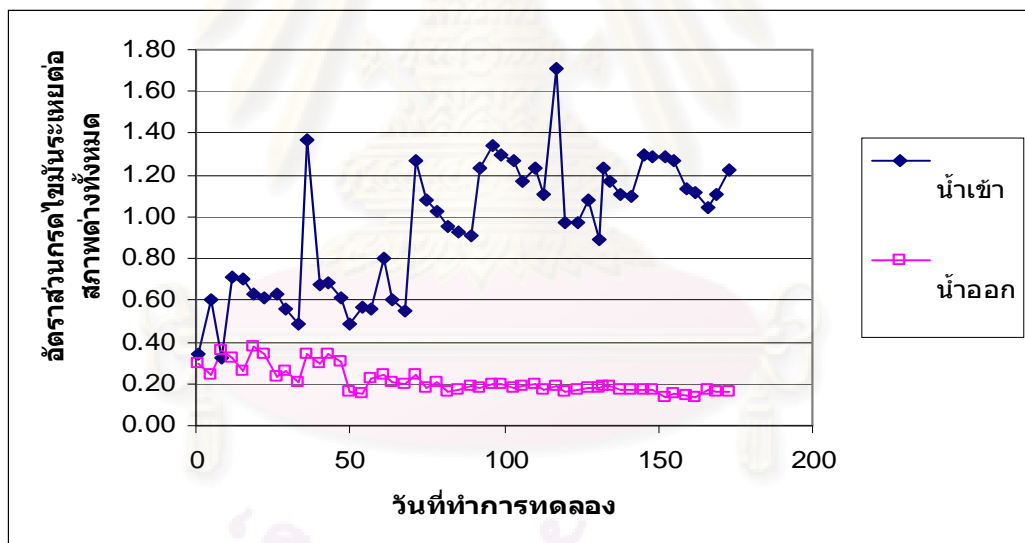
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการทดลองปริมาณกรดไขมันระเหยจะค่อนข้างสูงในช่วงประมาณ 1-22 วัน โดยมีปริมาณสูงกว่าน้ำเข้าระบบ แล้วหลังจากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำออกจะน้อยลง แสดงว่าระบบมีความสามารถในการกำจัดกรดไขมันระเหยได้ดีขึ้น เนื่องจากการปรับสภาพและการเจริญเติบโตของตะกอนแบคทีเรียในระบบที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่บำบัดได้เพิ่มขึ้นและเริ่มคงตัวเมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 26 วัน

4.5.5 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด

อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด สามารถบอกได้ถึงสมดุลของระบบและกำลังบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าต่ำกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบำบัดที่เพียงพอ ค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.27

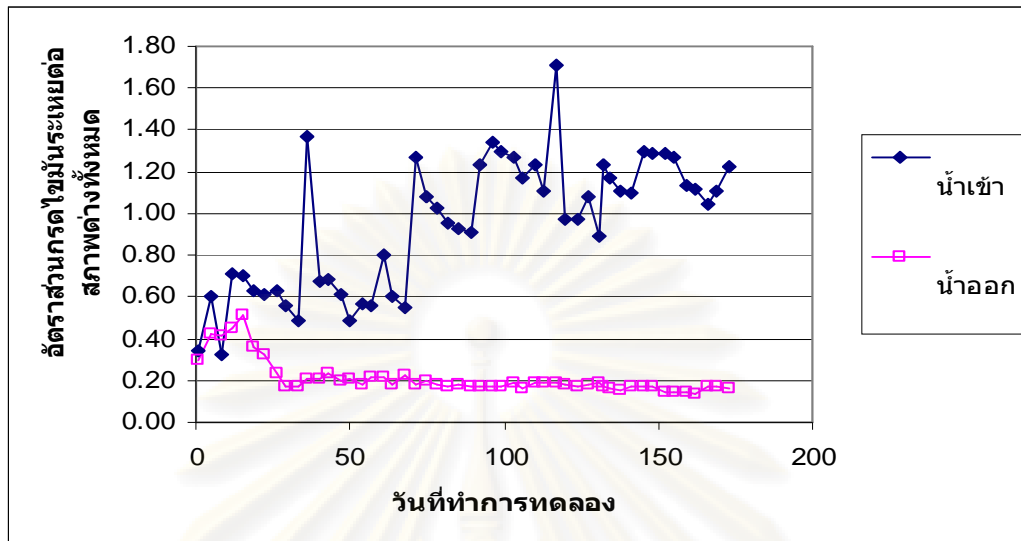


ก. อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1
(เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

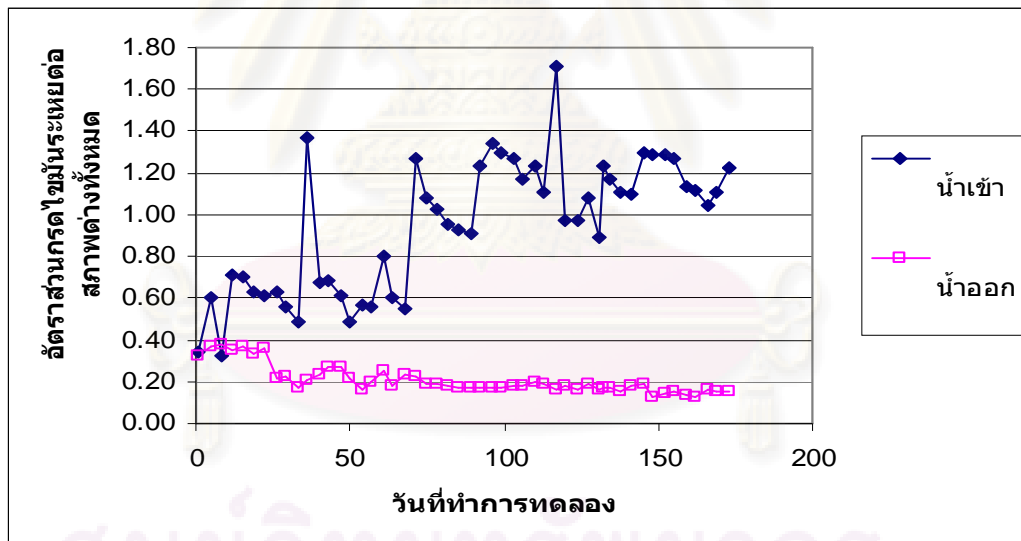


ข. อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2
(เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค. อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3
(เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ง. อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4
(เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

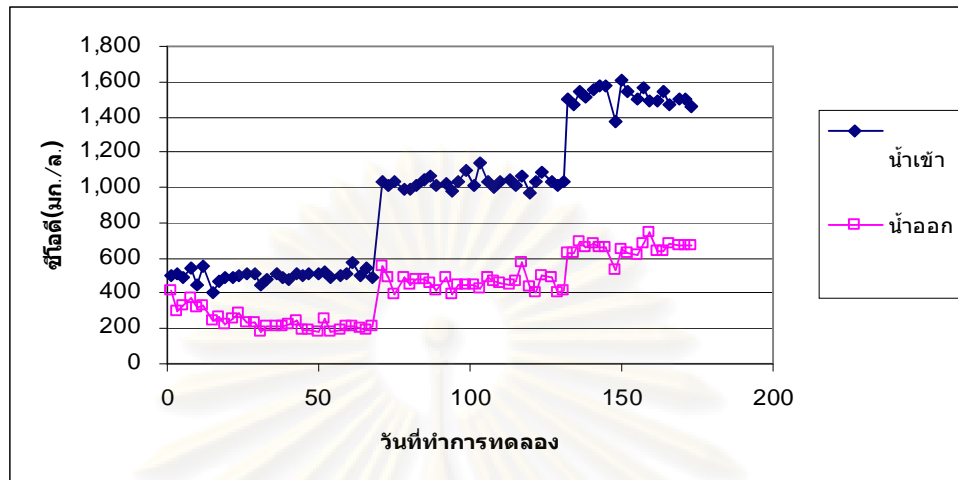
รูปที่ 4.27 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของทุกถังปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่า โดยเฉลี่ยตลอดการทดลองถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 มีกำลังปั๊มเฟอรัสสูง โดยมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยต่ำกว่า 0.4 โดยเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ที่ประมาณ 0.21 แต่ก็มีช่วง 1-3 อาทิตย์แรกเท่านั้น ที่บางวันถึงปฏิกรณ์ 1 และ 3 จะมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดเกินกว่า 0.4 แม้ว่าตลอดการทดลองจะไม่มี การเติมสารเพื่อเพิ่มกำลังปั๊มเฟอรัสในระบบ ถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 ก็มีเสถียรภาพแม้ในสภาวะภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น

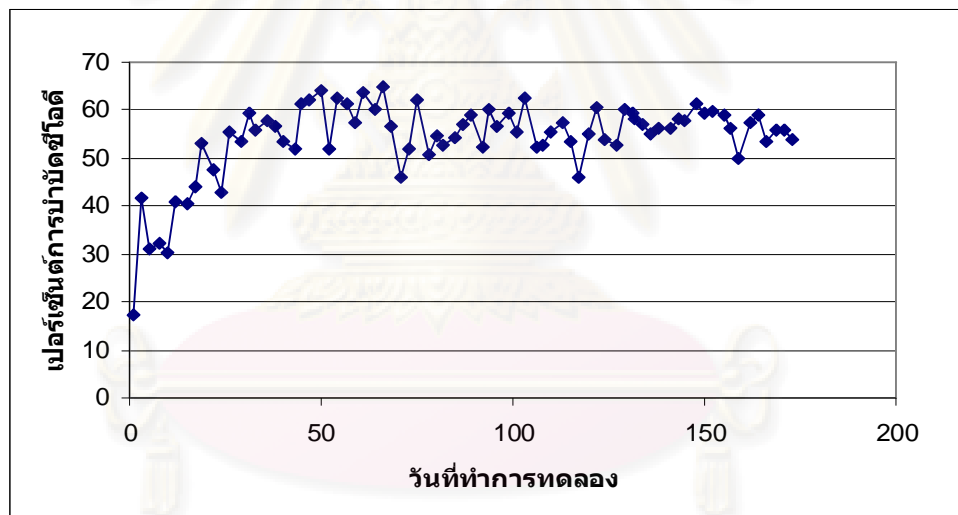
4.5.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัด

ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจริงมาเจือจางกับน้ำประปาให้ได้ความเข้มข้นตามค่า ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่กำหนดในการเดินระบบ โดยน้ำเข้าของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ถูกเตรียมขึ้นใน ถังเดียวกัน ค่าซีโอดีน้ำเข้าจึงเท่ากันหมด การทำซีโอดีในการทดลองนี้จะใช้การกรองก่อนนำไป วิเคราะห์ค่าซีโอดีที่ได้ในการทดลองนี้จึงเป็นค่าซีโอดีที่ละลายน้ำเท่านั้น ค่าซีโอดีน้ำเข้าและน้ำ ออกของแต่ละถังปฏิกรณ์แสดงใน รูปที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



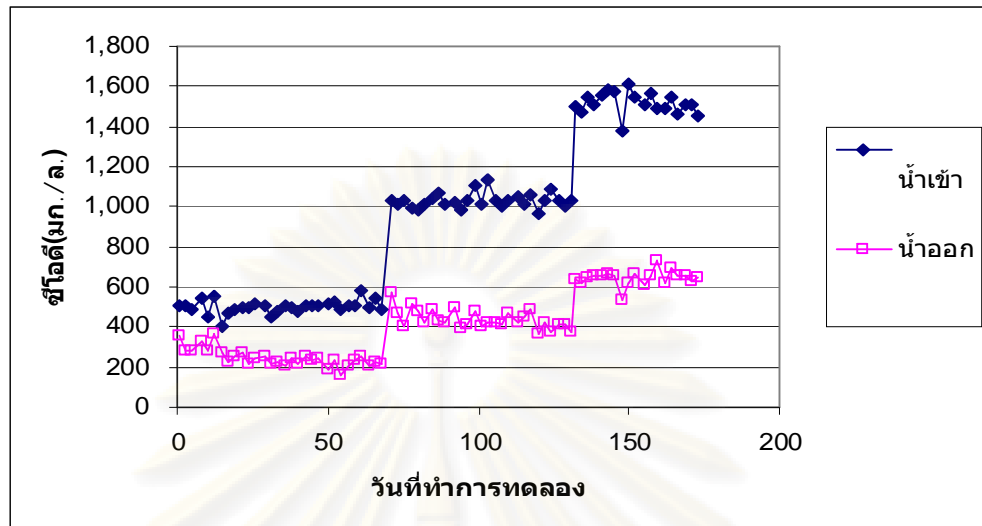
ก. ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1 เต็ม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



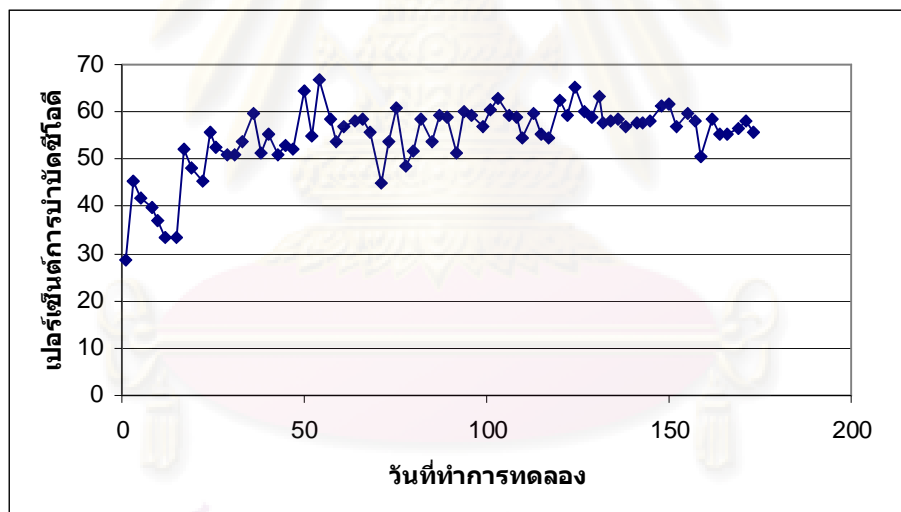
ข. ประสิทธิภาพบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1

รูปที่ 4.28 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



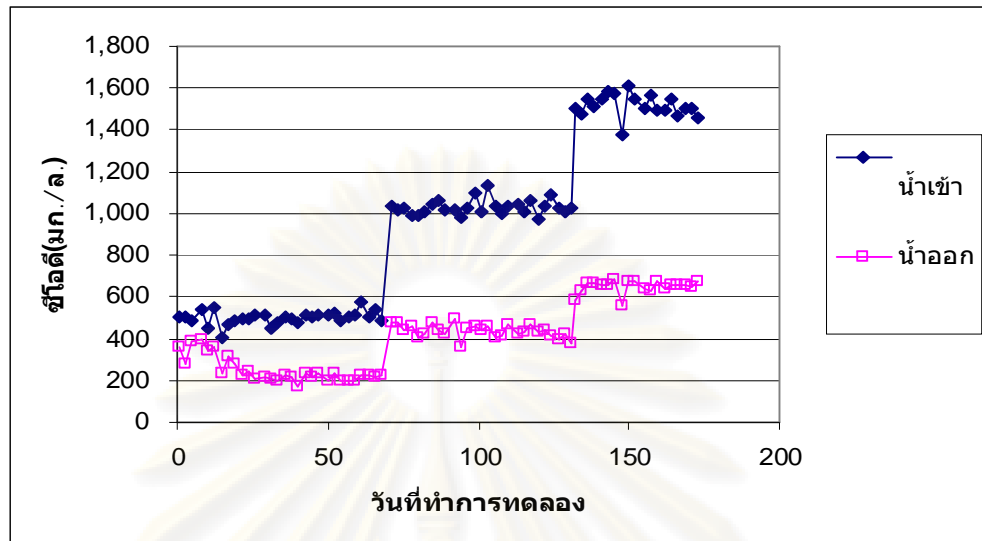
ก. ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2 เต็ม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



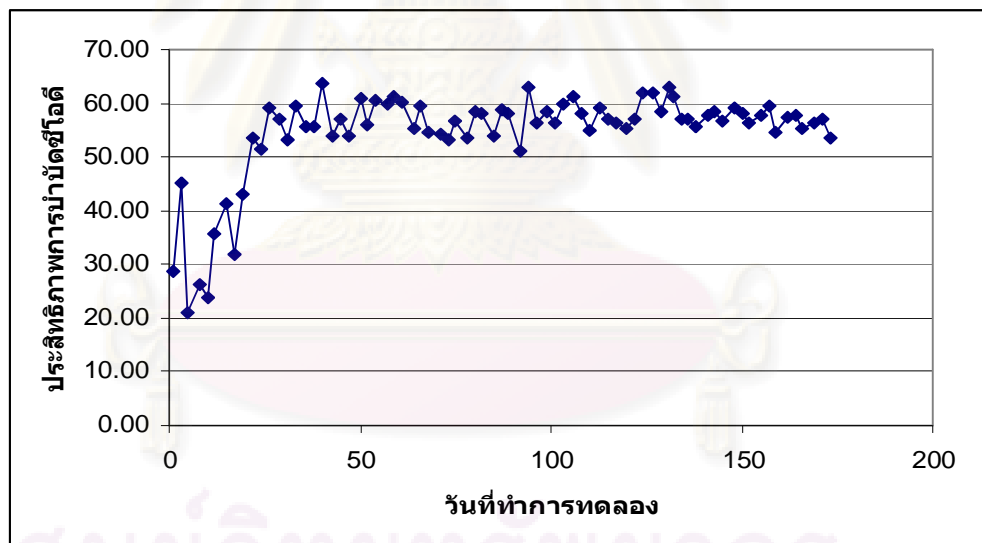
ข. ประสิทธิภาพบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2

รูปที่ 4.29 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

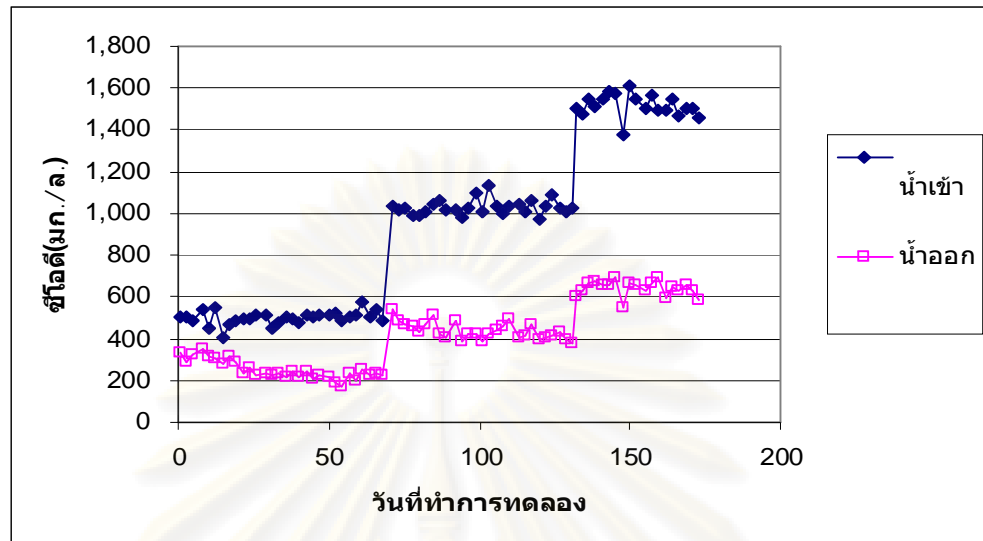


ก. ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3 เดิม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

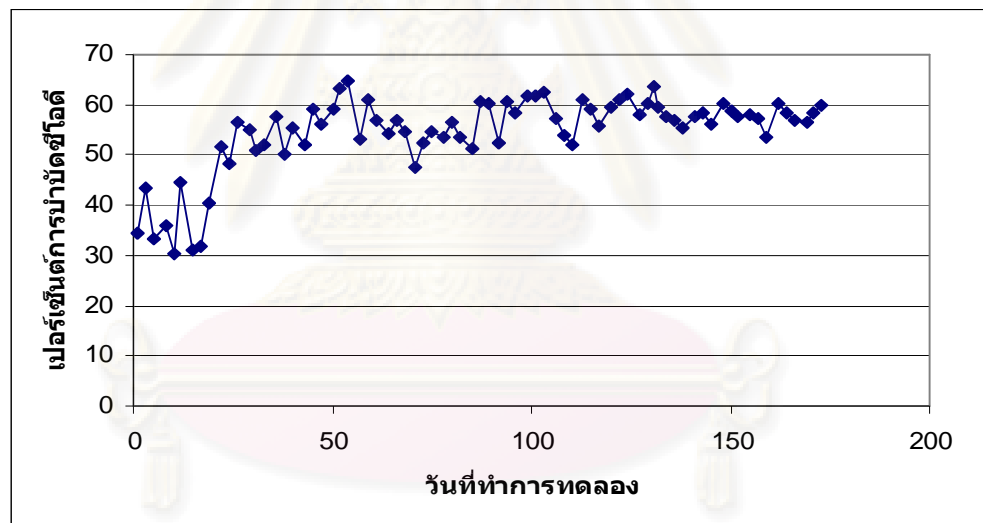


ข. ประสิทธิภาพบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.30 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3



ก. ค่าซีโอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ข. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4

รูปที่ 4.31 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 4

รูปที่ 4.28 - 4.31 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี เทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบ จะเห็นได้ว่าช่วงเริ่มต้นการเดินระบบ ในทุกถังปฏิกรณ์จะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีค่อนข้างต่ำและค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทุกถังปฏิกรณ์สามารถบำบัดซีโอดีได้มากกว่า 50% ในช่วงวันที่ 26 และอยู่ในระดับมากกว่า 50% จนกระทั่งจบการทดลองที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงว่าระบบมีการปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียโดยใช้เวลาประมาณ 26 วัน ในวัน

แรกที่เพิ่มภาระบรรทุกระบบสารอินทรีย์จาก 2 เป็น 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีลดลงต่ำกว่า 50% หลังจากนั้นทุกถังปฏิกรณ์จะสามารถบำบัดซีไอดีได้มากกว่า 50% เหมือนเดิม แสดงว่าเมื่อระบบมีการปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียดีแล้ว ระบบจะสามารถรับภาระบรรทุกระบบสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนาน จากการทดลองพบว่าทุกถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยที่ประมาณ 54% ตลอดการทดลอง 172 วัน เนื่องจากน้ำเสียจากโรงกลั่นเอทานอลมีความยากในการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากมีสัดส่วนซีไอดีต่อบีไอดีในการทดลองนี้เป็น 0.27 มีค่าน้อยกว่า 0.5 (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2545)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณมากกว่า ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) แต่ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของทุกถังปฏิกรณ์ไม่แตกต่างกัน อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่มีในระบบมีปริมาณสูงใกล้เคียงกัน และตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นก็นำมาจากระบบยูเอเอสพีของโรงงานผลิตเอทานอลโดยตรง ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์มีการปรับสภาพคุ้นเคยกับน้ำเสียประเภทนี้ได้ดีอยู่แล้ว ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของทั้ง 4 ถังปฏิกรณ์ จึงไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pereira, 2002 และ Sabry, 2008 ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสลัดจ์แบบเม็ดและแบบแขวนลอยในระบบอีจีเอสพีและยูเอเอสพี พบว่าสลัดจ์ทั้ง 2 แบบ มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

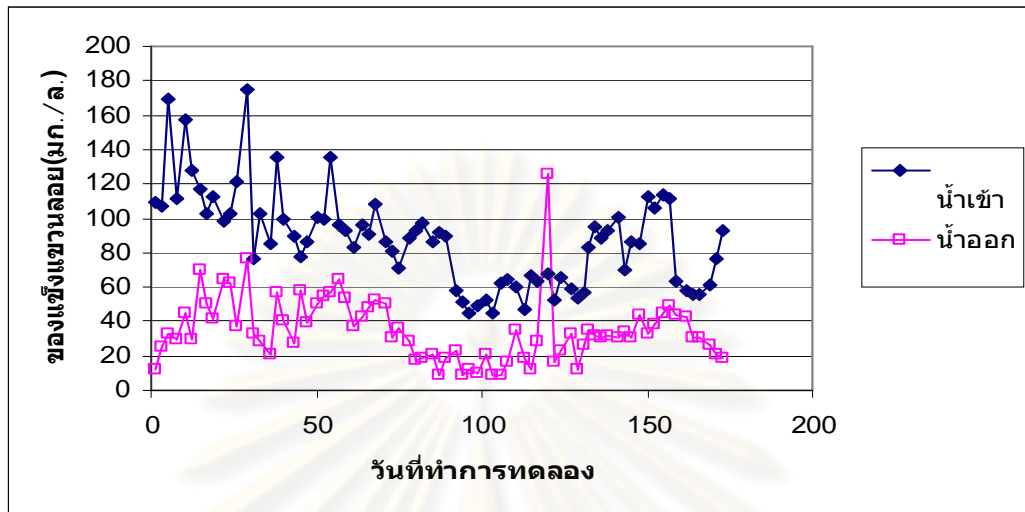
เมื่อพิจารณาจากค่า SD ซึ่งบอกได้ถึงกระจายของข้อมูล ถ้าค่า SD สูง แสดงว่ามีการกระจายของข้อมูลในช่วงกว้าง เมื่อนำค่า SD ของประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในแต่ละถังปฏิกรณ์มาเปรียบเทียบกัน จะสามารถบอกได้ถึงสภาวะความคงตัวของระบบ ถ้าถังปฏิกรณ์ใดมีค่า SD น้อยกว่า แสดงว่าระบบมีความคงตัวมากกว่า สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราบรรทุกระบบสารอินทรีย์ที่ 4 และ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ทุกถังปฏิกรณ์เข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากผ่านการปรับตัวในช่วงอัตราบรรทุกระบบสารอินทรีย์ที่ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน มาแล้ว โดยที่อัตราบรรทุกระบบสารอินทรีย์ 4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ถึงปฏิกรณ์ที่ 1,2,3 และ 4 มีค่า SD ของประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีมีค่าเท่ากับ 4.25, 4.67, 3.05 และ 4.23 ตามลำดับ และที่อัตราบรรทุกระบบสารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ถึงปฏิกรณ์ที่ 1,2,3 และ 4 มีค่า SD ของประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับ 2.60, 2.36, 1.80 และ 1.74 ตามลำดับ จะ

เห็นได้ว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีค่า SD ต่ำกว่าถึงปฏิกรณ์อื่นในช่วงการเดินระบบที่อัตราบำบัดบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งในช่วงนี้ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร มากที่สุดเมื่อเทียบกับถึงปฏิกรณ์อื่น และที่อัตราบำบัดบรรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีค่า SD น้อยกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) ซึ่งในช่วงการเดินระบบที่อัตราบำบัดบรรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน นี้ ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 ปริมาณเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร มากกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 จากการเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่า ในถึงปฏิกรณ์ที่มีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณมากกว่าระบบจะมีความคงตัวมากกว่าถึงปฏิกรณ์ที่มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์น้อย

4.5.7 ของแข็งแขวนลอย (เอสเอส) และประสิทธิภาพการบำบัด

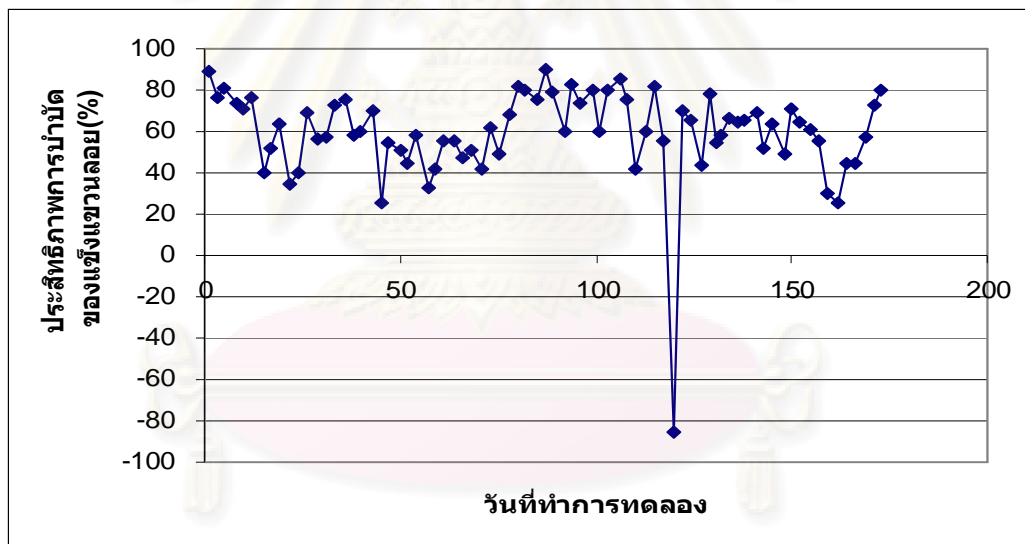
ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบเป็นพารามิเตอร์อย่างหนึ่ง ที่สามารถบอกได้ว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากถ้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยออกมากับน้ำทิ้งมาก แสดงว่าตะกอนแบคทีเรียในระบบมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนไม่ดีนัก จึงหลุดออกจากระบบได้ง่ายเมื่อเกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณมากหรือความเร็วไหลขึ้นในระบบสูง และอาจเกิดจากระบบได้รับสารพิษหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไป (shock load) ทำให้การทำงานของระบบขาดเสถียรภาพ ค่าของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 แสดงในรูปที่ 4.32 - 4.35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1

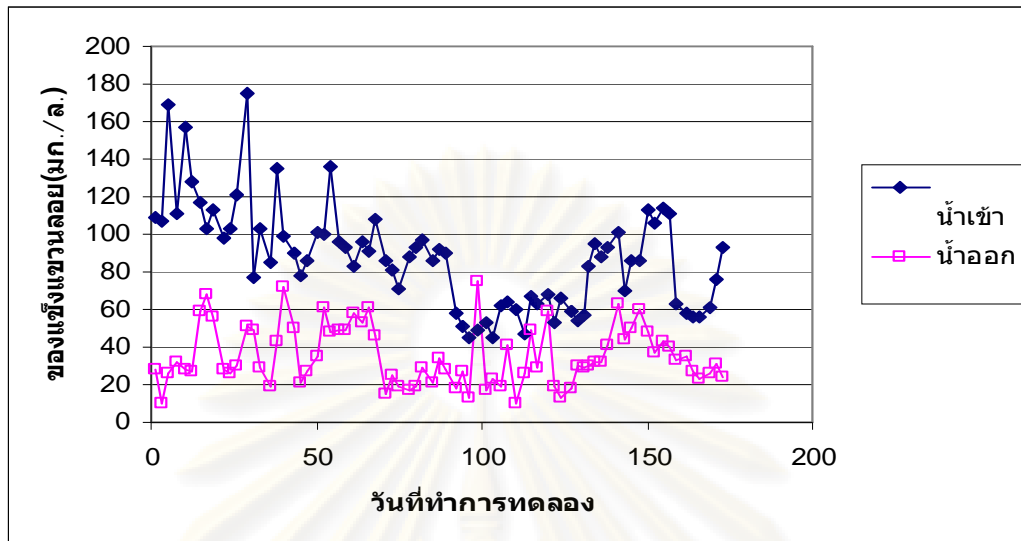
(เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ข. ประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1

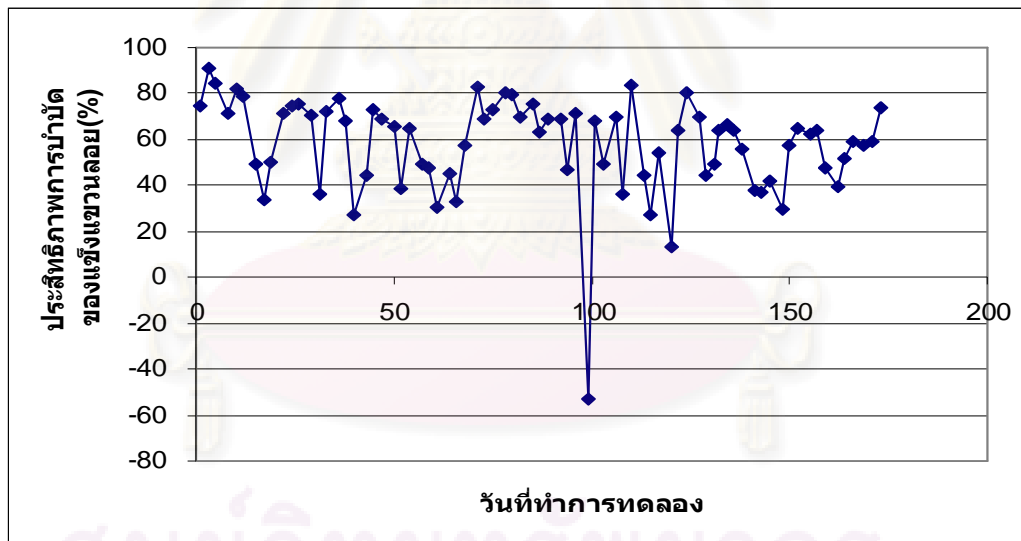
รูปที่ 4.32 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



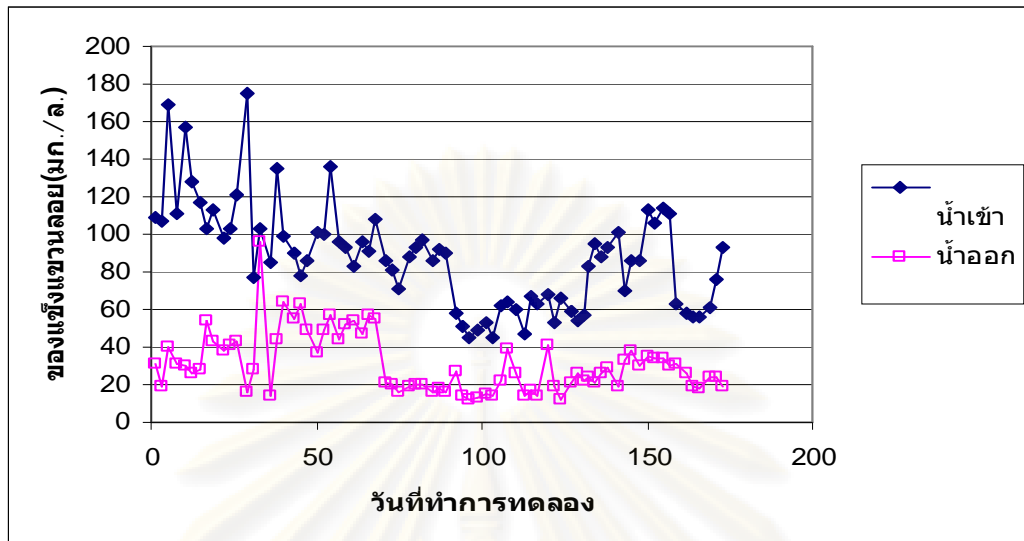
ก. ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2

(เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



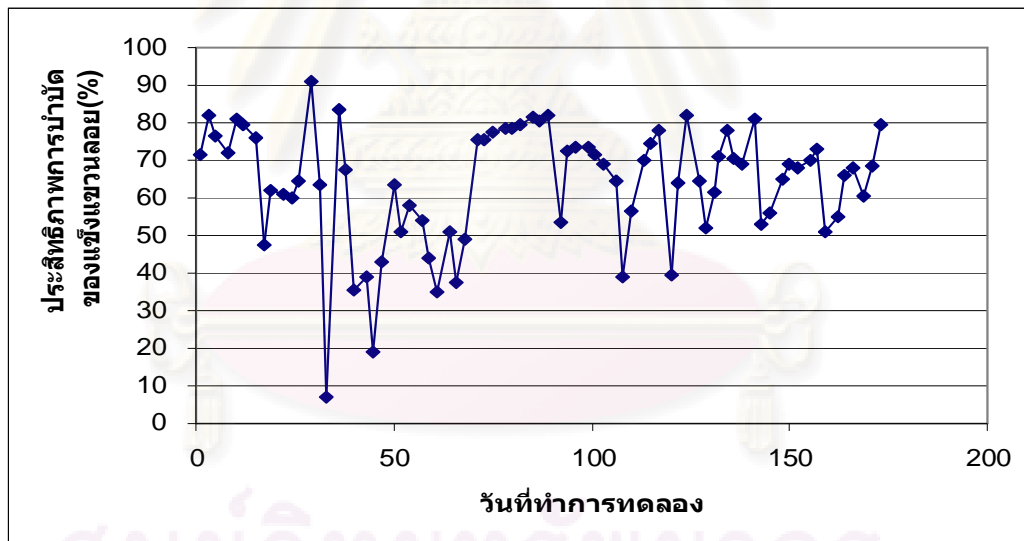
ข. ประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2

รูปที่ 4.33 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 2



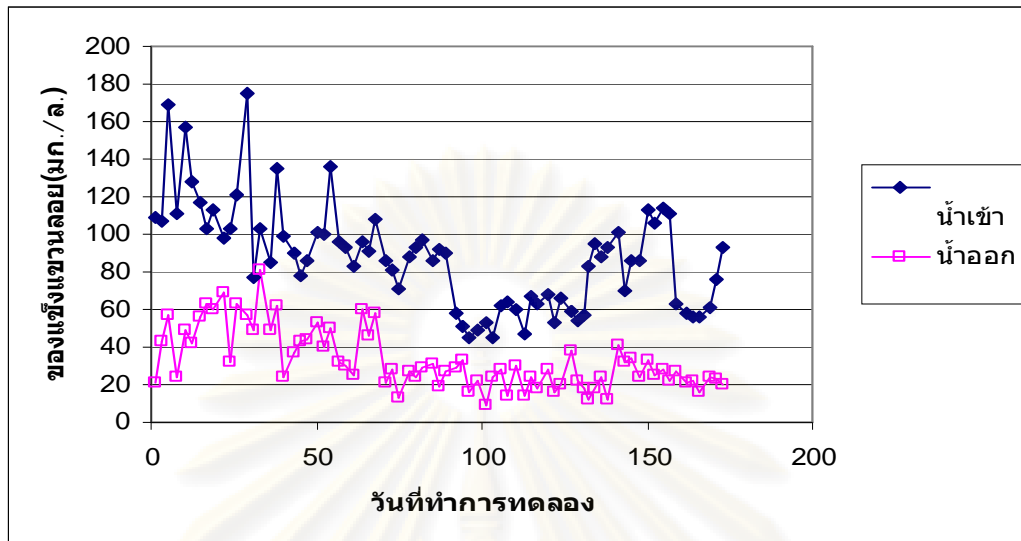
ก. ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3

(เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)

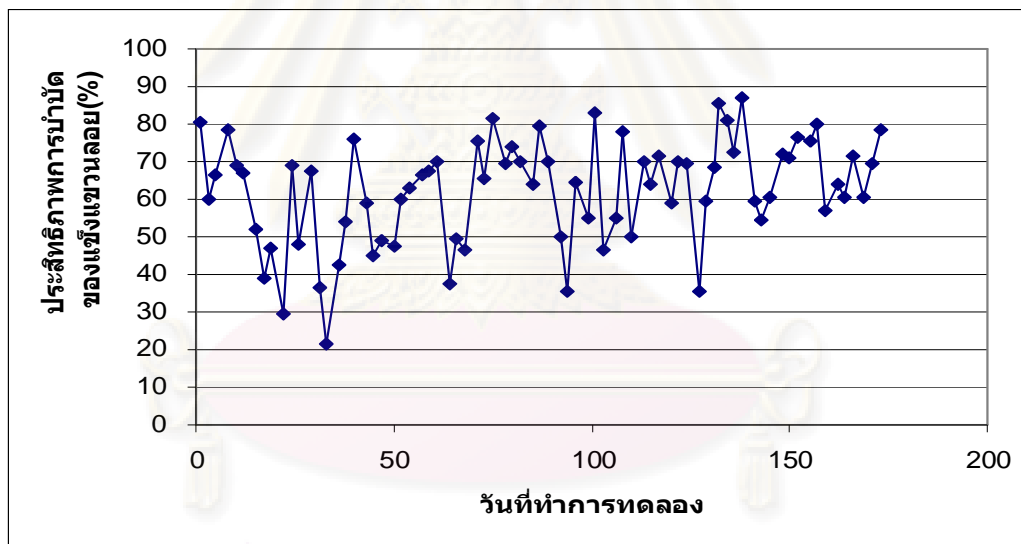


ข. ประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3

รูปที่ 4.34 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 3



ก. ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส)



ข. ประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4

รูปที่ 4.35 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.32 - 4.35 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยตลอดการทดลอง พบว่าในช่วงเวลา 12 วันแรก หลังจากเติม pulp powder และ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส ลงในแต่ละถังปฏิกรณ์ ระบบจะมีการหลุดลอยของตะกอนออกมากับน้ำทิ้งน้อย ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยดี โดยถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 77.98% ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 80.30% ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 77.13% ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 70.26% ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองที่ภาาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ 57.76%, 60.20%, 57.54%, 55.46% ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นผลของการเติม pulp powder และ polymer ที่ช่วยให้ตะกอนเกาะตัวเป็น floc ที่มีน้ำหนักมากและจมตัวได้ดี เป็นผลให้ตะกอนหลุดออกจากระบบน้อยในช่วง 12 วันแรก โดยถึงปฏิกรณ์ที่ 4 ที่ไม่มีการเติม pulp powder มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยใน 12 วันแรกน้อยสุด

หลังจากผ่าน 12 วัน ของการเดินระบบ จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ภาาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่ามีแนวโน้มในการบำบัดของแข็งแขวนลอยลดลงและค่อนข้างผันแปรอย่างมาก เพราะมีตะกอนแขวนลอยไหลออกมากับน้ำทิ้งปริมาณสูงกว่าช่วงเริ่มเดินระบบ อธิบายได้ว่าเกิดจากการขยายตัวของชั้นตะกอนที่เป็นผลมาจากแรงดันน้ำและการเกิดแก๊สขึ้นในระบบ เมื่อระบบค่อยๆปรับตัวและย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากขึ้นเรื่อยๆซึ่งตรงกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากเดินระบบในวันแรก ส่งผลให้ตะกอนแบบคที่เรียที่เกาะตัวเป็น floc ในช่วงแรกถูกเสียดสีและหลุดออก เกิดตะกอนแขวนลอยที่มีน้ำหนักเบาหลุดออกจากระบบ ซึ่งการหลุดออกของตะกอนน้ำหนักเบาเป็นการคัดเลือกลายพันธุ์ของจุลินทรีย์ในระบบทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักมาก ค่อยๆรวมตัวกันอย่างช้าๆและพัฒนาเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น Hulshoff Pol และคณะ (1983) อธิบายว่าเป็นขั้นตอน Washout Stage เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นตะกอนล่าง (Sludge Bed) ทำให้ชั้นตะกอนเกิดการขยายตัวและเกิดก๊าซในระบบ จะทำให้มีการหลุดออกของตะกอนเบาออกมากับน้ำล้างตลอดเวลา ขณะที่มีการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในระบบอย่างช้าๆ และขั้นตอน Transition Stage เมื่อภาาระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นจะเกิดก๊าซในระบบมาก ทำให้มีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก

ตะกอนขนาดเล็กหลุดออกนอกถัง ส่วนตะกอนขนาดใหญ่จะรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

เช่นเดียวกันที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 4 และ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ก็มีความผันผวนของประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยค่อนข้างมาก เป็นผลจากการเพิ่มอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้เกิดก๊าซมากขึ้น ประกอบกับการที่ถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 มีช่วงความสูงของส่วนย่อยสลายและส่วนของ Gas-Solid Separator (GSS) ไม่เพียงพอ และในการทดลองยังพบปัญหาอีกอย่างหนึ่งคือ เกิดการสะสมของก๊าซที่ไม่สามารถถอดชั้นตะกอนออกมาได้ มีการสะสมของก๊าซได้ชั้นตะกอน เมื่อก๊าซสะสมตัวมากขึ้นทำให้ชั้นตะกอนยกตัวขึ้นทั้งชั้นตามการไหลของน้ำไปติดอยู่ที่ส่วนของ GSS ตะกอนที่อยู่ตรงส่วนนี้จะหลุดออกจากระบบได้ง่าย ต้องแก้ไขด้วยการปิดระบบและใช้สายยางดันให้ตะกอนตกลงมา ปล่อยให้มีการตกตะกอนสักพักแล้วจึงเดินระบบต่อ เป็นผลให้มีตะกอนแขวนลอยฟุ้งกระจายในน้ำมากและหลุดออกได้ง่าย

ในวันที่ 120 ของการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และวันที่ 99 ของการทดลอง ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีตะกอนแขวนลอยออกจากระบบมากกว่าปกติ เกิดจากการที่สายยางสูบน้ำเข้าระบบลอยขึ้นเหนือน้ำทำให้มีที่สูบน้ำเข้าระบบสูบบอกอากาศเข้าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 เป็นระยะเวลานาน เมื่อเริ่มเดินระบบใหม่ทำให้ระบบเกิดการเสียสมดุลทำให้มีตะกอนหลุดออกปริมาณมากในวันที่ 120 ของการทดลอง ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 เกิดจากการที่ก๊าซสะสมได้ชั้นตะกอนทำให้ตะกอนยกขึ้นขึ้นในขณะที่เก็บตัวอย่างน้ำทำให้มีตะกอนออกจากระบบปริมาณมากในช่วงเวลานั้น

เปรียบเทียบปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 (เติม pulp powder 400 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (เติม polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) ซึ่งมีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ในระบบมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 (เติม pulp powder 800 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) และถังปฏิกรณ์ที่ 2 (เติม pulp powder 600 มก./กรัม เอสเอส + polymer 2 มก./กรัม เอสเอส) มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยดีกว่าถังปฏิกรณ์ 1 และ 2 ด้วย โดยถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองเฉลี่ยร้อยละ 64.03 และ 62.31 ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองเฉลี่ยที่ร้อยละ 59.42 และ 57.75 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะผลของการเติม pulp powder ในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกรณ์ จะมีผลต่อการเพิ่มปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบไม่เท่ากัน เมื่อระบบมีการพัฒนาของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณมากขึ้น ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะจมตัวได้ดีกว่าจึงหลุดออกจากระบบยากกว่าตะกอนขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบา การที่ถังปฏิกรณ์ 1 และ 2 มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเล็ก

มากกว่าถึงปฏิกรณ์ 3 และ 4 ตะกอนขนาดเล็กจะหลุดออกจากระบบได้ง่ายเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดจากก๊าซชีวภาพในระบบและความเร็วไหลขึ้นของการสูบน้ำเสียเข้าระบบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์ 1 และ 2 จึงน้อยกว่าถึงปฏิกรณ์ 3 และ 4

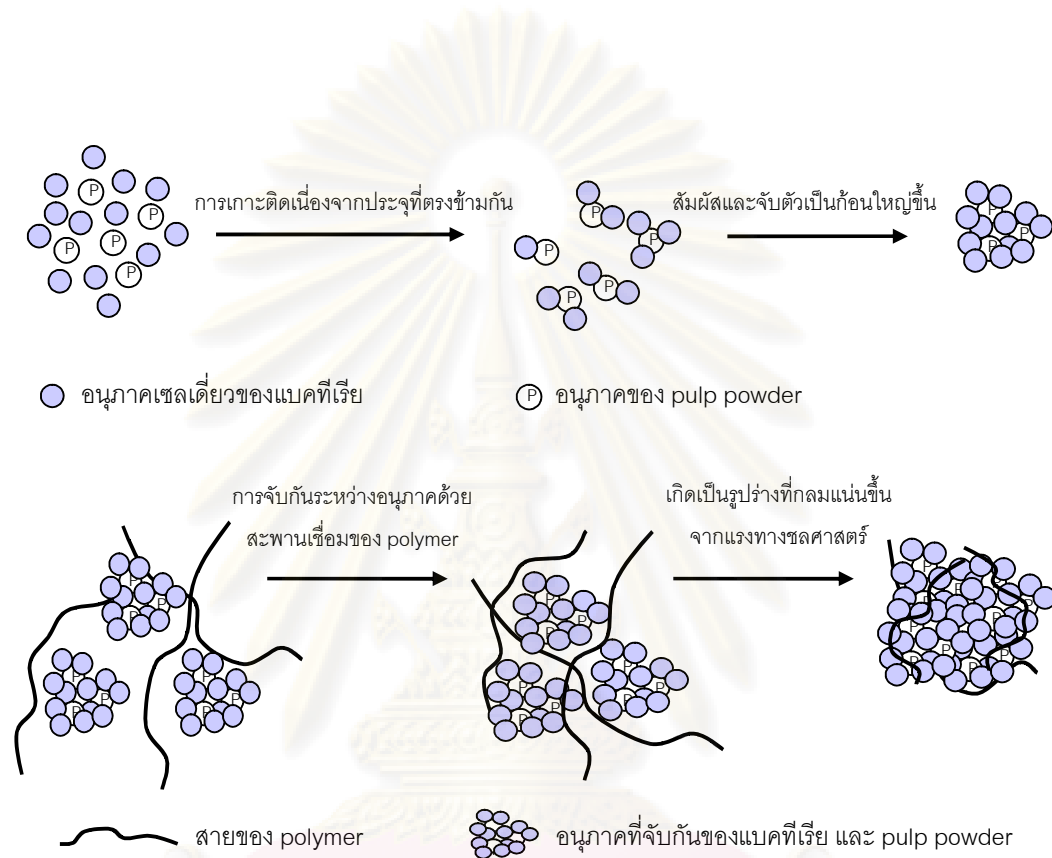
4.6 กลไกและแบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในงานทดลองนี้

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเติม pulp powder ในปริมาณที่เหมาะสม (400 มก./กรัม เอสเอส) ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส สามารถช่วยให้เกิดกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบได้เร็วกว่าการเติม polymer ประจุบวก เพียงอย่างเดียว

การเติม pulp powder และ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ร่วมกันนั้น เป็นการนำกลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ 2 รูปแบบ คือ กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบบ multi-valence positive ion-bonding model ที่เสนอโดย Yu และคณะ (2003) และกลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบบ polymer or filamentous bonding model ที่เสนอโดย Yu และคณะ (2003) เช่นเดียวกัน มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของ pulp powder บอกให้รู้ว่าประจุที่ล้อมรอบผิวอนุภาคของ pulp powder เป็นประจุบวก ดังนั้นเมื่อเติม pulp powder ลงในระบบ อนุภาคแบคทีเรียในน้ำเสียซึ่งเป็นประจุลบสามารถเกาะติดกับ pulp powder เกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับกลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบบ multi-valence positive ion-bonding model และเมื่อเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ร่วมด้วย อนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวของ pulp powder และแบคทีเรียหลายๆ อนุภาค จะเกาะกันใหญ่ขึ้นจากการทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมของ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ที่เป็นสายยาว และอนุภาคที่เกิดการรวมตัวกันเหล่านี้ จะพัฒนาและเติบโตกลายเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่อไป โดยรูปแบบการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้ เป็นรูปแบบที่ยังไม่มีผู้ใดนำเสนอมาก่อน ผู้วิจัยจึงได้ทดลองทำเป็นแบบจำลองในการอธิบายกลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป

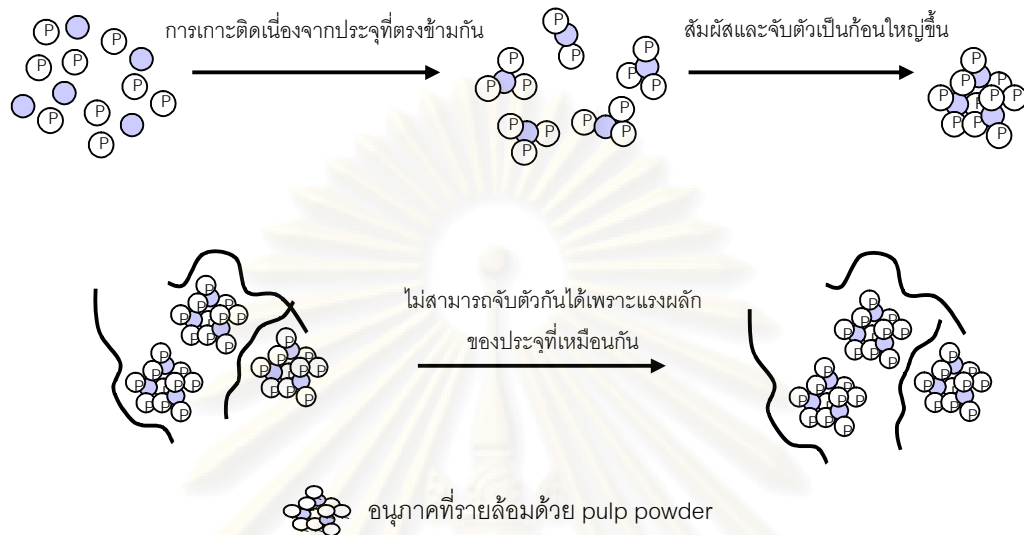
ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีกว่าของการเติม pulp powder ร่วมกับ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก เมื่อเทียบกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก เพียงอย่างเดียว นั้น อธิบายได้ว่า อาจเป็นเพราะการเติม pulp powder ร่วมกับ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก จะทำให้เกิดการเกาะติดและจับตัวกันของอนุภาคแบคทีเรียได้ดีกว่า ซึ่งอนุภาค

แบคทีเรียที่จับตัวกันได้ดีกว่านั้น น่าจะก่อตัวเป็นรูปร่างเริ่มต้นและสามารถพัฒนาไปเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.36 แบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วย pulp powder ร่วมกับ polymer

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.37 แบบจำลองเมื่อมีการเติม pulp powder ในปริมาณที่มากเกินไป

แต่ในงานวิจัยนี้ก็พบว่า การเติม pulp powder ในปริมาณที่มากเกินไป (600 และ 800 มก./กรัม เอสเอส) ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส กลับส่งผลให้เกิดการพัฒนาในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบได้ช้ากว่ามาก เมื่อเทียบกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 มก./กรัม เอสเอส เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ทั้ง pulp powder และ polymer Praestol 852 BC ที่ใช้ในการทดลองนี้ ต่างก็มีประจุบวกอยู่บริเวณผิวอนุภาค เมื่อมีการเติม pulp powder ในปริมาณมาก ทำให้ pulp powder หลายอนุภาคจับกับอนุภาคแบคทีเรีย ทำให้เกิดการผลักรวมกันของประจุบวกที่เหมือนกันของ pulp powder ด้วยตัวเอง และ pulp powder กับ polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ทำให้ประสิทธิภาพในการเกาะติดกันระหว่างอนุภาคลดลง จึงทำให้กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นไปได้ช้า แสดงเป็นแบบจำลองให้เห็นได้ในรูปที่ 4.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของการเติม pulp powder ปริมาณ 800 mg/g SS, 600 mg/g SS, 400 mg/g SS และ 0 mg/g SS ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 mg/g SS ในทุกถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี เพื่อเปรียบเทียบเรื่องประสิทธิภาพการเดินระบบ และการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเอทานอล สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเติม pulp powder ปริมาณ 400 mg/g SS ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสม ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 mg/g SS ช่วยเร่งให้เกิด การพัฒนาของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เร็วกว่าถึง 22 วัน เมื่อเทียบการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวกปริมาณ 2 mg/g SS เพียงอย่างเดียว และให้ผลที่เร็วกว่าการเติม pulp powder ปริมาณ 600 และ 800 mg/g SS ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุ บวก ปริมาณ 2 mg/g SS เช่นเดียวกัน

2. การเติม pulp powder ปริมาณ 400 mg/g SS ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 mg/g SS ทำให้เกิดการพัฒนาระบบของเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ให้ใหญ่ขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 และ 4 กก.ชีโอดี/ ลบ.ม.-วัน ได้ดีกว่าการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวกปริมาณ 2 mg/g SS เพียง อย่างเดียว และดีกว่าการเติม pulp powder ปริมาณ 600 และ 800 mg/g SS ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก

3. การเติม pulp powder ในปริมาณมากถึง 600 mg/g SS ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 800 mg/g SS ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวก ปริมาณ 2 mg/g SS จะส่งผลเสียต่อการพัฒนาขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยจะมีการพัฒนาที่ ช้ากว่า การเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวกปริมาณ 2 mg/g SS เพียงอย่างเดียว ในถังปฏิกรณ์ที่ 4 และช้ากว่าการเติม pulp powder ในปริมาณ 400 mg/g SS ร่วมกับการเติม polymer Praestol 852 BC ชนิดประจุบวกปริมาณ 2 mg/g SS ในถังปฏิกรณ์ที่ 3 โดยเม็ดตะกอน

ขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร ในช่วงอัตราบำบัดบรทุกสารอินทรีย์ที่ 6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 มีปริมาณ 44.00% และ 49.06%ตามลำดับ ขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีปริมาณ 12.99% และ 2.75% ตามลำดับ

4. ระบบที่มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบที่มากกว่า จะสามารถกักเก็บ แแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ดีกว่าส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณมากกว่าตามไปด้วย

5. ในการทดลองนี้ระบบยูเอเอสปีสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบจะมีค่าเฉลี่ยที่ 6.14 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของ แแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม

6. ตลอดการทดลองในทุกถังปฏิกรณ์มีอุณหภูมิน้ำออกจากระบบอยู่ที่ประมาณ 27.2 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) อุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตลอดการทดลองนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบ

7. ตลอดการทดลองในทุกถังปฏิกรณ์มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง ทั้งหมดอยู่ต่ำกว่า 0.4 โดยเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ที่ประมาณ 0.21 บอกได้ว่าระบบมีกำลัง บัฟเฟอร์ที่สูงพอ

8. ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสปีที่มีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณมากกว่ามี ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในน้ำเสียโรงงานเอทานอลไม่แตกต่างกับถังปฏิกรณ์ที่มีเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ปริมาณน้อย แต่ถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากจะมีความคงตัวของ ระบบมากกว่า

9. ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสปีที่มีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณมากกว่าจะมีการ หลุดออกของปริมาณของแข็งแขวนลอยที่น้อยกว่าถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์น้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงปริมาณ pulp powder ที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นที่น้อยกว่านี้ โดยไม่ต้องเติม polymer เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมจริงในการใช้งาน

2. ควรศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงที่ไม่มีการเจือจาง เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการณ์เดินระบบในโรงงานให้มากที่สุด
3. ศึกษาการใช้ pulp powder กับน้ำเสียจริงจากโรงงานอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป
4. ศึกษาในน้ำเสียที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่าในการทดลองนี้เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มสูงมากขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกียรติพงศ์ เจริญสุข. 2546. การกำจัดน้ำมันสำหรับน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่ม 2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2546.
- จันทิมา สกุลพานิชย์. 2548. การบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรพงษ์ อินทร์จ้อหอ. 2547. การทดสอบความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีขนาดใหญ่ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีระ เกรอด. 2539. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย มหัจฉริยวงศ์. 2549. ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของระบบบำบัดยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชรินทร์ นันทิวาวัฒน์. 2546. การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์อ็อกซิเจนสำหรับบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานสุรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2532. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมประเทศไทย.

- สมศักดิ์ ศรีวะโลสกุล. 2534. การเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดในช่วงเดินระบบถังหมัก
กระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ใไรอากาศแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. การลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการ
ตกตะกอนทางเคมีกับโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ เพอริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาภรณ์ สันทัดเสือนันต์. 2545. ผลของความเร็วไหลขึ้นต่อการสร้างเม็ดของระบบบำบัดแบบ
ยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุเมธ ชวเดช. 2540. รายงานการวิจัยระบบยูเอเอสบี-ตัวกลางกรองแบบอนุภูมิสูงและสอง
ขั้นตอนสำหรับน้ำกากส่าและผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรภี เบญจปัญญาวงศ์. 2549. ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และการ
ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุดมศักดิ์ เจียรวิชัย. 2541. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต้นสำหรับน้ำเสีย
โรงงานผลิตนมถั่วเหลืองด้วยกระบวนการดีเอเอฟกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Akarsubasi, A.T., Ince, O., Oz, N.A., Kirdar, B., Ince, B.K. 2005. Evaluation of
performance, acetoclastic metanogenic activity and archaeal composition of full-
scale UASB reactors treating alcohol distillery wastewaters. Process
Biochemistry. 41: 28-35.
- Chen, J. and Lun, S.Y. 1993. Study of mechanism of anaerobic sludge granulation in
UASB reactors. Water Science and Technology 28(7): 171-178.

- Goodwin, J.A.S., Finlayson, J.M. and Low, E.W. 2000. A further study of the anaerobic biotreatment of malt whisky distillery pot ale using an UASB system. Bioresource Technology. 78: 2155-160.
- Fang, H.H.P., Chui, H.K., Li, Y.Y. 1994. Microbial structure and activity of UASB granules treating different wastewater. Water Science and Technology. 30(12): 87-96.
- Francese, A., Cordoba, P., Durun, J. and Sineriz, F. 1998. High upflow velocity and organic loading rate improve granulation in UASB reactors. Water Journal of microbiology & biotechnology 14: 337-341.
- 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 an UASB reactor treating sugar cane molasses. International Biodeterioration & Biodegradation. 41: 127-131.
- Guiot, S.R., Pauss, A., and Costerton, J.W., 1992. A structured model of the anaerobic granule consortium. Water Science and Technology. 25(7): 1-10.
- Hamoda, M.F., and Al-Attar, I.M.S. 1996. Effect of high Sodium Chloride concentration on Activated Sludge Treatment. Water Science and Technology. 31: 61-72.
- Harada, H., Uemura, S., chen, A., and Jayadevan, J. ,1996. Anaerobic treatment of a recalcitrant distillery wastewater by a thermophilic UASB reactor. Bioresource Technology. 55 : 251-221.
- Hulshoff Pol, L.W., de Zeeuw, W.J., Velzeboer, C.T.M., and Lettinga, G. 1983. Granulation in UASB reactors. Water Science and Technology. 15: 291-304.
- Hulshoff Pol, L.W., de Castro Lopes, S.I., Lettinga, G., and Lens, P.N.L. 2004. Anaerobic sludge granulation. Water Research. 38: 1376-1389.
- Jeong, H.S., Kim, Y.H., Yeom, S.H., Song, B.K. and Lee, S.I. 2005. Facilitated UASB granule formation using organic-inorganic hybrid polymers. Process Biochemistry. 40: 89-94.
- Kato, M.T. 1994. The anaerobic treatment of low strength soluble wastewaters in UASB reactors. Journal of Fermentation and Bioengineering. 77: 679.
- Lettinga, G., Roersm, R., and Grin, P. 1980. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperature using a granular bed UASB reactor. Biotechnology and Bioengineering 22: 1701-1723.

- Lettinga, G., and Hulshoff Pol, L.W. 1991. UASB- Process design for various types of wastewater. Water Science and Technology. 24(8): 87-107.
- Li, A., and Guowei, G. 1993. The effect of Inorganic Salt on Activated Sludge Process Performance. Water Research. 33: 99-104.
- Ligero, P. and Soto, M. 2002. Sludge granulation during anaerobic treatment of pre-hydrolysed domestic wastewater. Water South Africa. 28(3): 307-311.
- Ludzack, F.K., and Noran, D.K. 1965. Tolerance of High Salinities by Conventional Wastewater Treatment Process. Journal of Water Pollution Control Federation.
- Mamouni, R.E., Leduc, R. and Guiot, S.R. 1998. Influence of synthetic and natural polymers on the anaerobic granulation process. Water Science and Technology. 38: 341-347.
- Pereira, M.A., Mota, M. and Alves, M.M. Operation of an anaerobic filter and an EGSB reactor for the treatment of an oleic acid-based effluent: influent of inoculum quality. Process Biochemistry. 37 (2002) : 1026-1031.
- 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.
- Sabry., T. Application of the UASB inoculate with flocculent and granular sludge in treating sewage at different hydraulic shock loads. Bioresource Technology. 99 (2008) : 4073-4077.
- Schmidt, J.E., and Ahring, B.K. 1995. Granular sludge formation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor. Biotechnology and Bioengineering. 49: 229-246
- Schulze, D., Fiebig, R. and Dellweg, H. 1988. Development of granular sludge in the UASB treatment of model wastewater containing gelatine. Bioresource Technology. 79: 203-206.
- Shin and Sik, H., 1991. Anaerobic digestion of distillery wastewater in a two-phase UASB system. Sixth international symposium on anaerobic digestion. Brasil : 351-361.
- Show, K.Y., Wang, Y., Foong, S.F., and Tay, J.H. 2004. Accelerated start-up and enhanced granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor. Water Research. 38: 2293-2304.

- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. Vanderbilt: University of Archae Press.
- Stander, G.J. 1996. Waterpollution research-a key to wastewater management. Journal of Water Pollution Control Federation. 38: 774.
- 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. Anaerobic sewage treatment. Chichester: John Wiley and Sons.
- Van langerak, E.P.A., Gonzalez-Gil, G., van aelst, A., Van lier, J.B., Hamelers, H.V.M., and Lettinga, G. 1998. Effects of High Calcium concentrations on the development of methanogenic sludge in Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) reactors. Water Research 32: 1255-1263.
- Vlissidis, A., 1993. Thermophilic anerobic digestion of alcohol distillery wastewater. Bioresource Technology. 43 : 131-140.
- Visser, A., Alphenaar, P.A., Gao, Y., van Rossum, G., and Lettinga, G. 1993. Granulation and immobilization of methanogenic and sulfate-reducing bacteria in high-rate anaerobic reactors. Applied and Environmental Microbiology 40: 575-581.
- Yu, H.Q., Fang, H.H.H., and Tay, J.H. 2001b. 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. 1999. Effects of powdered and granular activated carbons on start-up performance of UASB reactor. Environmental Technology 20: 1095-1101.
- Yu, H.Q., Tay, J.H., and Fang, H.H.P. 2001a. The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor Start-up. Water Research. 35: 1052-1060.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	พีเอช				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	6.41	8.05	7.63	7.65	7.85
2	6.17	8.42	7.95	7.64	7.50
3	6.44	8.33	7.51	7.28	6.94
4	6.15	7.86	7.31	7.10	7.42
5	6.19	7.26	7.24	6.71	7.42
8	6.37	7.01	7.08	6.66	7.27
9	6.03	7.12	6.12	5.89	6.40
10	6.50	7.04	7.19	6.87	7.27
11	6.89	7.53	7.49	7.18	7.20
12	6.19	7.44	7.12	6.81	7.16
15	6.21	7.00	7.11	6.80	6.94
16	6.94	7.27	7.35	7.32	7.13
17	6.21	7.00	7.22	6.95	7.03
18	6.82	7.10	7.37	7.13	7.11
19	6.24	6.98	7.26	6.95	6.90
22	6.36	7.03	7.10	7.00	7.18
23	6.43	7.16	7.23	7.07	6.94
24	6.32	7.12	7.00	6.94	7.03
25	6.66	7.25	7.16	7.13	7.16
26	6.34	7.20	7.15	6.99	7.01
29	6.57	7.25	7.26	7.08	7.06
30	6.38	7.18	7.34	7.15	7.12
31	6.52	7.21	7.05	7.02	7.01
32	6.68	7.35	7.26	7.20	7.19
33	6.46	7.08	7.02	6.98	7.00
36	6.70	6.87	6.79	6.84	6.88
37	6.42	7.01	6.92	6.92	7.00
38	6.15	6.77	6.94	6.79	6.86

ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	พีเอช				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
39	6.55	7.00	7.16	6.92	6.96
40	6.16	6.78	6.85	6.87	6.80
43	6.19	6.92	6.98	6.91	6.87
44	6.52	7.08	7.23	7.05	7.05
45	6.12	6.96	6.93	6.94	6.90
46	6.32	6.92	6.91	6.87	7.02
47	6.21	7.06	7.28	7.10	7.14
50	6.27	7.26	7.25	7.06	7.11
51	6.43	7.15	7.11	7.13	7.08
52	6.04	7.01	7.04	6.89	6.93
53	6.50	7.05	7.12	7.24	7.18
54	6.19	7.07	6.91	6.99	7.00
57	6.14	6.96	7.05	7.08	7.23
58	6.28	7.09	6.97	7.02	6.84
59	6.11	6.93	7.11	7.00	7.06
60	6.54	7.04	7.20	6.96	7.00
61	6.08	6.91	6.98	6.93	6.98
64	6.15	7.02	7.06	7.02	7.04
65	6.47	7.12	7.06	7.14	7.18
66	6.17	7.03	7.09	7.06	7.20
67	6.21	7.10	7.16	7.03	7.12
68	6.24	7.00	7.02	7.07	7.08
71	5.67	7.30	7.35	7.52	7.46
72	6.25	6.98	7.00	7.02	6.98
73	5.76	6.91	7.03	7.10	6.94
74	6.18	6.96	7.07	7.00	6.95
75	5.90	7.06	7.11	7.02	7.06
78	6.07	6.99	7.14	7.08	7.13
79	6.24	7.08	7.09	7.10	7.11
80	6.05	7.03	7.18	7.10	7.07
81	6.35	7.14	7.02	7.08	7.12
82	6.17	7.11	7.14	7.11	7.09

ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	พีเอช				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
85	6.15	7.10	7.16	7.07	7.20
86	6.43	6.97	6.96	6.99	7.04
87	6.13	7.06	7.07	7.10	7.09
88	6.31	7.07	6.94	7.21	7.10
89	6.27	7.04	6.96	7.07	7.04
92	5.76	6.98	7.02	6.98	6.99
93	6.22	7.10	7.12	7.09	7.06
94	5.64	7.20	7.14	7.07	7.13
95	6.52	7.14	7.13	7.20	7.15
96	5.61	7.07	7.03	6.98	7.02
99	5.64	7.09	7.08	7.08	7.15
100	6.24	7.04	7.14	7.08	7.19
101	5.68	7.04	7.11	7.15	7.18
102	6.32	7.12	7.06	7.10	7.08
103	5.70	7.07	7.15	7.12	7.18
106	5.72	7.08	7.10	7.03	7.13
107	6.28	6.92	7.03	7.03	7.00
108	5.82	7.10	7.08	7.07	7.05
109	6.41	7.14	7.11	7.04	7.09
110	5.88	7.04	7.10	7.13	7.14
113	5.94	7.06	7.05	7.09	7.11
114	6.07	7.09	7.10	7.10	7.12
115	5.92	7.16	7.08	7.05	7.10
116	6.41	7.13	7.07	7.12	7.14
117	6.01	7.01	7.01	7.05	7.08
120	5.97	7.05	7.09	7.03	7.10
121	6.48	7.03	7.07	7.06	7.11
122	5.96	7.03	7.08	7.11	7.15
123	6.70	7.10	7.10	7.08	7.14
124	6.02	7.07	7.10	7.07	7.03
127	5.90	7.04	7.05	7.07	7.11
128	6.32	7.09	7.10	7.08	7.08

ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าพีเอช				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
129	5.92	7.00	7.06	7.10	7.12
130	6.14	7.05	7.07	7.06	7.09
131	5.88	6.94	6.99	7.03	7.02
132	5.48	6.83	6.84	6.85	6.99
134	5.62	7.02	7.00	7.06	7.03
135	6.34	7.04	7.04	7.04	7.06
136	5.59	7.04	7.08	7.13	7.12
137	6.18	7.01	7.03	7.00	7.07
138	5.60	7.00	7.09	7.00	6.99
141	5.61	7.05	7.15	7.07	7.08
142	6.42	7.12	7.06	7.09	7.15
143	5.61	7.10	7.04	6.78	7.11
144	6.31	7.17	7.08	7.05	7.11
145	5.70	7.08	7.18	7.15	7.16
148	5.60	7.05	6.98	6.96	7.09
149	6.20	6.97	7.02	6.98	7.05
150	5.53	6.96	7.06	7.01	7.00
151	6.06	6.97	6.96	6.96	7.07
152	5.60	6.98	6.97	7.01	7.08
155	5.62	6.97	7.04	7.12	7.02
156	6.25	7.30	7.06	6.93	7.11
157	5.68	7.05	7.06	7.00	7.17
158	6.18	7.03	7.08	7.04	7.14
159	5.71	6.97	7.01	6.96	7.01
162	5.76	7.06	7.09	7.14	7.08
163	6.26	7.11	7.21	6.97	7.08
164	5.74	6.95	7.00	7.07	7.00
165	6.08	7.02	7.06	7.14	7.17
166	5.85	7.16	7.11	7.12	7.21
169	5.88	7.04	7.03	6.99	7.10
170	6.16	7.12	7.05	7.01	7.08
171	5.92	6.90	6.91	6.88	6.93

ตารางที่ ก.1 พีเอชตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าพีเอช				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
172	6.28	7.07	7.01	7.04	7.10
173	5.84	7.00	7.06	6.96	7.04

ตารางที่ ก. 2 คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	28.0	27.9	27.8	27.8	27.8
2	28.1	27.6	27.6	27.6	27.6
3	27.5	27.8	27.8	27.8	28.0
4	29.5	28.9	29.0	29.0	29.1
5	28.9	28.9	29.0	28.8	29.1
8	29.2	28.8	28.9	28.8	29.1
9	28.3	28.7	28.7	28.8	29.0
10	27.1	27.5	27.4	27.4	27.2
11	28.2	28.3	28.2	28.3	28.4
12	27.5	28.3	28.2	28.1	28.3
15	28.0	28.7	29.1	29.3	29.6
16	27.9	28.8	28.9	28.6	28.9
17	29.9	29.1	29.4	29.4	29.6
18	27.4	28.8	28.8	28.8	28.8
19	29.7	29.7	29.3	29.9	29.8
22	29.6	29.2	29.1	29.1	29.0
23	28.4	28.0	28.0	28.0	28.0
24	27.9	27.6	27.5	27.7	27.7
25	27.0	27.8	27.8	27.9	28.0
26	28.3	28.4	28.3	28.4	28.4
29	27.4	27.9	27.9	28.1	28.2
30	27.8	27.5	27.5	27.6	27.6
31	28.9	29.8	30.0	29.8	29.8
32	28.9	29.7	29.8	30.1	30.0
33	30.2	30.3	30.4	30.4	30.0
36	29.4	28.2	28.2	28.1	28.1

ตารางที่ ก.2 คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
37	29.3	29.9	28.8	29.9	30.0
38	28.5	29.4	29.7	29.5	29.7
39	28.7	29.1	29.1	29.2	29.2
40	30.3	29.0	29.0	28.9	29.0
43	28.4	28.7	28.7	28.6	28.6
44	29.0	29.2	29.2	29.3	29.4
45	30.3	28.3	28.8	28.7	29.1
46	29.8	28.4	28.5	28.5	28.5
47	29.2	27.2	27.3	27.3	27.2
50	30.1	27.8	27.8	27.8	27.5
51	28.5	27.0	27.1	27.0	27.0
52	29.5	29.8	29.8	29.7	29.5
53	29.6	29.3	29.3	29.3	29.3
54	29.0	27.4	27.5	27.6	27.6
57	28.8	28.1	28.2	28.2	28.2
58	29.4	28.6	28.4	28.3	28.3
59	28.6	27.6	27.6	27.7	27.6
60	27.8	27.1	27.1	27.2	27.1
61	29.5	27.8	27.8	27.8	27.8
64	28.3	28.3	28.2	28.3	28.4
65	27.1	27.7	27.6	27.4	27.4
66	28.2	28.5	28.5	28.5	28.5
67	28.5	28.1	28.2	28.1	28.2
68	29.1	27.6	27.8	27.6	27.6
71	29.0	28.9	28.8		28.5
72	27.0	27.8	27.6	27.6	27.7
73	28.6	28.0	27.9	27.9	27.9
74	28.5	28.3	28.3	28.3	28.3
75	26.0	26.6	26.5	26.4	26.4
78	27.5	26.3	26.3	26.3	26.3
79	28.4	26.8	26.8	26.8	27.0
80	28.0	26.7	26.7	26.7	26.7

ตารางที่ ก.2 คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
81	28.3	27.1	27.1	27.1	27.2
82	28.6	27.6	27.6	27.6	27.6
85	28.6	26.7	26.6	26.6	26.6
86	27.8	28.5	28.6	28.8	28.9
87	28.9	27.0	27.0	27.6	27.7
88	28.7	28.2	28.2	28.1	28.1
89	28.8	27.0	26.9	26.8	26.9
92	27.2	26.5	26.6	26.6	26.5
93	27.6	26.9	26.9	27.1	27
94	29.4	24.7	24.8	24.8	24.7
95	26.0	26.5	26.4	26.2	26.4
96	28.8	26.8	26.9	27.2	27.2
99	27.8	26.4	26.2	26.4	26.5
100	26.7	27.6	27.6	27.6	27.4
101	28.6	25.9	25.6	25.5	25.6
102	27.5	26.1	25.9	25.9	25.9
103	28.6	25.1	25.0	25.0	25.0
106	28.5	25.9	25.8	25.9	26.0
107	26.2	26.9	27.0	27.1	27.1
108	27.6	26.4	26.3	26.4	26.5
109	26.7	26.8	27.0	26.9	26.8
110	28.1	27.4	27.3	27.4	27.4
113	28.8	27.1	27.1	27.3	27.1
114	27.3	26.5	26.5	26.5	26.5
115	28.2	25.8	25.7	25.8	26.1
116	28.6	25.2	25.2	25.2	25.3
117	28.4	24.9	24.8	24.8	24.8
120	27.9	24.3	24.3	24.4	24.6
121	25.5	26.5	26.4	26.3	26.3
122	27.7	23.8	23.6	23.7	23.6
123	22.1	23.3	23.2	23.2	23.1
124	25.6	23.0	22.9	22.9	23.0

ตารางที่ ก.2 คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
127	26.1	24.6	24.3	24.3	24.2
128	27.4	25.4	25.4	25.4	25.4
129	27.6	25.8	25.7	25.5	25.5
130	28.1	26.3	26.3	26.3	26.4
131	28.9	25.8	25.7	25.7	25.7
132	30.3	29.4	28.7	29.1	29.3
134	29.9	27.9	27.5	27.9	28.3
135	30.0	28.3	28.3	28.6	28.6
136	30.2	27.3	27.6	27.5	27.6
137	29.8	28.3	28.3	28.3	28.3
138	29.6	27.2	27.2	27.4	27.4
141	29.1	26.9	26.8	26.8	26.8
142	23.3	24.5	24.5	24.6	24.6
143	27.4	23.3	23.4	23.5	23.6
144	22.0	23.5	23.7	23.7	23.9
145	26.5	24.4	24.4	24.5	24.6
148	27.3	24.9	24.9	24.8	24.8
149	25.5	26.9	26.8	26.8	26.9
150	28.3	26.0	26.0	25.9	26.1
151	27.4	27.9	27.8	27.9	27.8
152	29.3	26.6	26.7	26.8	26.7
155	29.4	27.2	27.2	27.0	27.0
156	30.2	28.0	27.9	28.2	28.2
157	29.0	25.9	26.0	25.6	25.3
158	25.4	26.5	26.5	26.4	26.4
159	28.4	25.4	25.2	25.1	25.4
162	28.6	26.9	26.9	26.9	27.2
163	27.8	27.9	27.8	27.7	28.0
164	29.9	26.2	25.7	26.0	26.3
165	29.2	27.2	27.2	27.3	27.6
166	28.9	25.6	25.7	25.9	26.0

ตารางที่ ก.2 คุณหมุมิตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
169	29.0	27.2	27.0	27.1	27.4
170	29.6	27.7	27.6	27.6	27.9
171	29.0	26.6	26.7	26.7	26.7
172	28.6	26.3	26.3	26.4	26.4
173	27.5	24.6	24.5	24.5	24.7

ตารางที่ ก.3 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	97.50	255.00	237.50	217.50	177.50
5	82.50	207.50	210.00	160.00	152.50
8	97.50	160.00	152.50	140.00	147.50
12	80.00	147.50	162.50	160.00	150.00
15	85.00	155.00	175.00	137.50	155.00
19	87.50	152.50	160.00	145.00	150.00
22	95.00	160.00	160.00	162.50	160.00
26	95.00	150.00	157.50	160.00	155.00
29	75.00	160.00	155.00	155.00	155.00
33	77.50	152.50	142.50	152.50	150.00
36	27.50	155.00	147.50	155.00	147.50
40	92.50	150.00	145.00	147.50	147.50
43	62.50	150.00	145.00	152.50	147.50
47	65.00	132.50	147.50	152.50	147.50
50	82.50	160.00	157.50	160.00	160.00
54	75.00	155.00	160.00	150.00	152.50
57	80.00	155.00	155.00	152.50	152.50
61	62.50	150.00	152.50	147.50	150.00
64	70.00	152.50	147.50	152.50	150.00
68	72.50	150.00	150.00	155.00	147.50
71	85.00	217.50	220.00	220.00	225.00
75	90.00	197.50	222.50	225.00	227.50
78	95.00	222.50	225.00	225.00	225.00

ตารางที่ ก.3 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
82	100.00	232.50	217.50	230.00	220.00
85	105.00	235.00	230.00	220.00	232.50
89	107.50	235.00	207.50	230.00	230.00
92	85.00	227.50	222.50	220.00	225.00
96	80.00	210.00	192.50	222.50	215.00
99	85.00	222.50	222.50	222.50	222.50
102	85.00	207.50	207.50	210.00	217.50
106	87.50	217.50	220.00	215.00	222.50
110	87.50	210.00	215.00	220.00	217.50
113	95.00	222.50	222.50	225.00	230.00
117	60.00	190.00	212.50	212.50	210.67
120	105.00	207.50	217.50	220.00	220.00
124	100.00	215.00	225.00	215.00	217.50
127	97.50	217.50	220.00	225.00	225.00
131	117.50	202.50	222.50	230.00	230.00
132	140.00	265.00	265.00	257.50	267.50
134	145.00	312.50	325.00	302.50	325.00
138	157.50	335.00	335.00	332.50	342.50
141	160.00	275.00	320.00	315.00	312.50
145	135.00	320.00	317.50	317.50	325.00
148	132.50	297.50	310.00	310.00	327.38
152	137.50	325.00	327.50	330.00	342.50
155	137.50	330.00	335.00	325.00	330.00
159	152.50	340.00	340.00	332.50	342.50
162	152.50	345.00	355.00	333.75	351.25
166	175.00	345.00	355.00	345.00	360.00
169	160.00	322.50	332.50	325.00	337.50
173	147.50	335.00	302.50	282.50	332.50

ตารางที่ ก.4 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	กรดไขมันระเหย (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	33.00	66.00	70.00	65.00	58.00
5	50.00	62.00	51.00	67.00	56.00
8	32.00	53.00	55.00	58.00	56.00
12	57.00	63.00	53.00	72.00	52.00
15	60.00	56.00	45.00	70.00	57.00
19	55.00	53.00	60.00	52.00	50.00
22	58.00	52.00	55.00	53.00	58.00
26	60.00	27.00	37.00	37.00	34.00
29	42.00	25.00	40.00	26.00	35.00
33	38.00	25.00	29.00	26.00	26.00
36	37.50	32.50	50.00	32.50	30.00
40	62.50	37.50	42.50	30.00	35.00
43	42.50	32.50	50.00	35.00	40.00
47	40.00	30.00	45.00	30.00	40.00
50	40.00	25.00	25.00	32.50	35.00
54	42.50	32.50	25.00	27.50	25.00
57	45.00	35.00	35.00	32.50	30.00
61	50.00	30.00	37.50	32.50	37.50
64	42.50	27.50	30.00	27.50	27.50
68	40.00	32.50	30.00	35.00	35.00
71	107.50	52.50	52.50	40.00	50.00
75	97.50	35.00	40.00	45.00	42.50
78	97.50	50.00	47.50	40.00	42.50
82	95.00	60.00	35.00	40.00	40.00
85	97.50	42.50	40.00	40.00	40.00
89	97.50	37.50	40.00	40.00	40.00
92	105.00	37.50	40.00	37.50	37.50
96	107.50	37.50	37.50	37.50	37.50
99	110.00	40.00	45.00	37.50	37.50
103	107.50	40.00	37.50	40.00	40.00
106	102.50	42.50	42.50	35.00	40.00
110	107.50	37.50	42.50	42.50	42.50

ตารางที่ ก.4 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	กรดไขมันระเหย (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
113	105.00	40.00	37.50	42.50	42.50
117	102.50	37.50	40.00	40.00	35.00
120	102.50	40.00	35.00	40.00	40.00
124	97.50	37.50	37.50	37.50	35.00
127	105.00	40.00	40.00	40.00	42.50
131	105.00	37.5	40.00	42.5	37.50
132	172.50	45.00	50.00	45.00	45.00
134	170.00	55.00	60.00	50.00	55.00
138	175.00	57.50	57.50	50.00	52.50
141	175.00	55.00	55.00	52.50	55.00
145	175.00	57.50	55.00	55.00	60.00
148	170.00	47.50	52.50	52.50	41.66
152	177.50	45.00	45.00	47.50	50.00
155	175.00	45.00	50.00	47.50	50.00
159	172.50	47.50	50.00	47.50	47.50
162	170.00	50.00	47.50	45.00	45.00
166	182.50	55.00	60.00	60.00	57.50
169	177.50	50.00	55.00	55.00	52.50
173	180.00	55.00	50.00	45.00	50.00

ตารางที่ ก.5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	0.34	0.26	0.29	0.30	0.33
5	0.61	0.30	0.24	0.42	0.37
8	0.33	0.33	0.36	0.41	0.38
12	0.71	0.43	0.33	0.45	0.35
15	0.71	0.36	0.26	0.51	0.37
19	0.63	0.35	0.38	0.36	0.33
22	0.61	0.33	0.34	0.33	0.36
26	0.63	0.18	0.23	0.23	0.22

ตารางที่ ก.5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถึงปฏิกรณ์ที่ 1	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3	ถึงปฏิกรณ์ที่ 4
29	0.56	0.16	0.26	0.17	0.23
33	0.49	0.16	0.20	0.17	0.17
36	1.36	0.21	0.34	0.21	0.20
40	0.68	0.25	0.29	0.20	0.24
43	0.68	0.22	0.34	0.23	0.27
47	0.62	0.23	0.31	0.20	0.27
50	0.48	0.16	0.16	0.20	0.22
54	0.57	0.21	0.16	0.18	0.16
57	0.56	0.23	0.23	0.21	0.20
61	0.80	0.20	0.25	0.22	0.25
64	0.61	0.18	0.20	0.18	0.18
68	0.55	0.22	0.20	0.23	0.24
71	1.26	0.24	0.24	0.18	0.22
75	1.08	0.18	0.18	0.20	0.19
78	1.03	0.22	0.21	0.18	0.19
82	0.95	0.26	0.16	0.17	0.18
85	0.93	0.18	0.17	0.18	0.17
89	0.91	0.16	0.19	0.17	0.17
92	1.24	0.16	0.18	0.17	0.17
96	1.34	0.18	0.19	0.17	0.17
99	1.29	0.18	0.20	0.17	0.17
103	1.26	0.19	0.18	0.19	0.18
106	1.17	0.20	0.19	0.16	0.18
110	1.23	0.18	0.20	0.19	0.20
113	1.11	0.18	0.17	0.19	0.18
117	1.71	0.20	0.19	0.19	0.17
120	0.98	0.19	0.16	0.18	0.18
124	0.98	0.17	0.17	0.17	0.16
127	1.08	0.18	0.18	0.18	0.19
131	0.89	0.19	0.18	0.18	0.16
132	1.23	0.17	0.19	0.17	0.17
134	1.17	0.18	0.18	0.17	0.17

ตารางที่ ก.5 กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
138	1.11	0.17	0.17	0.15	0.15
141	1.09	0.20	0.17	0.17	0.18
145	1.30	0.18	0.17	0.17	0.18
148	1.28	0.16	0.17	0.17	0.13
152	1.29	0.14	0.14	0.14	0.15
155	1.27	0.14	0.15	0.15	0.15
159	1.13	0.14	0.15	0.14	0.14
162	1.11	0.14	0.13	0.13	0.13
166	1.04	0.16	0.17	0.17	0.16
169	1.11	0.16	0.17	0.17	0.16
173	1.22	0.16	0.17	0.16	0.15

ตารางที่ ก.6 ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	504.00	417.60	360.00	360.00	331.20
3	506.68	296.06	277.04	277.04	286.80
5	487.68	335.28	284.48	386.08	325.12
8	543.78	369.36	328.32	400.14	348.84
10	452.64	314.88	285.36	344.40	314.88
12	553.20	326.04	368.16	355.68	306.28
15	403.20	240.00	268.80	236.68	278.40
17	468.00	262.08	224.64	318.24	318.24
19	485.90	228.37	252.52	277.45	289.50
22	492.62	258.18	269.76	228.87	237.98
24	496.38	284.08	219.80	240.74	257.27
26	514.38	229.48	245.22	210.00	222.85
29	510.16	236.36	250.18	218.50	229.52
31	449.32	181.64	220.14	210.32	221.36
33	479.44	212.06	221.28	193.62	230.00
36	507.52	214.72	204.96	224.48	214.72
38	493.76	213.35	239.47	219.23	245.85

ตารางที่ ก.6 ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
40	479.40	222.70	214.20	173.40	214.20
43	510.00	244.80	250.66	234.60	244.80
45	504.70	195.70	236.90	216.30	206.00
47	510.00	193.80	244.80	234.60	224.40
50	516.40	185.91	184.25	201.36	211.73
52	524.78	252.03	236.80	230.48	193.24
54	489.60	183.60	163.20	193.80	173.40
57	503.35	194.90	209.08	201.34	234.91
59	510.88	218.24	235.76	198.40	198.40
61	577.68	209.16	249.00	229.08	249.00
64	500.58	199.26	208.98	223.56	228.42
66	539.46	189.54	223.56	218.70	233.28
68	487.60	211.60	216.20	220.80	220.80
71	1034.28	556.92	570.96	472.68	542.88
73	1016.96	488.32	470.40	474.88	483.84
75	1029.68	390.40	405.04	444.08	468.48
78	993.96	487.94	512.04	461.84	461.84
80	986.58	447.12	476.28	408.24	427.68
82	1010.16	478.24	419.68	424.56	468.48
85	1043.70	475.30	485.10	480.20	509.60
87	1065.22	457.90	433.80	438.62	419.34
89	1015.88	414.74	419.40	424.06	405.42
92	1018.74	487.65	494.62	498.40	483.38
94	983.26	391.44	391.44	363.48	386.78
96	1028.58	445.56	417.12	450.30	426.60
99	1101.62	449.54	474.24	459.42	419.90
101	1009.56	451.20	399.50	441.80	385.40
103	1137.60	427.20	422.40	456.00	427.20
106	1033.90	494.90	421.40	401.80	441.00
108	1000.16	471.24	412.68	417.56	461.48
110	1032.70	460.35	470.15	465.31	494.65
113	1047.25	445.09	421.08	426.26	407.43

ตารางที่ ก.6 ค่าซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
115	1008.60	468.38	452.64	432.96	413.28
117	1060.80	571.20	484.50	464.10	469.20
120	967.68	436.68	362.88	433.44	393.12
122	1031.24	406.40	421.64	441.96	401.32
124	1085.44	501.76	378.88	414.72	409.60
127	1028.90	484.90	411.40	391.80	431.00
129	1006.88	401.74	414.40	419.06	400.42
131	1029.00	419.98	379.50	379.5	374.44
132	1503.84	626.60	636.24	582.25	607.32
134	1474.20	631.80	619.44	631.80	627.12
136	1545.24	692.04	644.64	663.60	663.60
138	1512.00	659.33	652.80	668.93	675.26
141	1552.28	678.48	654.63	657.92	654.63
143	1581.00	659.74	668.10	656.27	657.90
145	1578.05	663.65	658.57	680.72	694.13
148	1375.71	532.50	535.68	562.27	545.60
150	1610.00	651.18	615.00	675.00	665.00
152	1546.80	625.00	670.00	676.80	656.80
155	1505.00	616.80	610.00	635.00	630.00
157	1563.40	686.80	655.00	633.40	670.00
159	1490.00	745.00	735.00	676.80	693.40
162	1495.07	638.26	618.11	635.04	592.91
164	1548.12	634.99	689.47	653.29	645.64
166	1466.40	682.00	657.20	657.20	629.64
169	1505.77	667.09	654.36	657.45	654.36
171	1505.61	666.63	631.94	647.67	628.71
173	1453.92	667.87	643.08	677.19	581.01

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	17.14	28.57	28.57	34.29
3	41.57	45.32	45.32	43.40
5	31.25	41.67	20.83	33.33
8	32.08	39.62	26.42	35.85
10	30.43	36.96	23.91	30.43
12	41.06	33.45	35.70	44.63
15	40.48	33.33	41.30	30.95
17	44.00	52.00	32.00	32.00
19	53.00	48.03	42.90	40.42
22	47.59	45.24	53.54	51.69
24	42.77	55.72	51.50	48.17
26	55.39	52.33	59.17	56.68
29	53.67	50.96	57.17	55.01
31	59.57	51.01	53.19	50.73
33	55.77	53.85	59.62	52.03
36	57.69	59.62	55.77	57.69
38	56.79	51.50	55.60	50.21
40	53.55	55.32	63.83	55.32
43	52.00	50.85	54.00	52.00
45	61.22	53.06	57.14	59.18
47	62.00	52.00	54.00	56.00
50	64.00	64.32	61.01	59.00
52	51.97	54.88	56.08	63.18
54	62.50	66.67	60.42	64.58
57	61.28	58.46	60.00	53.33
59	57.28	53.85	61.17	61.17
61	63.79	56.90	60.34	56.90
64	60.19	58.25	55.34	54.37
66	64.86	58.56	59.46	56.76
68	56.60	55.66	54.72	54.72
71	46.15	44.80	54.30	47.51
73	51.98	53.74	53.30	52.42

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
75	62.09	60.66	56.87	54.50
78	50.91	48.48	53.54	53.54
80	54.68	51.72	58.62	56.65
82	52.66	58.45	57.97	53.62
85	54.46	53.52	53.99	51.17
87	57.01	59.28	58.82	60.63
89	59.17	58.72	58.26	60.09
92	52.13	51.45	51.08	52.55
94	60.19	60.19	63.03	60.66
96	56.68	59.45	56.22	58.53
99	59.19	56.95	58.30	61.88
101	55.31	60.43	56.24	61.82
103	62.45	62.87	59.92	62.45
106	52.13	59.24	61.14	57.35
108	52.88	58.74	58.25	53.86
110	55.42	54.47	54.94	52.10
113	57.50	59.79	59.30	61.10
115	53.56	55.12	57.07	59.02
117	46.15	54.33	56.25	55.77
120	54.87	62.50	55.21	59.38
122	60.59	59.11	57.14	61.08
124	53.77	65.09	61.79	62.26
127	52.87	60.02	61.92	58.11
129	60.10	58.84	58.38	60.23
131	59.19	63.12	63.12	63.61
132	58.33	57.69	61.28	59.62
134	57.14	57.98	57.14	57.46
136	55.21	58.28	57.06	57.06
138	56.39	56.83	55.76	55.34
141	56.29	57.83	57.62	57.83
143	58.27	57.74	58.49	58.39
145	57.94	58.27	56.86	56.01

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
148	61.29	61.06	59.13	60.34
150	59.55	61.80	58.07	58.70
152	59.59	56.68	56.25	57.54
155	59.02	59.47	57.81	58.14
157	56.07	58.10	59.49	57.14
159	50.00	50.67	54.58	53.46
162	57.31	58.66	57.52	60.34
164	58.98	55.46	57.80	58.30
166	53.49	55.18	55.18	57.06
169	55.70	56.54	56.34	56.54
171	55.72	58.03	56.98	58.24
173	54.06	55.77	53.42	60.04

ตารางที่ ก.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	109	12	28	31	21
3	107	25	10	19	43
5	169	33	26	40	57
8	111	29	32	31	24
10	157	45	28	30	49
12	128	30	27	26	42
15	117	70	59	28	56
17	103	50	68	54	63
19	113	41	56	43	60
22	98	64	28	38	69
24	103	62	26	41	32
26	121	37	30	43	63
29	175	77	51	16	57
31	77	33	49	28	49
33	103	28	29	96	81
36	85	21	19	14	49

ตารางที่ ก.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
38	135	57	43	44	62
40	99	40	72	64	24
43	90	27	50	55	37
45	78	58	21	63	43
47	86	39	27	49	44
50	101	50	35	37	53
52	100	55	61	49	40
54	136	57	48	57	50
57	96	65	49	44	32
59	93	54	49	52	30
61	83	37	58	54	25
64	96	43	53	47	60
66	91	48	61	57	46
68	108	53	46	55	58
71	86	50	15	21	21
73	81	31	25	20	28
75	71	36	19	16	13
78	88	28	17	19	27
80	93	17	19	20	24
82	97	19	29	20	29
85	86	21	21	16	31
87	92	9	34	18	19
89	90	19	28	16	27
92	58	23	18	27	29
94	51	9	27	14	33
96	45	12	13	12	16
99	49	10	75	13	22
101	53	21	17	15	9
103	45	9	23	14	24
106	62	9	19	22	28
108	64	16	41	39	14
110	60	35	10	26	30

ตารางที่ ก.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)				
	น้ำเข้า	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
113	47	19	26	14	14
115	67	12	49	17	24
117	63	28	29	14	18
120	68	126	59	41	28
122	53	16	19	19	16
124	66	23	13	12	20
127	59	33	18	21	38
129	54	12	30	26	22
131	57	26	29	22	18
132	83	35	30	24	12
134	95	32	32	21	18
136	88	31	32	26	24
138	93	32	41	29	12
141	101	31	63	19	41
143	70	34	44	33	32
145	86	31	50	38	34
148	86	44	60	30	24
150	113	33	48	35	33
152	106	38	37	34	25
155	114	45	43	34	28
157	111	49	40	30	22
159	63	44	33	31	27
162	58	43	35	26	21
164	56	31	27	19	22
166	56	31	23	18	16
169	61	26	26	24	24
171	76	21	31	24	23
173	93	19	24	19	20

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
1	88.99	74.31	71.56	80.73
3	76.64	90.65	82.24	59.81
5	80.47	84.62	76.33	66.27
8	73.87	71.17	72.07	78.38
10	71.34	82.17	80.89	68.79
12	76.56	78.91	79.69	67.19
15	40.17	49.57	76.07	52.14
17	51.46	33.98	47.57	38.83
19	63.72	50.44	61.95	46.90
22	34.69	71.43	61.22	29.59
24	39.81	74.76	60.19	68.93
26	69.42	75.21	64.46	47.93
29	56.00	70.86	90.86	67.43
31	57.14	36.36	63.64	36.36
33	72.82	71.84	6.80	21.36
36	75.29	77.65	83.53	42.35
38	57.78	68.15	67.41	54.07
40	59.60	27.27	35.35	75.76
43	70.00	44.44	38.89	58.89
45	25.64	73.08	19.23	44.87
47	54.65	68.60	43.02	48.84
50	50.50	65.35	63.37	47.52
52	45.00	39.00	51.00	60.00
54	58.09	64.71	58.09	63.24
57	32.29	48.96	54.17	66.67
59	41.94	47.31	44.09	67.74
61	55.42	30.12	34.94	69.88
64	55.21	44.79	51.04	37.50
66	47.25	32.97	37.36	49.45
68	50.93	57.41	49.07	46.30
71	41.86	82.56	75.58	75.58
73	61.73	69.14	75.31	65.43

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
75	49.30	73.24	77.46	81.69
78	68.18	80.68	78.41	69.32
80	81.72	79.57	78.49	74.19
82	80.41	70.10	79.38	70.10
85	75.58	75.58	81.40	63.95
87	90.22	63.04	80.43	79.35
89	78.89	68.89	82.22	70.00
92	60.34	68.97	53.45	50.00
94	82.35	47.06	72.55	35.29
96	73.33	71.11	73.33	64.44
99	79.59	-53.06	73.47	55.10
101	60.38	67.92	71.70	83.02
103	80.00	48.89	68.89	46.67
106	85.48	69.35	64.52	54.84
108	75.00	35.94	39.06	78.13
110	41.67	83.33	56.67	50.00
113	59.57	44.68	70.21	70.21
115	82.09	26.87	74.63	64.18
117	55.56	53.97	77.78	71.43
120	-85.29	13.24	39.71	58.82
122	69.81	64.15	64.15	69.81
124	65.15	80.30	81.82	69.70
127	44.07	69.49	64.41	35.59
129	77.78	44.44	51.85	59.26
131	54.39	49.12	61.40	68.42
132	57.83	63.86	71.08	85.54
134	66.32	66.32	77.89	81.05
136	64.77	63.64	70.45	72.73
138	65.59	55.91	68.82	87.10
141	69.31	37.62	81.19	59.41
143	51.43	37.14	52.86	54.29
145	63.95	41.86	55.81	60.47

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
148	48.66	29.99	64.99	72.00
150	70.80	57.52	69.03	70.80
152	64.15	65.09	67.92	76.42
155	60.53	62.28	70.18	75.44
157	55.86	63.96	72.97	80.18
159	30.16	47.62	50.79	57.14
162	25.86	39.66	55.17	63.79
164	44.64	51.79	66.07	60.71
166	44.64	58.93	67.86	71.43
169	57.38	57.38	60.66	60.66
171	72.37	59.21	68.42	69.74
173	79.57	74.19	79.57	78.49

ตารางที่ ก.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4

วันที่ทำการทดลอง	ปริมาณก๊าซ (มล./วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
40	408	480	456	456
43	336	432	432	384
45	504	456	360	408
47	504	504	528	504
50	552	456	504	552
52	432	480	480	408
54	408	408	432	504
57	336	384	528	576
59	384	336	456	456
61	576	432	480	336
64	480	480	528	432
66	576	480	528	480
68	384	384	576	480
71	494	494	521	549
73	576	576	624	768

ตารางที่ ก.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ปริมาณก๊าซ (มล./วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
75	768	480	528	672
78	768	576	720	864
80	576	480	528	624
82	1056	768	960	960
85	960	1008	1152	1056
87	1344	1104	1248	1152
89	816	1056	960	960
92	624	864	960	816
94	720	960	1056	864
96	864	864	1152	1008
99	720	816	768	768
101	960	624	576	480
103	672	624	768	576
106	864	816	960	960
108	768	864	1056	864
110	720	768	864	624
113	960	1152	1152	1008
115	672	768	864	768
117	672	576	672	1056
120	864	576	1056	864
122	768	864	576	768
124	768	1008	1152	960
127	720	1248	1080	1080
129	1056	1008	960	1056
131	960	1104	1152	1152
132	768	672	1152	960
134	1248	864	1248	1563
136	672	672	1440	1248
138	1248	1056	1056	1152
141	1248	1152	1248	1584
143	1056	1248	1440	1152
145	1152	1056	1440	1344

ตารางที่ ก.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ปริมาณก๊าซ (มล./วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
148	1344	1152	1344	1536
150	1152	1056	1584	1248
152	1344	1248	1344	1248
155	1152	1152	1536	1056
157	1344	1056	1632	1536
159	1339	1339	1440	1584
162	1440	1344	1872	1728
164	1224	1344	1872	1152
166	1488	1392	1776	1680
169	1368	1260	1224	1620
171	1404	1152	1584	1536
173	1222	1123	1457	1385

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
การแปรผลข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 การแปรผลข้อมูลค่าพีเอชตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	พีเอช	พีเอช	พีเอช
น้ำเข้า			
ค่าเฉลี่ย	6.35	6.07	5.89
จำนวน	50	45	31
SD	0.22	0.27	0.29
ค่าสูงสุด	6.94	6.70	6.42
ค่าต่ำสุด	6.03	5.61	5.48
ถังปฏิกรณ์1			
ค่าเฉลี่ย	7.17	7.06	7.04
จำนวน	50	45	31
SD	0.34	0.07	0.09
ค่าสูงสุด	8.42	7.30	7.30
ค่าต่ำสุด	6.77	6.91	6.83
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	7.13	7.08	7.04
จำนวน	50	45	31
SD	0.25	0.07	0.07
ค่าสูงสุด	7.95	7.35	7.21
ค่าต่ำสุด	6.12	6.94	6.84
ถังปฏิกรณ์3			
ค่าเฉลี่ย	7.01	7.08	7.02
จำนวน	50	45	31
SD	0.25	0.08	0.09
ค่าสูงสุด	7.65	7.52	7.15
ค่าต่ำสุด	5.89	6.98	6.78
ถังปฏิกรณ์4			
ค่าเฉลี่ย	7.08	7.10	7.08
จำนวน	50	45	31
SD	0.21	0.08	0.06
ค่าสูงสุด	7.85	7.46	7.21
ค่าต่ำสุด	6.4	6.94	6.93

ตารางที่ ข.2 การแปรผลข้อมูลค่าอุณหภูมิตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
น้ำเข้า			
ค่าเฉลี่ย	28.69	27.7	28.3
จำนวน	50	45	31
SD	0.89	1.30	1.98
ค่าสูงสุด	30.3	29.4	30.3
ค่าต่ำสุด	27.0	22.1	22
ถังปฏิกรณ์1			
ค่าเฉลี่ย	28.4	26.3	26.5
จำนวน	50	45	31
SD	0.81	1.31	1.46
ค่าสูงสุด	30.3	28.9	29.4
ค่าต่ำสุด	27.0	23.0	23.3
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	28.5	26.3	26.5
จำนวน	50	45	31
SD	0.81	1.34	1.39
ค่าสูงสุด	30.4	28.8	28.7
ค่าต่ำสุด	27.1	22.9	23.4
ถังปฏิกรณ์3			
ค่าเฉลี่ย	28.5	26.3	26.5
จำนวน	50	45	31
SD	0.84	1.35	1.44
ค่าสูงสุด	30.4	28.8	29.1
ค่าต่ำสุด	27.0	22.9	23.5
ถังปฏิกรณ์4			
ค่าเฉลี่ย	28.5	26.3	26.6
จำนวน	50	45	31
SD	0.86	1.35	1.46
ค่าสูงสุด	30.0	28.9	29.3
ค่าต่ำสุด	27.0	23.0	23.6

ศูนย์วิทยพัทธยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 การแปรผลข้อมูลค่าสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	สภาพต่างทั้งหมด(มก./ล.)	สภาพต่างทั้งหมด(มก./ล.)	สภาพต่างทั้งหมด(มก./ล.)
น้ำเข้า			
ค่าเฉลี่ย	78.13	92.64	148.65
จำนวน	20	18	13
SD	16.30	12.85	12.40
ค่าสูงสุด	97.50	117.50	175.00
ค่าต่ำสุด	27.50	60.00	132.50
ถังปฏิกรณ์1	160.50	216.11	319.04
ค่าเฉลี่ย	20	18	13
จำนวน	26.11	12.55	25.55
SD	255.00	235.00	345.00
ค่าสูงสุด	132.50	190.00	265.00
ค่าต่ำสุด			
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	161.00	217.92	324.62
จำนวน	20	18	13
SD	23.19	8.63	23.63
ค่าสูงสุด	237.50	230.00	355.00
ค่าต่ำสุด	142.50	192.50	265.00
ถังปฏิกรณ์3			
ค่าเฉลี่ย	155.75	221.53	316.06
จำนวน	20	18	13
SD	15.98	5.82	23.85
ค่าสูงสุด	217.50	230.00	345.00
ค่าต่ำสุด	137.50	210.00	257.50
ถังปฏิกรณ์4			
ค่าเฉลี่ย	152.75	222.95	330.47
จำนวน	20	18	13
SD	7.02	5.93	22.64
ค่าสูงสุด	177.50	232.50	360.00
ค่าต่ำสุด	147.50	210.67	267.50

ตารางที่ ข.4 การแปรผลข้อมูลค่าการดไขมันระเหยตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	กรดไขมันระเหย (มก./ล.)	กรดไขมันระเหย (มก./ล.)	กรดไขมันระเหย (มก./ล.)
น้ำเข้า			
ค่าเฉลี่ย	46.38	102.78	174.81
จำนวน	20	18	13
SD	9.47	4.61	3.88
ค่าสูงสุด	62.50	110.00	182.50
ค่าต่ำสุด	32.00	95.00	170.00
ถังปฏิกรณ์1			
ค่าเฉลี่ย	38.98	41.39	51.15
จำนวน	20	18	13
SD	13.73	6.43	4.85
ค่าสูงสุด	66.00	60.00	57.50
ค่าต่ำสุด	25.00	35.00	45.00
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	41.63	40.56	52.88
จำนวน	20	18	13
SD	11.32	4.33	4.66
ค่าสูงสุด	70.00	52.50	60.00
ค่าต่ำสุด	25.00	35.00	45.00

ถังปฏิกรณ์3

ค่าเฉลี่ย	41.18	39.86	50.19
จำนวน	20	18	13
SD	15.93	2.34	4.62
ค่าสูงสุด	72.00	45.00	60.00
ค่าต่ำสุด	26.00	35.00	45.00

ถังปฏิกรณ์4

ค่าเฉลี่ย	40.10	40.14	50.90
จำนวน	20	18	13
SD	10.95	3.48	5.28
ค่าสูงสุด	58.00	50.00	60.00
ค่าต่ำสุด	25.00	35.00	41.66

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 การแปรผลข้อมูลค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด		
น้ำเข้า			
ค่าเฉลี่ย	0.63	1.14	1.18
จำนวน	20	18	13
SD	0.21	0.20	0.09
ค่าสูงสุด	1.36	1.71	1.30
ค่าต่ำสุด	0.33	0.89	1.04
ถังปฏิกรณ์1			
ค่าเฉลี่ย	0.25	0.19	0.16
จำนวน	20	18	13
SD	0.08	0.03	0.02
ค่าสูงสุด	0.43	0.26	0.20
ค่าต่ำสุด	0.16	0.16	0.14
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	0.27	0.19	0.16
จำนวน	20	18	13
SD	0.07	0.02	0.02
ค่าสูงสุด	0.38	0.24	0.19
ค่าต่ำสุด	0.16	0.16	0.13
ถังปฏิกรณ์3			
ค่าเฉลี่ย	0.27	0.18	0.16
จำนวน	20	18	13
SD	0.10	0.01	0.01
ค่าสูงสุด	0.51	0.20	0.17
ค่าต่ำสุด	0.17	0.16	0.13
ถังปฏิกรณ์4			
ค่าเฉลี่ย	0.27	0.18	0.15
จำนวน	20	18	13
SD	0.07	0.01	0.02
ค่าสูงสุด	0.38	0.22	0.18
ค่าต่ำสุด	0.16	0.16	0.13

ตารางที่ ข.6 การแปรผลข้อมูลค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกระหว่างอินทรีย์					
	2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน		4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน		6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน	
	ซีไอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ซีไอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ซีไอดี(มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
น้ำเข้า						
ค่าเฉลี่ย	500.10		1029.94		1516.44	
จำนวน	30		27		19	
SD	32.57		36.66		54.09	
ค่าสูงสุด	577.68		1137.60		1610.00	
ค่าต่ำสุด	403.20		967.68		1375.71	
ถึงปฏิกรณ์ 1						
ค่าเฉลี่ย	244.03	51.05	459.71	55.34	653.99	56.86
จำนวน	30	30	27	27	19	19
SD	58.93	11.89	43.99	4.25	41.97	2.60
ค่าสูงสุด	417.60	64.86	571.20	62.45	745.00	61.29
ค่าต่ำสุด	181.64	17.14	390.40	46.15	532.50	50.00
ถึงปฏิกรณ์ 2						
ค่าเฉลี่ย	246.45	50.60	437.90	57.45	644.70	57.48
จำนวน	30	30	27	27	19	19
SD	45.52	9.11	46.92	4.67	39.17	2.36
ค่าสูงสุด	368.16	66.67	570.96	65.09	735.00	61.80
ค่าต่ำสุด	163.20	28.57	362.88	44.80	535.68	50.67
ถึงปฏิกรณ์ 3						
ค่าเฉลี่ย	249.26	50.00	436.56	57.59	648.87	57.20
จำนวน	30	30	27	27	19	19
SD	61.70	12.53	31.69	3.05	31.47	1.80
ค่าสูงสุด	400.14	63.83	498.40	63.12	680.72	61.28
ค่าต่ำสุด	173.40	20.83	363.48	51.08	562.27	53.42
ถึงปฏิกรณ์ 4						
ค่าเฉลี่ย	249.71	49.80	437.55	57.48	640.69	57.77
จำนวน	30	30	27	27	19	19
SD	45.69	10.15	42.13	4.23	38.25	1.74
ค่าสูงสุด	348.84	64.58	542.88	63.61	694.13	60.34
ค่าต่ำสุด	173.40	30.43	374.44	47.51	545.60	53.46

ตารางที่ ข.7 การแปรผลข้อมูลค่าแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอด

การทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์					
	2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน		4 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน		6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน	
	SS(มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SS(มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SS(มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
น้ำเข้า						
ค่าเฉลี่ย	109		66.85		84.67	
จำนวน	30		27		19	
SD	24.76		16.36		19.74	
ค่าสูงสุด	175.00		97.00		114.00	
ค่าต่ำสุด	77.00		45.00		56.00	
ตั้งปฏิกรณ์1						
ค่าเฉลี่ย						
จำนวน	45	57.76	24.78	62.56	34.21	57.57
SD	30	30	27	27	19	19
ค่าสูงสุด	15.66	15.58	22.61	32.67	8.01	13.97
ค่าต่ำสุด	77.00	88.99	126.00	90.22	49.00	79.57
	12.00	25.64	9.00	-85.29	19.00	25.86
ตั้งปฏิกรณ์2						
ค่าเฉลี่ย						
จำนวน	41	60.20	26.74	57.35	37.84	54.42
SD	30	30	27	27	19	19
ค่าสูงสุด	16.08	18.16	14.65	28.29	11.38	12.12
ค่าต่ำสุด	72.00	90.65	75.00	83.33	63.00	74.19
	10.00	27.27	10.00	-53.06	23.00	29.99
ตั้งปฏิกรณ์3						
ค่าเฉลี่ย						
จำนวน	44	57.54	19.78	69.20	27.05	66.93
SD	30	30	27	27	19	19
ค่าสูงสุด	16.77	19.70	7.18	12.09	6.21	8.62
ค่าต่ำสุด	96.00	90.86	41.00	82.22	38.00	81.19
	14.00	6.80	12.00	39.06	18.00	50.79
ตั้งปฏิกรณ์4						
ค่าเฉลี่ย						
จำนวน	47	55.46	23.04	64.24	24.11	70.39
SD	30	30	27	27	19	19
ค่าสูงสุด	14.79	14.83	6.95	12.66	7.39	9.84
ค่าต่ำสุด	81.00	80.73	38.00	83.02	41.00	87.10
	21.00	21.36	9.00	35.29	12.00	54.29

ตารางที่ ข.8 การแปรผลข้อมูลค่าก๊าซชีวภาพตลอดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ภาวะบรรทุกลำสารอินทรีย์		
	2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
	ก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	ก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	ก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
ถังปฏิกรณ์1			
ค่าเฉลี่ย	452	804	1222
จำนวน	13	27	18
SD	85.33	180.42	214.75
ค่าสูงสุด	576.00	1344.00	1488.00
ค่าต่ำสุด	336.00	494.00	672.00
ถังปฏิกรณ์2			
ค่าเฉลี่ย	439	817	1123
จำนวน	13	27	18
SD	49.37	223.96	211.70
ค่าสูงสุด	504.00	1248.00	1392.00
ค่าต่ำสุด	336.00	480.00	672.00
ถังปฏิกรณ์3			
ค่าเฉลี่ย		891	1457
จำนวน	13	27	18
SD	57.00	231.08	234.83
ค่าสูงสุด	576.00	1248.00	1872.00
ค่าต่ำสุด	360.00	521.00	1056.00
ถังปฏิกรณ์4			
ค่าเฉลี่ย	460	862	1385
จำนวน	13	27	18
SD	67.06	188.34	236.26
ค่าสูงสุด	576.00	1152.00	1728.00
ค่าต่ำสุด	336.00	480.00	960.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการวิเคราะห์เม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ตารางที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง

ภาวะบรรทุก สารอินทรีย์	วันที่ทำการ ทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ไมโครเมตร)		
			D(0.1)	D(0.5)	D(0.9)
	ตะกอนเริ่มต้น	1,2,3,4	0.06	4.08	71.94
2	22	1	0.08	74.77	207.17
		2	0.08	62.26	208.26
		3	0.09	133.28	475.02
		4	0.07	50.12	179.08
	68	1	39.82	113.12	263.12
		2	40.44	138.45	351.78
		3	60.02	226.01	598.21
		4	58.30	214.84	526.73
4	101	1	45.04	119.32	259.17
		2	48.93	160.07	360.30
		3	66.14	268.16	674.84
		4	75.80	253.49	551.20
	131	1	54.69	150.96	396.60
		2	56.34	171.59	395.37
		3	54.09	226.80	603.57
		4	51.49	227.99	555.20
6	152	1	48.09	153.99	354.79
		2	58.69	176.36	381.37
		3	58.43	261.14	700.67
		4	72.37	277.15	590.86
	173	1	63.76	172.25	388.91
		2	56.19	172.53	385.07
		3	77.09	254.29	615.60
		4	87.15	299.95	614.26

ตารางที่ ค.2 เปอร์เซ็นต์สัดส่วนโดยน้ำหนักเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ภาวะบรรจุทุก สารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ ลบ.ม.-วัน)	วันที่ทำ การ ทดลอง	ขนาดเม็ดตะกอน (ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์สัดส่วนโดยน้ำหนักเม็ดตะกอน			
			ถึง	ถึง	ถึง	ถึง
			ปฏิกรณ์ที่ 1	ปฏิกรณ์ที่ 2	ปฏิกรณ์ที่ 3	ปฏิกรณ์ที่ 4
2	68	<1,000	94.32	97.97	82.49	90.82
		1,001-1,400	2.73	1.38	14.30	6.17
		>1,400	2.95	0.65	3.21	3.01
4	131	<1,000	94.62	97.39	59.86	77.37
		1,001-1,400	0.62	0.99	18.32	9.68
		>1,400	4.67	1.62	21.82	12.95
6	173	<1,000	87.01	97.25	56.00	50.94
		1,001-1,400	8.23	1.76	18.70	16.56
		>1,400	4.76	0.99	25.30	32.50

ตารางที่ ค.3 เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์การกระจายขนาดตามระดับความสูงของเม็ดตะกอน
จุลินทรีย์หลังสิ้นสุดการทดลอง

ถึงปฏิกรณ์	ขนาดเม็ดตะกอน (ไมโครเมตร)	ที่ระดับความสูงของส่วนย่อยสลาย (เซนติเมตร)		
		0	15	30
1	<1,000	91.37	89.57	87.41
	1,001-1,400	4.79	4.88	6.68
	>1,400	3.84	5.55	5.91
2	<1,000	99.20	97.33	95.92
	1,001-1,400	0.37	1.18	1.49
	>1,400	0.43	1.49	2.59
3	<1,000	72.08	57.01	39.53
	1,001-1,400	11.05	15.63	23.07
	>1,400	16.87	27.36	37.40
4	<1,000	68.47	47.89	36.48
	1,001-1,400	13.67	22.24	25.13
	>1,400	17.86	29.87	38.39

ตารางที่ ค.4 ค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ขนาดเม็ดตะกอน (ไมโครเมตร)	ความเร็วในการจมตัว (เมตร/ชั่วโมง)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
<1,000	35.21	32.04	53.28	42.12
1,001-1,400	45.54	44.28	69.48	56.16
>1,400	68.76	63.72	86.76	75.24

ตารางที่ ค.5 ค่า SMA ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 เทียบกับตะกอนเริ่มต้น

ภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ (กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)	SMA (g COD methane / g VSS .day)				
	ตะกอนเริ่มต้น	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3	ถังปฏิกรณ์ที่ 4
2	0.0902	0.1296	0.1350	0.1390	0.1250
4		0.1334	0.1365	0.1496	0.1450
6		0.1680	0.1603	0.1832	0.1904

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
การหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน
(Specific Methanogenic Activity; SMA)

การศึกษาความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบโดยใช้แบบจำลองแบบ Batch ซึ่งใส่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์และสารอาหารเพียงครั้งเดียว ไม่มีการเติมเข้าไปอีก ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

ในการทดลองการหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน(Specific Methanogenic Activity; SMA) จะใช้อุปกรณ์ทดลอง แสดงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 อุปกรณ์ที่ใช้หาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน(Specific Methanogenic Activity; SMA)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 1 ชุด ประกอบด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร สำหรับใส่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดซึ่งสอดท่อนำก๊าซต่อกับสายยางซิลิโคนเพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นผ่านไปยังขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรอีกใบหนึ่ง มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดเจาะรูสองรู สอดท่อนำก๊าซ 2 ท่อ โดยท่อยาวจะจุ่มลงไปในสารละลายในขวด ซึ่งก็คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นประมาณ 1 นอร์มัล เพื่อดักก๊าซชนิดอื่นๆ

นอกเหนือจากก๊าซมีเทน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ละลายลงไป ส่วนก๊าซมีเทนจะแยกตัวออกมาเข้าสู่ท่อส่งก๊าซอีกท่อหนึ่งที่ต่อกับสายยางซิลิโคน เพื่อนำก๊าซมีเทนไปยังอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซมีเทนจะใช้บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน บรรจุน้ำที่ทราบระดับแน่นอนและใช้สายยางซิลิโคนเชื่อมต่อบิวเรตทั้ง 2 อัน เข้าด้วยกันที่บริเวณด้านล่างของบิวเรตให้มีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรตัวยู (U) โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะผ่านสายยางซิลิโคนเข้าสู่ด้านบนของบิวเรตเข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ภายในบิวเรตทำให้ระดับน้ำด้านหนึ่งของบิวเรตลดลง อ่านระดับน้ำที่ลดลงเทียบกับระดับน้ำเริ่มต้นก็จะทำให้สามารถวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้

สารอาหารที่ใช้ คือ กรดอะซิติก โดยทำการผสมกับน้ำกลั่นให้มีค่าซีไอดีประมาณ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร นำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีมาประมาณ 25 มิลลิลิตร แล้วเติมสารอาหารให้ได้ปริมาณรวมเท่ากับ 150 มิลลิลิตร หลังจากผสมสารอาหารกับตะกอนจุลินทรีย์แล้วให้ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO₃) ให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.2-7.5 นำขวดรูปชมพู่ที่ใส่ตะกอนจุลินทรีย์ไปวางบนชุดควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 35 องศาเซลเซียส บันทึกปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆตลอดการทดลอง นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อหาค่าความชันของกราฟในช่วงที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งช่วงที่กราฟมีความชันมากที่สุดจะเป็นค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA)

การหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) จะหาในช่วงที่อัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดในระหว่างการทดลอง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$SMA = R/CF \times V \times VSS$$

เมื่อ	SMA	=	ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หรือ ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (g COD-CH ₄ /g VSS-day)
	R	=	อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (mL- CH ₄ /day) หาได้จากค่าความชันของกราฟปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นกับเวลา
	CF	=	Conversion Factor (mL- CH ₄ /g COD) ซึ่งหาได้จากตาราง ง.1
	V	=	Effective volume ของ Reactor (L)

VSS = ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid) ของตะกอน
จุลินทรีย์ (g VSS/L)

ตารางที่ ง.1 ค่า Conversion Factor (CF) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า Conversion Factor (CF) (mL- CH ₄ /g COD)
10	363
15	369
20	376
25	382
30	388
35	395
40	401
45	408

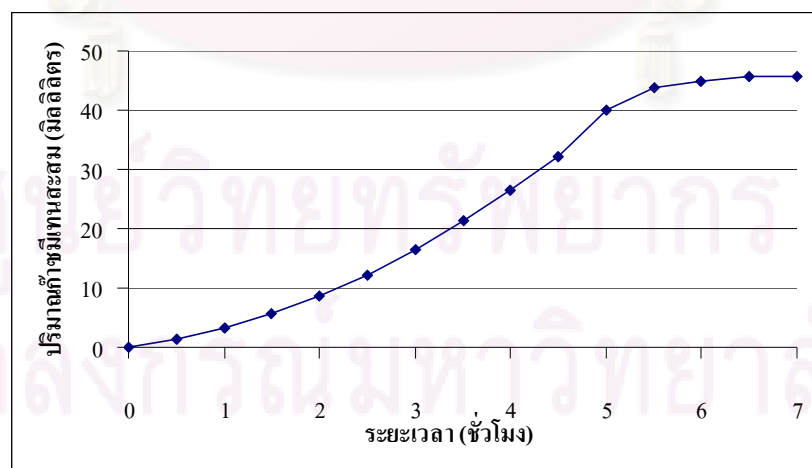
ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA)

ในที่นี้จะขอคำนวณการหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) ของตะกอน
จุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นระบบเป็นตัวอย่าง โดยเมื่อนำตะกอนจุลินทรีย์ไปดำเนินการตามขั้นตอน
วิธีการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นจะได้ข้อมูลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ
ตลอดการทดลอง แสดงดังตารางที่ ง.2 รูปที่ ง.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

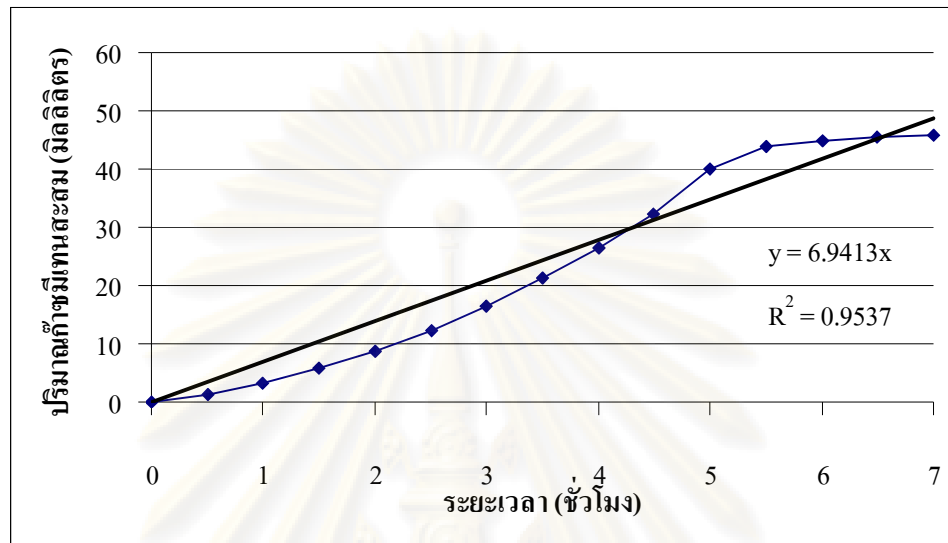
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลดิบของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาต่างๆตลอดการทดลองของตะกอน
จุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.00	0.00
0.5	1.30	1.30
1.0	2.00	3.30
1.5	2.50	5.80
2.0	2.80	8.60
2.5	3.60	12.20
3.0	4.30	16.50
3.5	4.90	21.40
4.0	5.00	26.40
4.5	5.70	32.10
5.0	5.90	40.00
5.5	5.90	43.90
6.0	5.90	44.80
6.5	5.90	45.60
7.0	5.90	45.70



รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

นำกราฟที่มีความชันมากที่สุดไปหาค่าความชัน จะได้ดังรูปที่ ง.3 ซึ่งค่าความชันที่ได้ คือ ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน



รูปที่ ง.3 ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

จากกราฟจะได้

อัตราการเกิดก๊าซมีเทน(ความชันของกราฟ)	=	6.9413 mL-CH ₄ /day
ค่า Conversion Factor ที่อุณหภูมิ 35°C	=	395 mL- CH ₄ /g COD
ค่า Effective volume ของ Reactor (L)	=	0.225 L
ค่า Volatile Suspended Solid	=	6.245 gVSS/L

จากสูตร $SMA = R/CF \times V \times VSS$

แทนค่า $SMA = (6.9413 \times 24) / (395 \times 0.225 \times 6.245)$
 $SMA = 0.30 \text{ g COD-CH}_4/\text{g VSS-day}$

ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การหาการกระจายขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Sieve Analysis

อุปกรณ์

- ถังน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงร่อน
- ตะแกรงร่อนขนาดรูเปิด 1,000 ไมโครเมตร
- ตะแกรงร่อนขนาดรูเปิด 1,400 ไมโครเมตร
- ถ้วยกระเบื้องอบที่ 105 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักแล้ว

วิธีการทดลอง

1. เก็บตัวอย่างตะกอนตามระดับความสูงของจุดเก็บตัวอย่าง
2. เติมน้ำใส่ถังให้มีความสูงพ้นตะแกรงร่อน
3. เรียงตะแกรงจากรูเปิดขนาดใหญ่ไปเล็ก
4. เทตะกอนตัวอย่างลงไปบนตะแกรงที่เรียงกันอยู่
5. ค่อยๆร่อนเม็ดตะกอน
6. นำตะกอนตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงขนาดต่างๆและที่ลอดผ่านรูตะแกรงมาใส่ในถ้วยกระเบื้อง
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนัก และหักลบกับน้ำหนักถ้วยกระเบื้องเริ่มต้น จะได้ค่าของแข็งแขวนลอย
8. เทียบน้ำหนักของตะกอนตัวอย่างทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าสัดส่วนขนาดตะกอนแต่ละขนาดว่ามีกี่เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตะกอนทั้งหมด



ก. ตะกอนที่ติดบนตะแกรงขนาด
รูเปิด 1,000 ไมโครเมตร



ข. ตะกอนที่ติดบนตะแกรงขนาด
รูเปิด 1,400 ไมโครเมตร



ค. ตะกอนตัวอย่างที่ถูกแยกขนาดก่อนนำไปอบ

รูปที่ ๑.1 ตะกอนตัวอย่างที่แยกขนาดด้วยวิธี sieve analysis

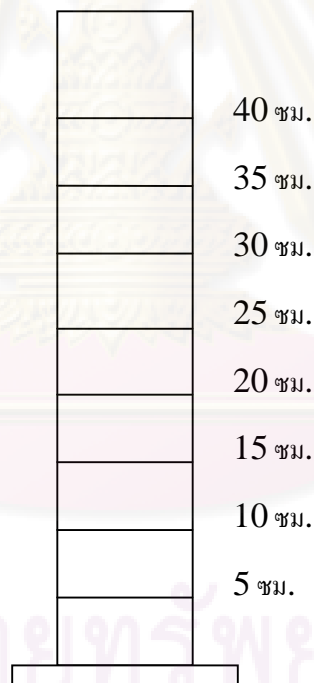
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การหาค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การหาค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์สามารถทำได้โดยการจับเวลาเมื่อเม็ดตะกอนจมตัวลงในน้ำเป็นระยะทางเท่ากับ 30 เซนติเมตร โดยวิธีการ ดังนี้

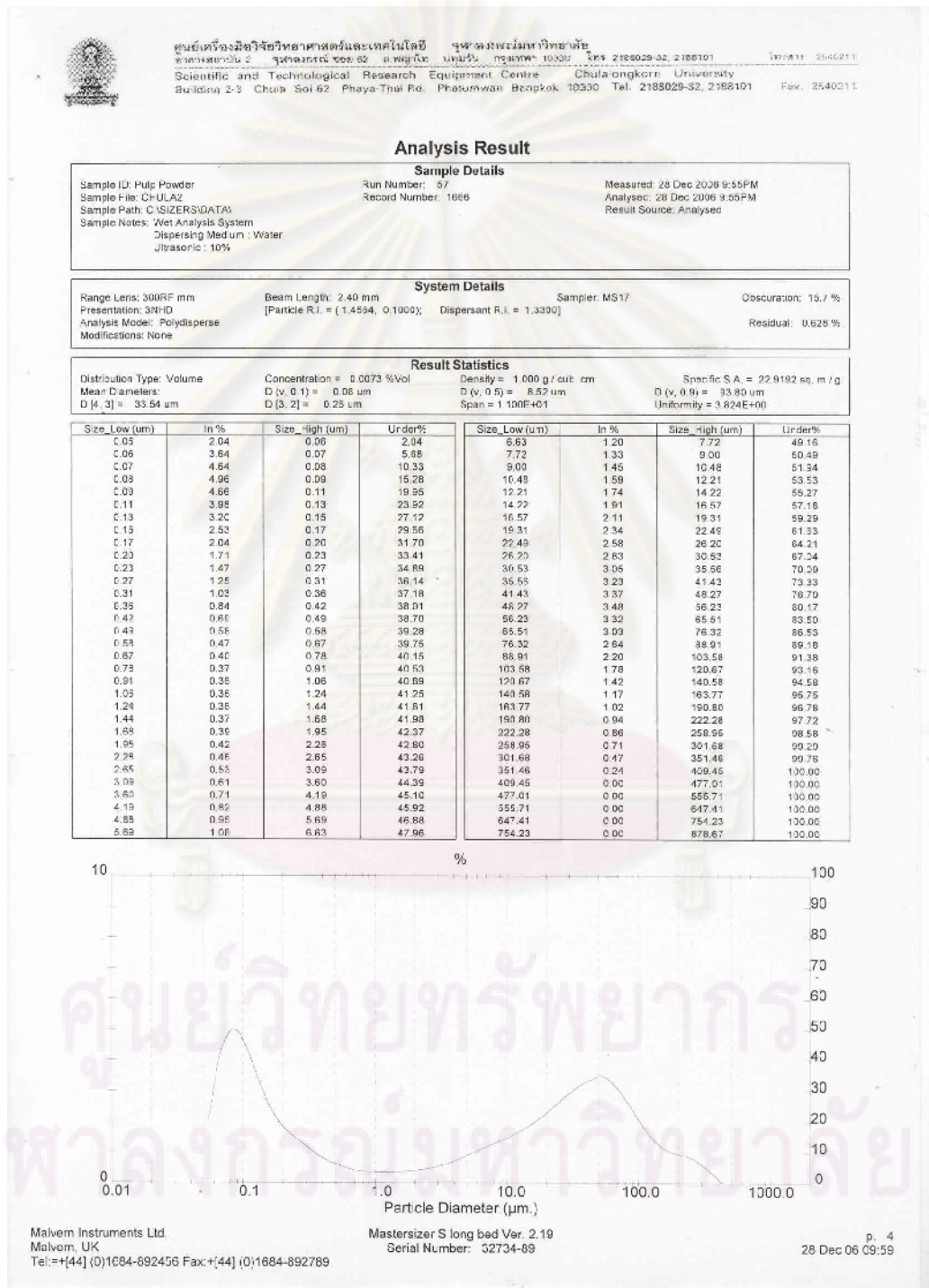
1. เตรียมกระบอกรับน้ำ 1,000 มล. ขีดทำสัญลักษณ์กำหนดความสูงที่ระยะต่างๆ ตามรูปที่ จ.1
2. เติมน้ำลงไปจนกระทั่งเต็ม
3. ปลปล่อยตะกอนตัวอย่างลงในกระบอกรับน้ำ จับเวลาตามจุดความสูงต่างๆ ที่ทำสัญลักษณ์ไว้ เมื่อตะกอนเคลื่อนที่ผ่านจุดนั้นๆ
4. นำผลที่ได้มาพล็อตกราฟระยะทางต่อเวลา ค่าความชันที่ได้คือ ความเร็วในการจมตัว



รูปที่ จ.1 กระบอกรับน้ำที่ขีดสัญลักษณ์ไว้ที่ความสูงระยะต่างๆ

ภาคผนวก ข

การหาการกระจายขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer



รูปที่ ข.1 การกระจายขนาดของ pulp powder



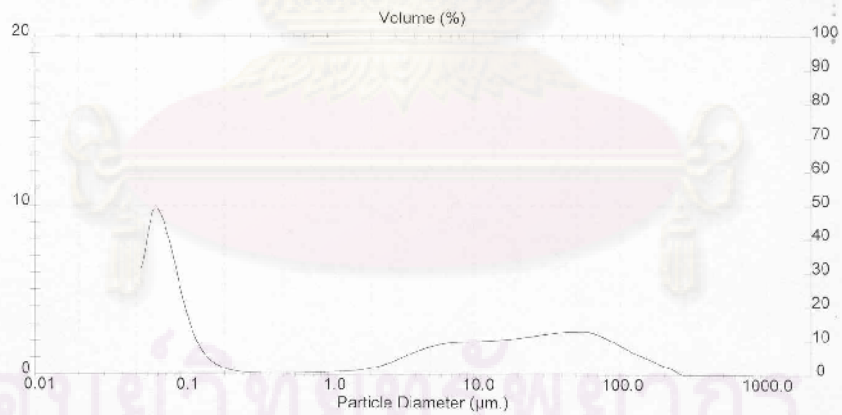
Analysis Result

Sample Details		
Sample ID: T2	Ref Number: 10	Measured: 6 Sep 2007 16:39PM
Sample File: CHULAS	Record Number: 315	Analysed: 6 Sep 2007 16:39PM
Sample Path: C:\S ZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet Analysis System		
Dispersing Medium: Water		
Ultrasonic: no		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 11.5 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.100)]	Dispersant R.I. = 1.3300	Residual: 1.447 %
Analysis Mode: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0043 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 35.2193 ea. m / g
Mean Diameter: D [4,3] = 22.32 um	D (v, 0.1) = 0.06 um	D (v, 0.5) = 4.35 um	D (v, 0.9) = 71.94 um
	D [3,2] = 0.17 um	Span = 1.760E+21	Uniformity = 5.378E+00

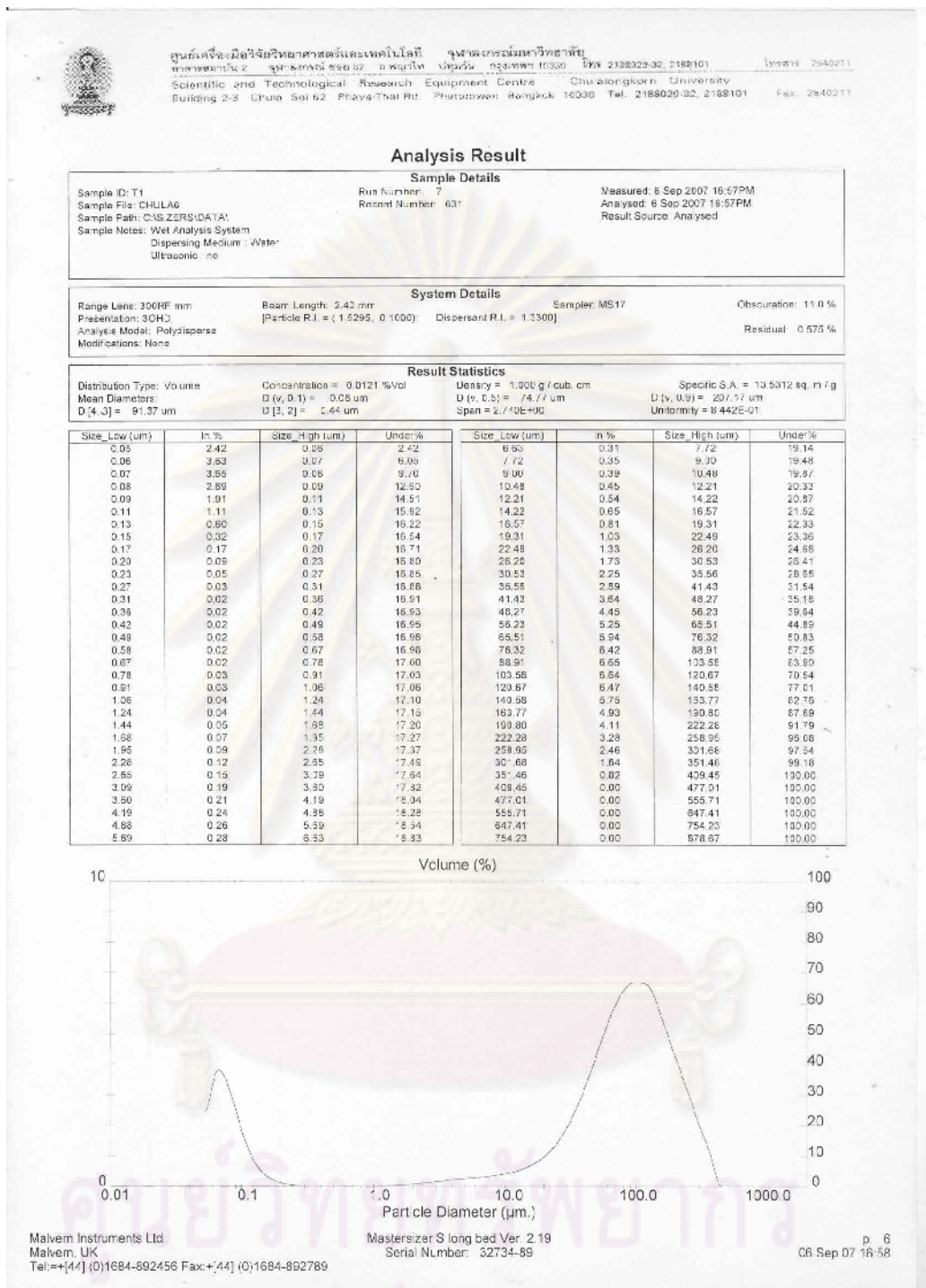
Size, Low (um)	In %	Size, High (um)	Under%	Size, Low (um)	In %	Size, High (um)	Under%
0.05	6.16	0.06	6.77	6.63	1.89	7.72	57.19
0.06	5.28	0.07	15.45	7.72	1.93	9.50	59.12
0.07	5.46	0.08	24.91	9.00	1.96	10.48	61.09
0.08	7.62	0.09	32.53	10.48	1.99	12.21	63.27
0.09	5.11	0.11	37.64	12.21	2.02	14.22	65.09
0.11	3.03	0.13	40.64	14.22	2.06	16.57	67.15
0.13	1.64	0.15	42.28	16.57	2.11	19.31	69.36
0.15	0.89	0.17	43.16	19.31	2.17	22.49	71.43
0.17	0.49	0.20	43.66	22.49	2.26	26.20	73.66
0.20	0.29	0.23	43.94	26.20	2.34	30.53	76.02
0.23	0.16	0.27	44.12	30.53	2.42	35.56	78.44
0.27	0.12	0.31	44.24	35.56	2.49	41.43	80.93
0.31	0.10	0.36	44.33	41.43	2.53	48.27	83.46
0.36	0.09	0.42	44.42	48.27	2.56	56.23	86.00
0.42	0.09	0.49	44.31	56.23	2.53	65.51	88.53
0.49	0.09	0.58	44.60	65.51	2.36	76.32	90.89
0.58	0.10	0.67	44.70	76.32	2.12	86.91	93.01
0.67	0.11	0.78	44.81	88.01	1.83	103.56	94.83
0.78	0.13	0.91	44.94	103.56	1.62	120.87	96.35
0.91	0.16	1.06	45.10	120.87	1.23	140.58	97.58
1.06	0.18	1.24	45.28	140.58	0.98	163.77	98.56
1.24	0.20	1.44	45.19	163.77	0.73	190.90	99.39
1.44	0.24	1.68	45.73	190.80	0.48	222.26	99.77
1.68	0.32	1.95	46.35	222.20	0.23	250.95	100.00
1.95	0.43	2.28	46.42	258.95	0.00	301.96	100.00
2.28	0.50	2.65	47.37	301.00	0.00	361.46	100.00
2.65	0.60	3.00	47.35	351.46	0.00	409.45	100.00
3.00	1.06	3.30	46.33	406.45	0.00	477.91	100.00
3.60	1.31	4.19	50.24	477.01	0.00	565.71	100.00
4.19	1.53	4.95	51.77	555.71	0.00	647.41	100.00
4.95	1.70	5.59	53.47	647.41	0.00	754.25	100.00
5.69	1.82	6.83	55.30	754.23	0.00	879.07	100.00



Malvern Instruments Ltd, Malvern, UK
 Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number: 32734-89
 p. 2
 06 Sep 07 16:45

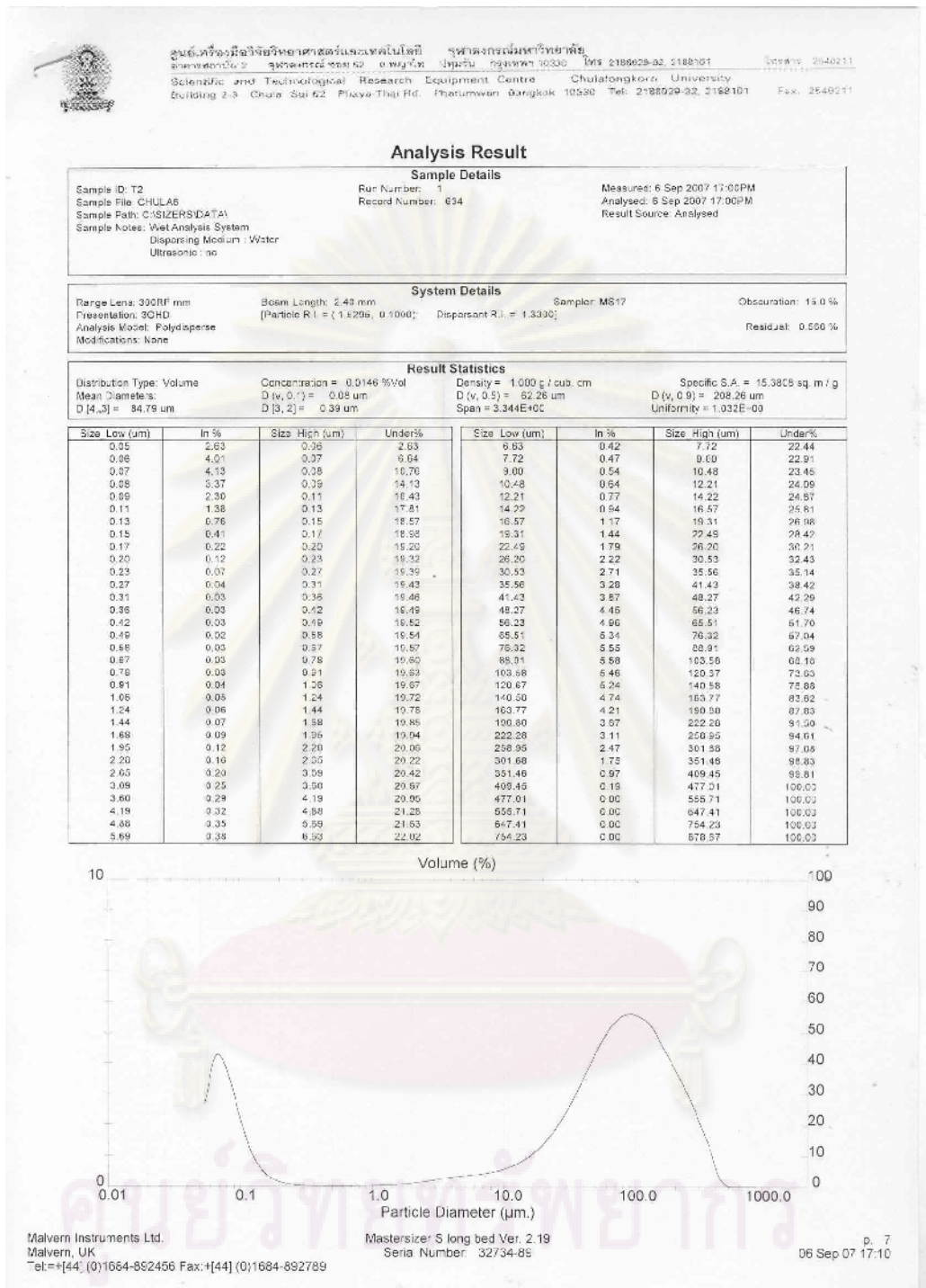
รูปที่ ๓.2 การกระจายขนาดของตะกอนเริ่มต้น





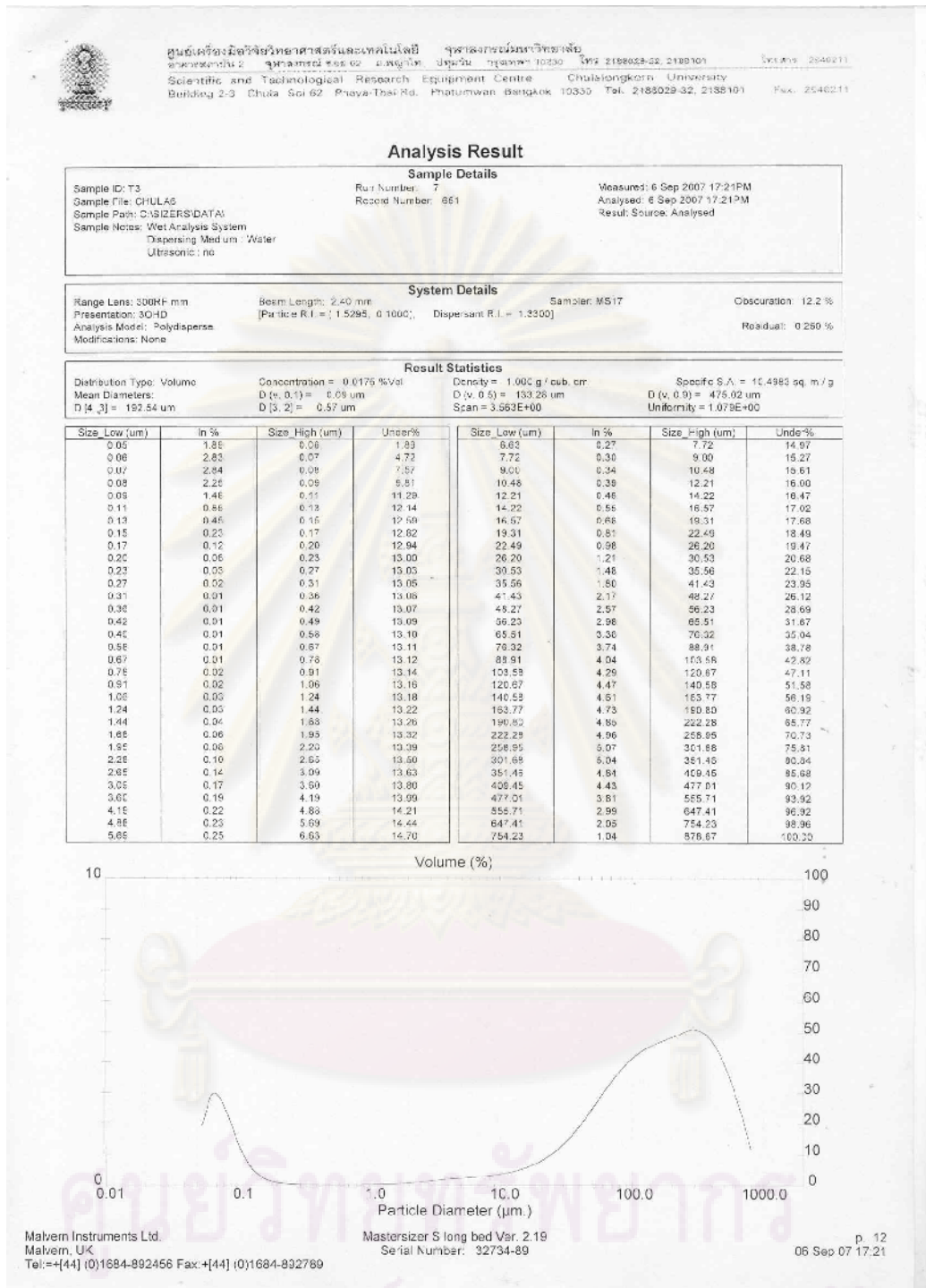
รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 22 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

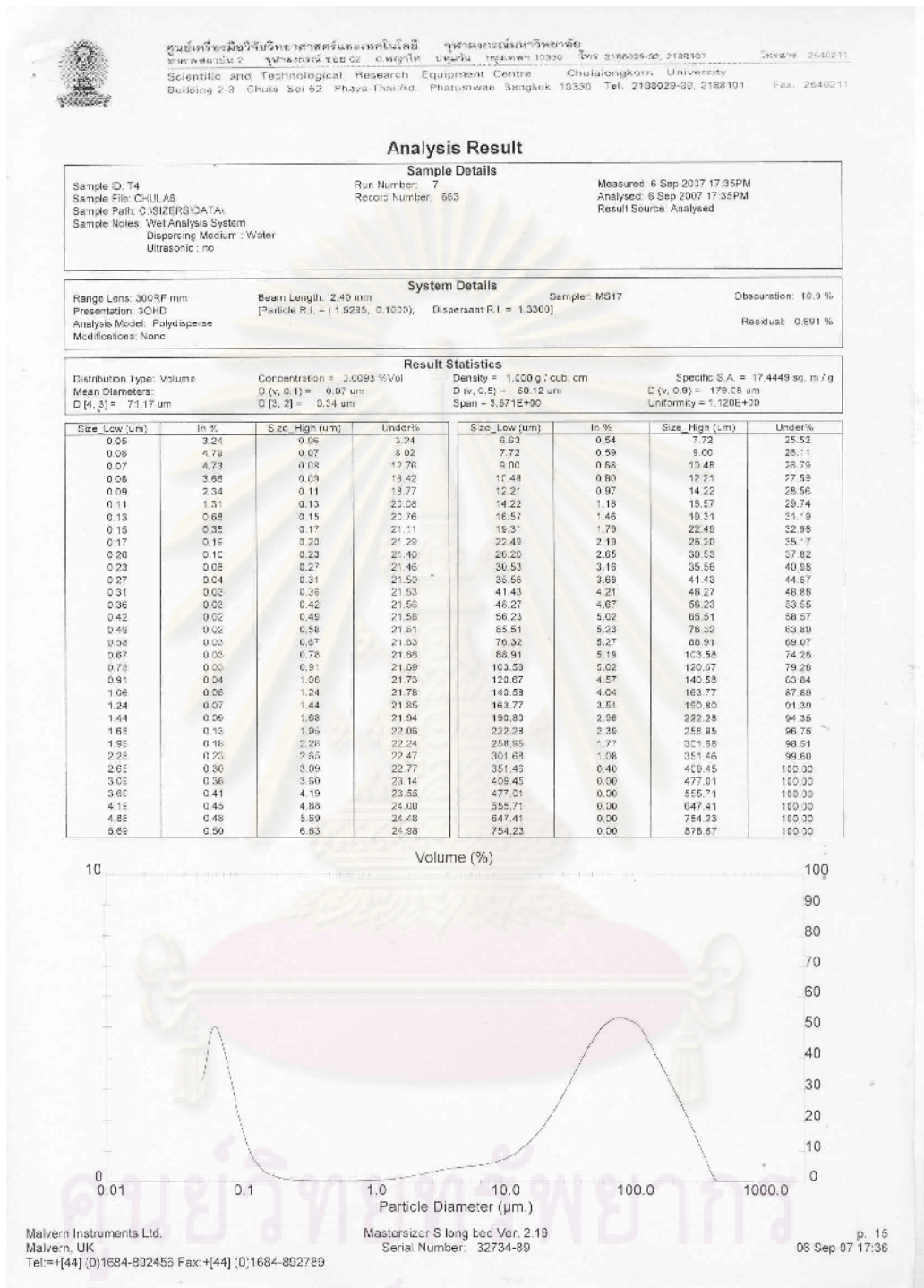


รูปที่ ๔.4 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 22 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.5 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 22 ของการทดลอง



รูปที่ ๖.6 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 22 ของการทดลอง

MASTERSIZER

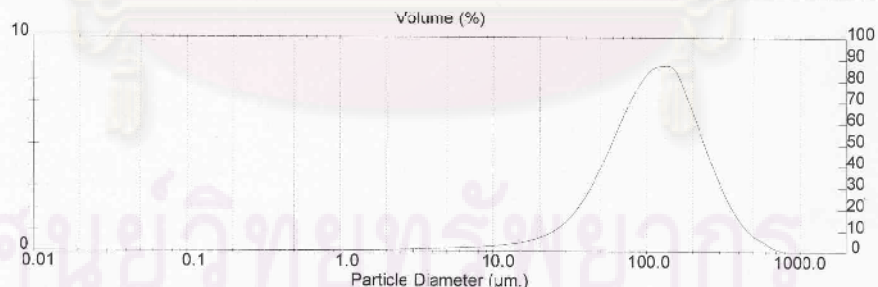
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: T1	Run Number: 1	Measured: 8 Oct 2007 9:57PM
Sample File: (Result Not Saved)		Analysed: 8 Oct 2007 9:58PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 16.9 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.100C)]:	Dispersion: R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.271 %
Modifications: None			

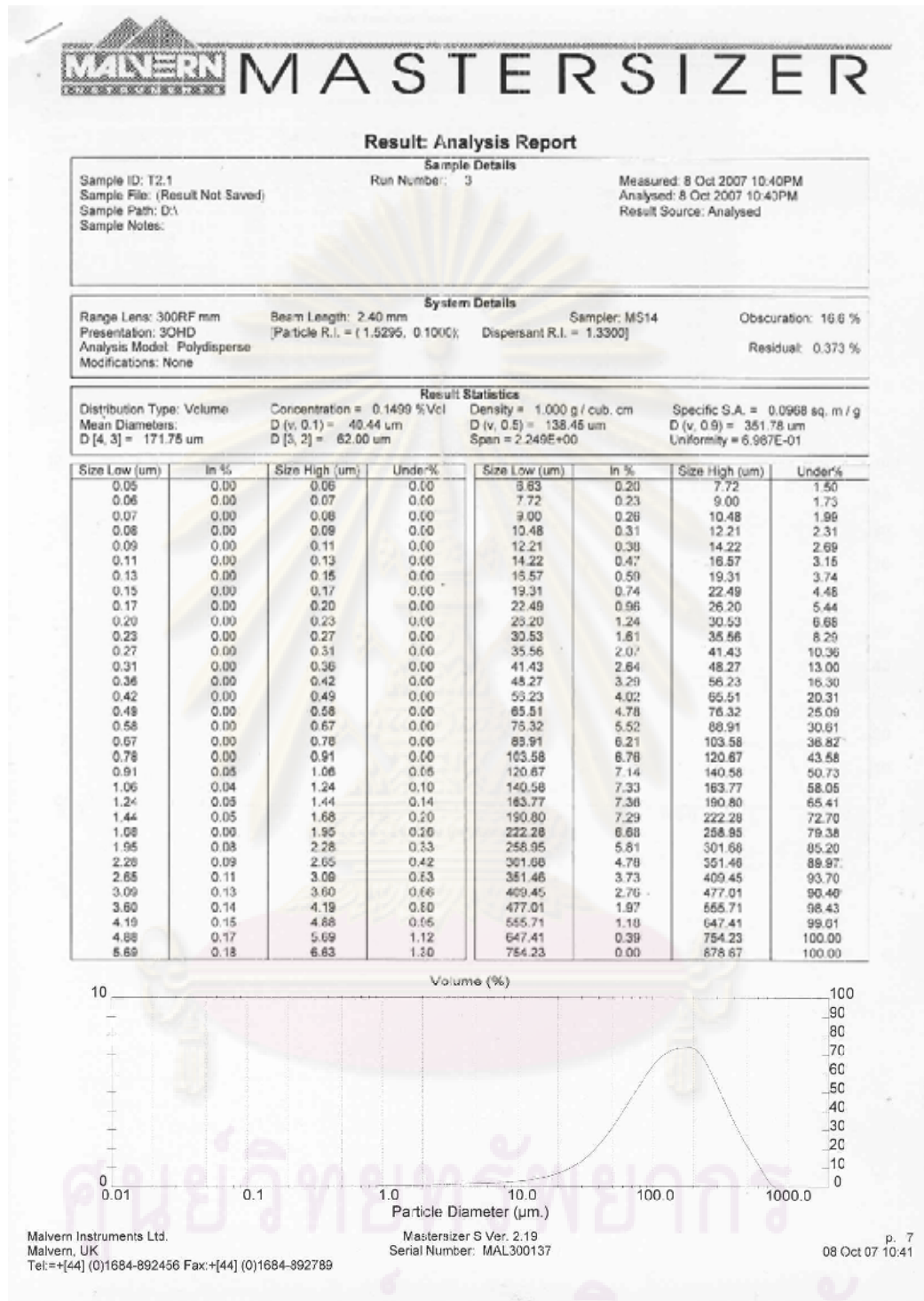
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1309 %Vcl	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1430 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 39.82 um	D (v, 0.5) = 113.12 um	D (v, 0.9) = 263.12 um
D [4, 3] = 136.93 um	D [3, 2] = 41.95 um	Span = 1.974E+00	Uniformity = 6.249E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.19	7.72	1.60
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.21	9.00	1.81
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.25	10.48	2.05
0.08	0.00	0.09	0.00	10.46	0.29	12.21	2.34
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.35	14.22	2.69
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.43	16.57	3.12
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.54	19.31	3.66
0.15	0.00	0.17	0.01	19.31	0.70	22.49	4.36
0.17	0.01	0.20	0.01	22.49	0.93	26.20	5.29
0.20	0.01	0.23	0.02	26.20	1.27	30.53	6.57
0.23	0.02	0.27	0.04	30.53	1.74	35.56	8.31
0.27	0.03	0.31	0.07	35.56	2.38	41.43	10.69
0.31	0.03	0.36	0.10	41.43	3.19	48.27	13.87
0.36	0.03	0.42	0.14	48.27	4.15	56.23	18.02
0.42	0.03	0.49	0.17	56.23	5.23	65.51	23.25
0.49	0.04	0.58	0.21	65.51	6.34	76.32	29.59
0.58	0.03	0.67	0.24	76.32	7.35	88.91	36.94
0.67	0.03	0.78	0.27	88.91	8.13	103.58	45.08
0.78	0.03	0.91	0.30	103.58	8.58	120.67	53.66
0.91	0.03	1.06	0.33	120.67	8.68	140.58	62.34
1.06	0.03	1.24	0.36	140.58	8.52	163.77	70.86
1.24	0.03	1.44	0.39	163.77	7.49	190.80	78.35
1.44	0.04	1.68	0.43	190.80	6.25	222.28	84.60
1.68	0.05	1.95	0.48	222.28	4.96	258.95	89.56
1.95	0.06	2.28	0.54	258.95	3.72	301.68	93.28
2.28	0.08	2.65	0.62	301.68	2.63	351.46	95.91
2.65	0.10	3.09	0.71	351.46	1.76	409.45	97.67
3.09	0.11	3.60	0.83	409.45	1.11	477.01	98.78
3.60	0.13	4.19	0.95	477.01	0.68	555.71	99.45
4.19	0.14	4.88	1.09	555.71	0.41	647.41	99.86
4.88	0.15	5.69	1.24	647.41	0.14	754.23	100.00
5.69	0.17	6.63	1.41	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 3
 Malvern, UK Serial Number: MAL300137 8 Oct 07 10:02
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

รูปที่ ๗.๗ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 68 ของการทดลอง



รูปที่ ข.8 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 68 ของการทดลอง

MAVERN MASTERSIZER

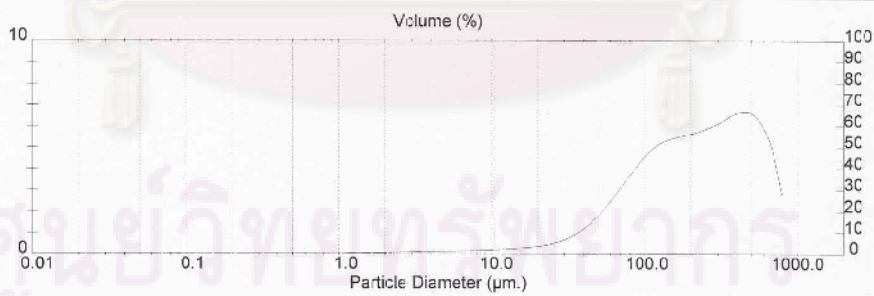
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: T3.1	Run Number: 6	Measured: 8 Oct 2007 12:02PM
Sample File: (Result Not Saved)		Analysed: 8 Oct 2007 12:03PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 17.2 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I.] = (1.5295, 0.1000)	Dispersant R.I. = 1.3300	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.393 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2327 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0648 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 60.02 um	D (v, 0.5) = 226.01 um	D (v, 0.9) = 598.21 um
D [4, 3] = 281.73 um	D [3, 2] = 92.57 um	Span = 2.381E+00	Uniformity = 7.418E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.14	7.72	1.03
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.15	9.00	1.19
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.17	10.48	1.36
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.20	12.21	1.56
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.22	14.22	1.78
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.26	16.57	2.04
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.30	19.31	2.34
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.36	22.49	2.70
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.45	26.20	3.15
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.59	30.53	3.75
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.79	35.56	4.54
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	1.08	41.43	5.62
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.46	48.27	7.07
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	1.93	56.23	9.00
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	2.50	65.51	11.51
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	3.14	76.32	14.65
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	3.79	88.91	18.43
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	4.38	103.58	22.81
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	4.87	120.67	27.68
0.91	0.00	1.06	0.00	120.67	5.20	140.58	32.88
1.06	0.03	1.24	0.03	140.58	5.38	163.77	38.26
1.24	0.03	1.44	0.06	163.77	5.50	190.80	43.76
1.44	0.03	1.68	0.09	190.80	5.62	222.28	49.38
1.68	0.04	1.95	0.13	222.28	5.79	258.95	55.16
1.95	0.05	2.28	0.18	258.95	5.99	301.68	61.15
2.28	0.07	2.65	0.25	301.68	6.23	351.46	67.38
2.65	0.08	3.09	0.33	351.46	6.52	409.45	73.90
3.09	0.10	3.60	0.43	409.45	6.83	477.01	80.53
3.60	0.11	4.19	0.53	477.01	7.17	555.71	87.06
4.19	0.11	4.88	0.65	555.71	7.54	647.41	92.92
4.88	0.12	5.69	0.77	647.41	7.94	754.23	97.47
5.69	0.13	6.63	0.89	754.23	8.38	878.67	100.00

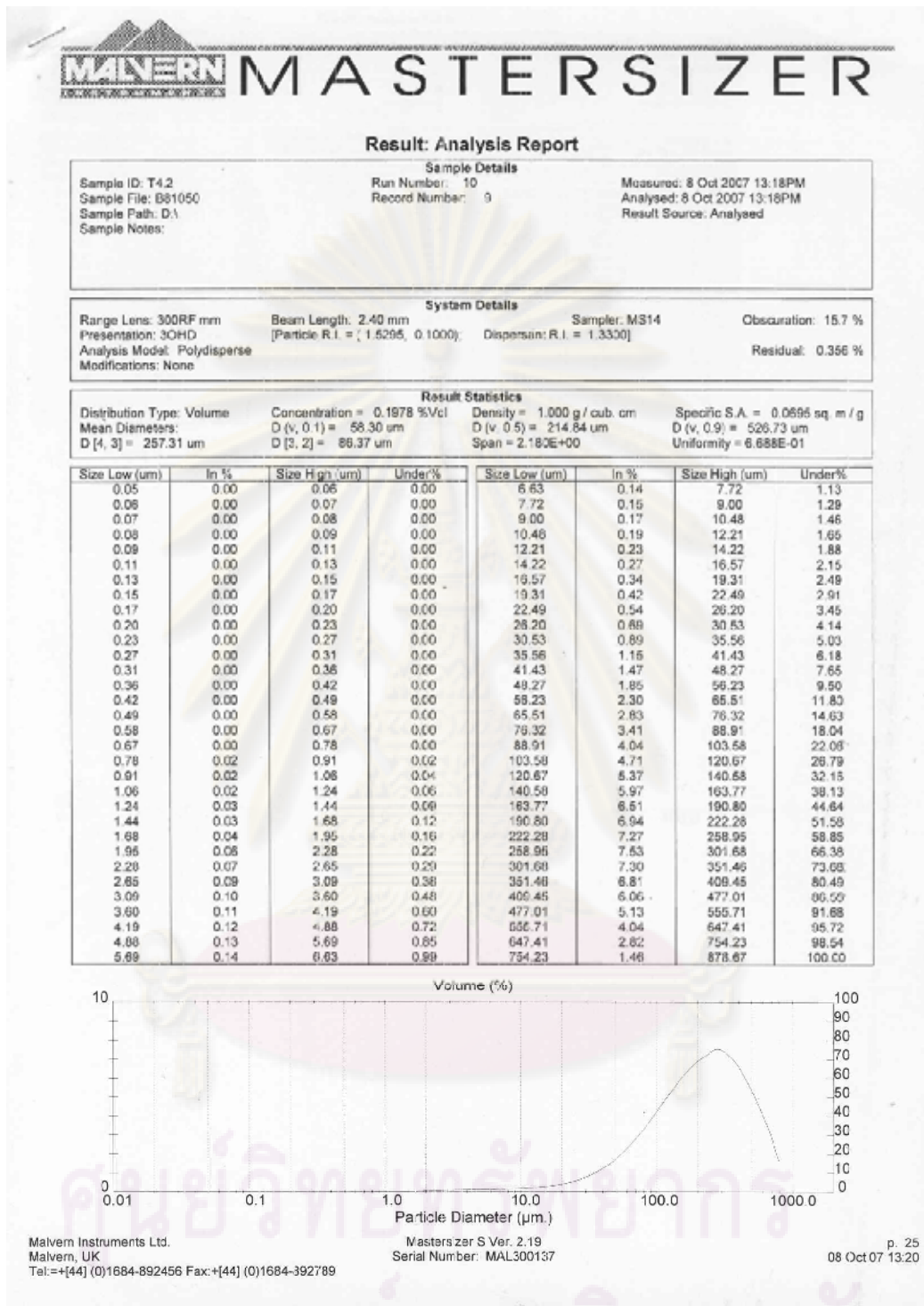


Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.19
 Serial Number: MAL300137

p. 15
 08 Oct 07 12:04

รูปที่ ๙.๙ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูกลินทรีซ์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 68 ของการทดลอง



รูปที่ ข.10 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 68 ของการทดลอง



MASTERSIZER

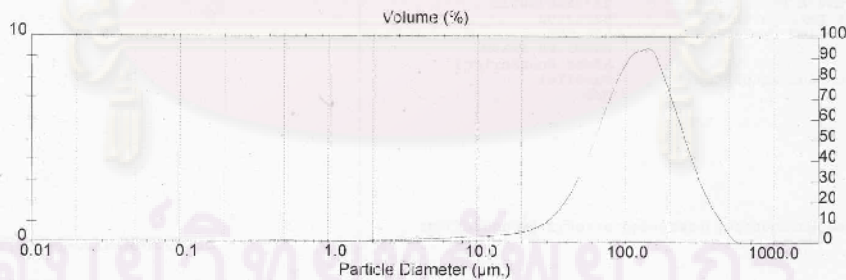
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: t1-11-2	Run Number: 2	Measured: 7 Nov 2007 15:29PM
Sample File: BANK2	Record Number: 2	Analysed: 7 Nov 2007 15:29PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 15.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.392 %
Analysis Modal: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1223 %/v/v	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 0.1463 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 45.04 um	D (v, 0.5) = 119.32 um	D (v, 0.9) = 259.17 um
D [4.3] = 139.33 um	D [3.2] = 41.00 um	Span = 1.795E+00	Uniformity = 5.603E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.93	0.20	7.72	1.61
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.23	9.00	1.84
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.26	10.48	2.10
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.29	12.21	2.40
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.33	14.22	2.73
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.36	16.57	3.09
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.42	19.31	3.51
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.50	22.49	4.01
0.17	0.01	0.20	0.02	22.49	0.65	26.20	4.66
0.20	0.01	0.23	0.03	26.20	0.89	30.53	5.55
0.23	0.02	0.27	0.05	30.53	1.28	35.86	6.63
0.27	0.03	0.31	0.09	35.86	1.84	41.43	8.67
0.31	0.04	0.35	0.12	41.43	2.62	48.27	11.29
0.36	0.04	0.42	0.16	48.27	3.61	56.23	14.91
0.42	0.04	0.49	0.20	56.23	4.80	65.51	19.70
0.49	0.04	0.58	0.24	65.51	6.09	76.32	25.80
0.58	0.04	0.67	0.28	76.32	7.36	88.91	33.16
0.67	0.04	0.78	0.32	88.91	8.42	103.58	41.58
0.78	0.03	0.91	0.35	103.58	9.10	120.67	50.68
0.91	0.03	1.06	0.38	120.67	9.34	140.58	60.01
1.06	0.03	1.24	0.42	140.58	9.31	163.77	69.32
1.24	0.03	1.44	0.45	163.77	8.25	190.80	77.58
1.44	0.04	1.68	0.49	190.80	6.91	222.28	84.49
1.68	0.05	1.95	0.53	222.28	5.48	258.95	89.97
1.95	0.06	2.28	0.59	258.95	4.07	301.58	94.04
2.28	0.07	2.65	0.66	301.58	2.81	351.46	96.85
2.65	0.08	3.09	0.74	351.46	1.80	409.45	98.65
3.09	0.10	3.60	0.84	409.45	1.05	477.01	99.70
3.60	0.12	4.19	0.96	477.01	0.30	555.71	100.00
4.19	0.13	4.88	1.09	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.15	5.69	1.24	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.17	6.63	1.41	754.23	0.00	878.57	100.00



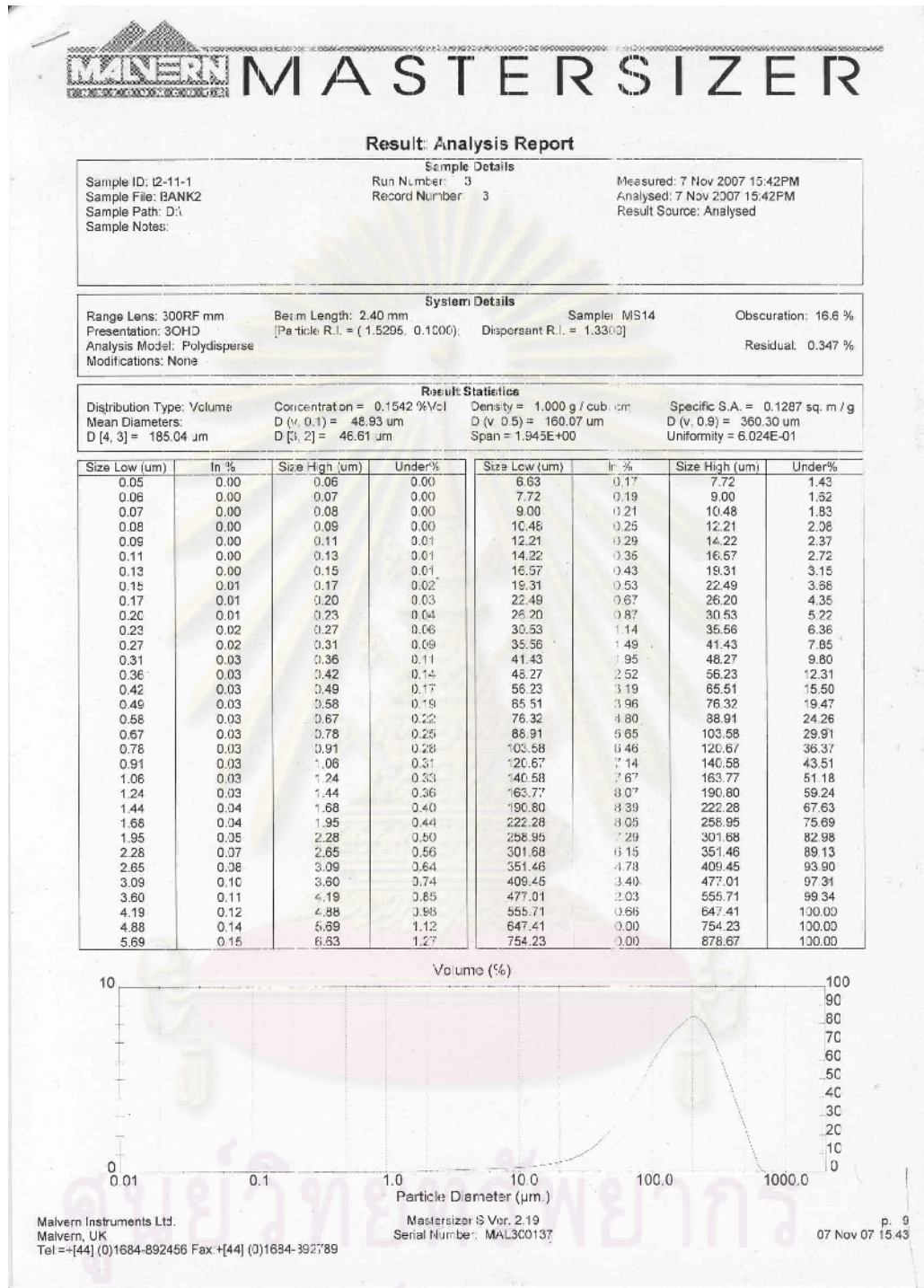
Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel: +[44] (0) 1634-892456 Fax: +[44] (0) 1684-392789

Mastersizer S Ver. 2.19
 Serial Number: MAL300137

p. 7
 07 Nov 07 15:32

รูปที่ ข.11 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 101 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.12 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 101 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MAVERN MASTERSIZER

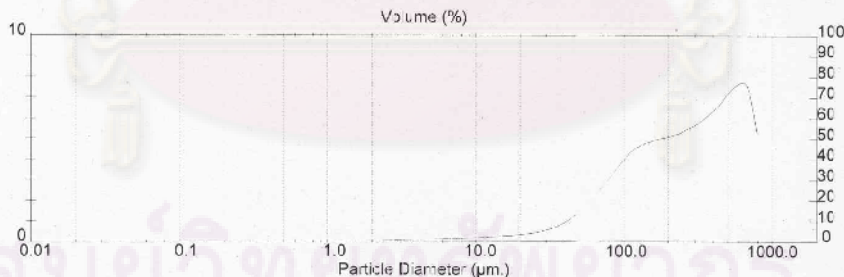
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: I3-11-2	Run Number: 8	Measured: 7 Nov 2007 16:16PM
Sample File: (Result Not Saved)		Analysed: 7 Nov 2007 16:16PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 14.7 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant: R.I. = 1.3300]	
Analysis Modal: Polydisperse			Residual: 0.518 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2079 %Vcl	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 0.0611 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 66.14 um	D (v, 0.5) = 268.16 um	D (v, 0.9) = 674.84 um
D [4, 3] = 323.11 um	D [3, 2] = 98.15 um	Span = 2.27E+00	Uniformity = 7.166E-01

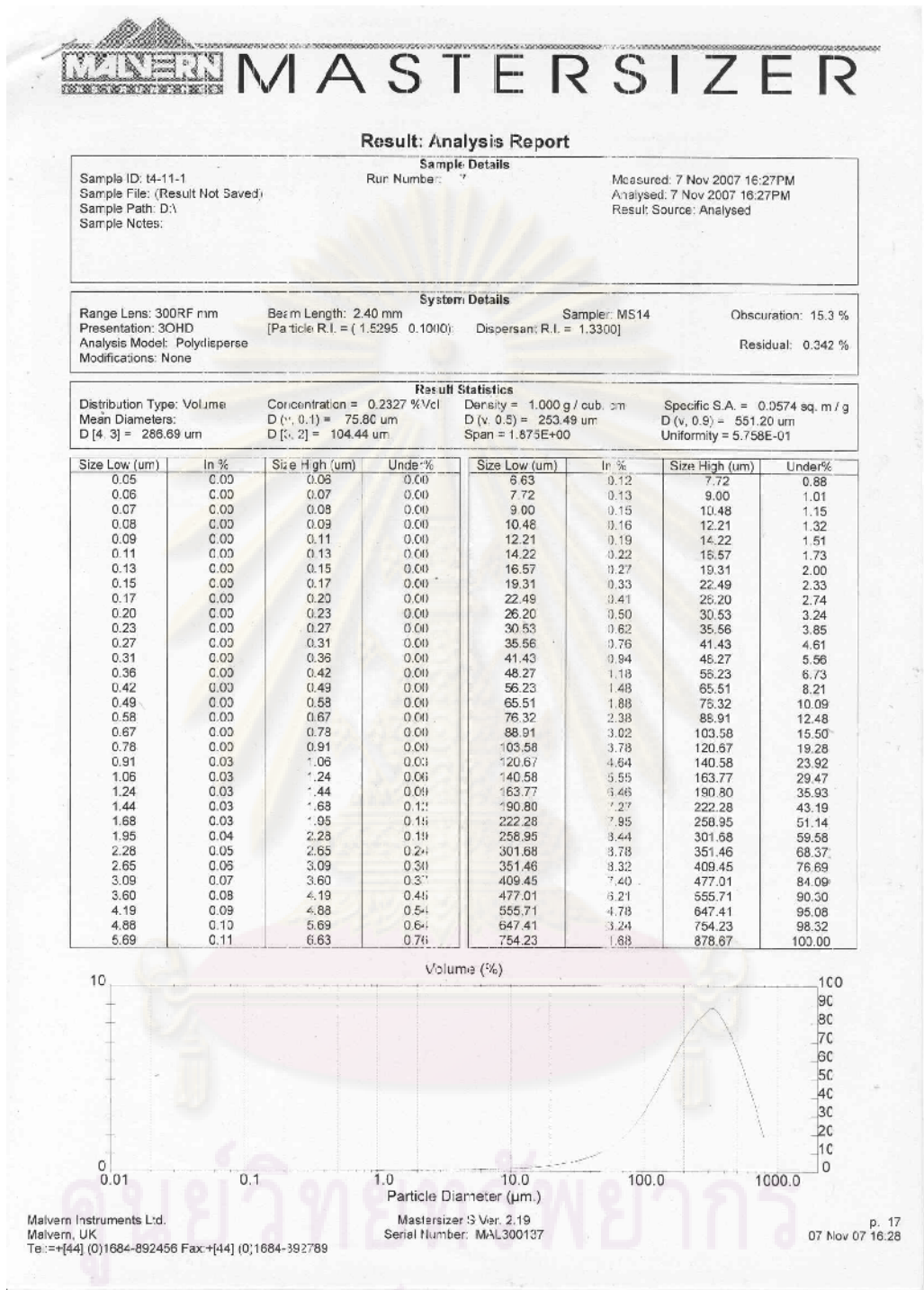
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.05	0.00	5.63	0.14	7.72	1.03
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.16	9.00	1.19
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.18	10.48	1.37
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.20	12.21	1.57
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.23	14.22	1.80
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.26	16.57	2.08
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.29	19.31	2.35
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.34	22.49	2.69
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.41	26.20	3.10
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.50	30.53	3.60
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.65	35.66	4.25
0.27	0.00	0.31	0.00	35.66	0.87	41.43	5.12
0.31	0.00	0.35	0.00	41.43	1.16	48.27	6.28
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	1.55	56.23	7.83
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	2.02	65.51	9.85
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	2.59	76.32	12.45
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	3.21	88.91	15.66
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	3.83	103.58	19.49
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	4.35	120.37	23.84
0.91	0.00	1.05	0.00	120.37	4.68	140.58	28.51
1.06	0.04	1.24	0.04	140.58	4.87	163.77	33.38
1.24	0.04	1.44	0.07	163.77	4.99	190.80	38.37
1.44	0.04	1.68	0.11	190.80	5.09	222.28	43.47
1.68	0.04	1.95	0.15	222.28	5.29	258.95	48.75
1.95	0.05	2.28	0.20	258.95	5.53	301.88	54.28
2.28	0.05	2.65	0.26	301.88	5.79	351.46	60.08
2.65	0.08	3.09	0.33	351.46	6.21	409.45	66.29
3.09	0.09	3.60	0.42	409.45	6.66	477.01	72.95
3.60	0.10	4.19	0.52	477.01	7.28	555.71	80.23
4.19	0.11	4.88	0.64	555.71	7.66	647.41	87.89
4.88	0.12	5.69	0.76	647.41	7.24	754.23	95.13
5.69	0.13	6.63	0.89	754.23	4.87	878.87	100.00



Malvern Instruments Ltd, Malvern, UK
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-392789
 Mastersizer 3 Ver. 2.19 Serial Number: MAL300137
 p. 15 07 Nov 07 16:16

รูปที่ ข.13 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 101 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.14 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 101 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MAVERN MASTERSIZER

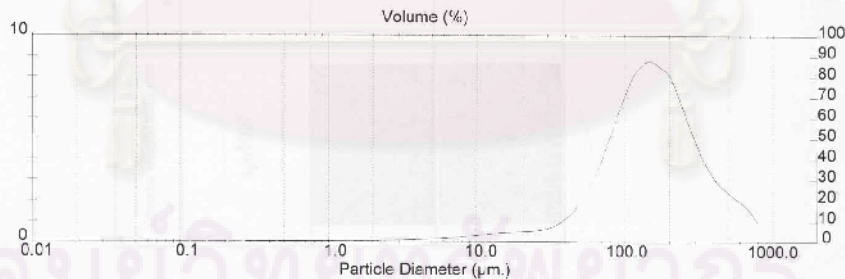
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: t1.1-14-12-50	Run Number: 1	Measured: 14 Dec 2007 15:40PM
Sample File: BANK3	Record Number: 1	Analysed: 14 Dec 2007 15:40PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sample: MS14	Obscuration: 17.7 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.448 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1684 %Vcl	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1176 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 54.69 um	D (v, 0.5) = 150.96 um	D (v, C.9) = 396.60 um
D [4, 3] = 163.83 um	D [3, 2] = 51.02 um	Span = 2.265E+00	Uniformity = 6.919E-01

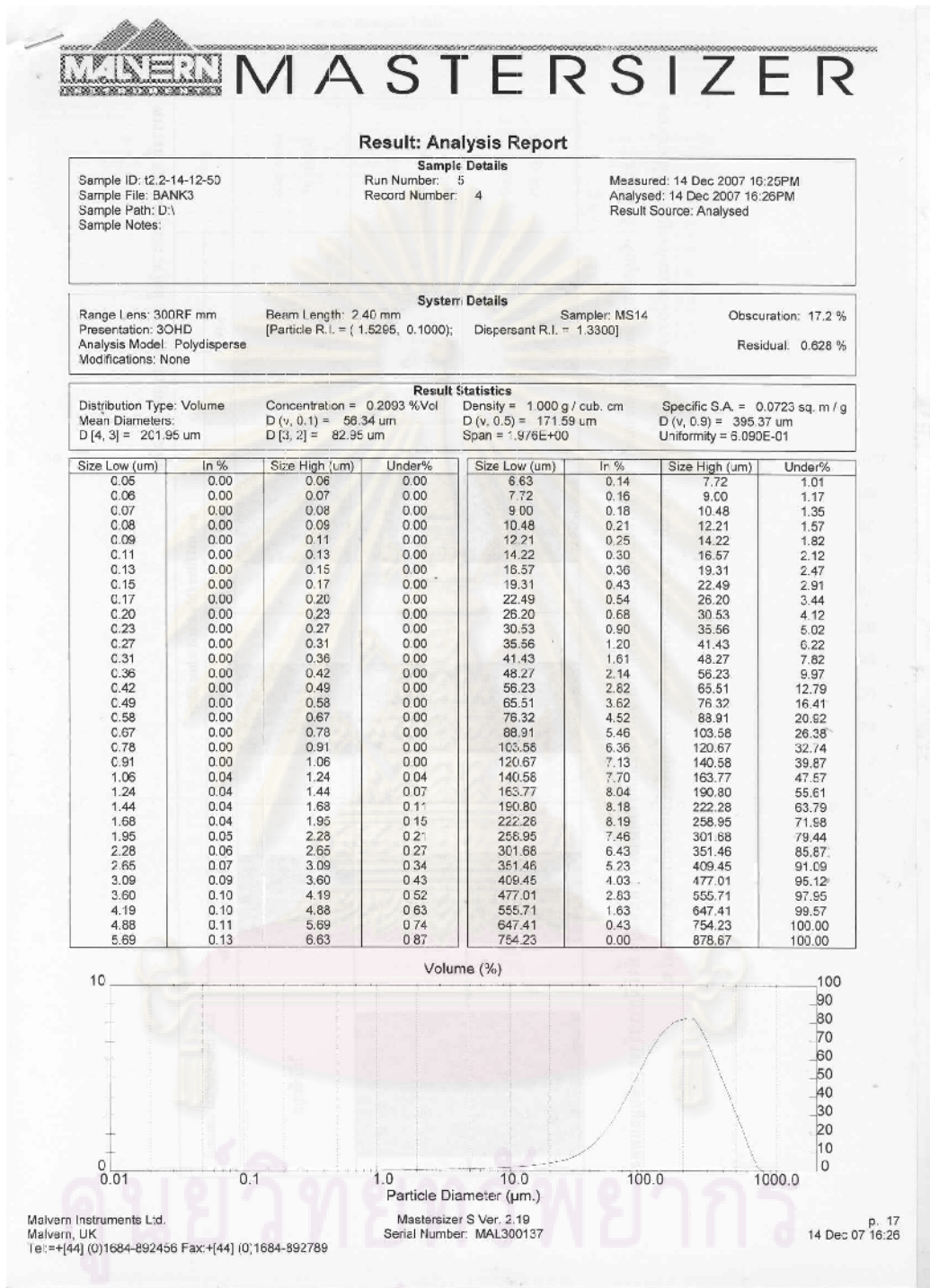
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.20	7.72	1.44
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.24	9.00	1.69
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.29	10.48	1.98
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.34	12.21	2.32
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.39	14.22	2.71
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.43	16.57	3.14
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.46	19.31	3.60
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.48	22.49	4.07
0.17	0.00	0.20	0.01	22.49	0.51	26.20	4.58
0.20	0.01	0.23	0.02	26.20	0.59	30.53	5.17
0.23	0.02	0.27	0.03	30.53	0.74	35.56	5.91
0.27	0.02	0.31	0.06	35.56	1.01	41.43	6.92
0.31	0.03	0.36	0.08	41.43	1.44	48.27	8.36
0.36	0.03	0.42	0.11	48.27	2.07	56.23	10.43
0.42	0.03	0.49	0.14	56.23	2.94	65.51	13.37
0.49	0.03	0.58	0.18	65.51	4.05	76.32	17.43
0.58	0.03	0.67	0.21	76.32	5.36	88.91	22.79
0.67	0.03	0.78	0.23	88.91	6.71	103.58	29.50
0.78	0.03	0.91	0.26	103.58	7.86	120.67	37.37
0.91	0.02	1.06	0.29	120.67	8.56	140.58	45.92
1.06	0.02	1.24	0.31	140.58	8.71	163.77	54.63
1.24	0.03	1.44	0.34	163.77	8.42	190.80	63.06
1.44	0.03	1.68	0.37	190.80	7.91	222.28	70.96
1.68	0.04	1.95	0.40	222.28	6.68	258.95	77.64
1.95	0.05	2.28	0.45	258.95	5.40	301.68	83.04
2.28	0.06	2.65	0.51	301.68	4.24	351.46	87.28
2.65	0.08	3.08	0.59	351.46	3.36	409.45	90.64
3.09	0.09	3.60	0.68	409.45	2.72	477.01	93.36
3.63	0.11	4.19	0.79	477.01	2.31	555.71	95.67
4.19	0.13	4.88	0.92	555.71	1.95	647.41	97.62
4.88	0.15	5.69	1.07	647.41	1.51	754.23	99.13
5.69	0.17	6.63	1.24	754.23	0.87	878.67	100.00



Mavern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 9
 Mavern, UK Serial Number: MAL300137 14 Dec 07 15:48
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

รูปที่ ข.15 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 131 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.16 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 131 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MAVERN MASTERSIZER

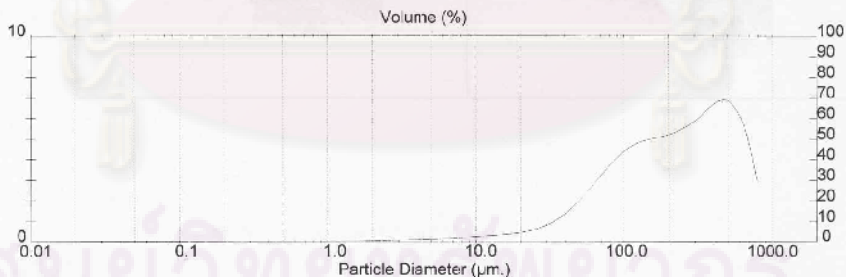
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: t3.2-14-12-50	Run Number: 7	Measured: 14 Dec 2007 16:53PM
Sample File: BANK3	Record Number: 6	Analysed: 14 Dec 2007 16:53PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sample: MS14	Obscuration: 16.8 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.6295, 0.1000); Dispersant R.I. = 1.3300]		
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.951 %
Modifications: None			

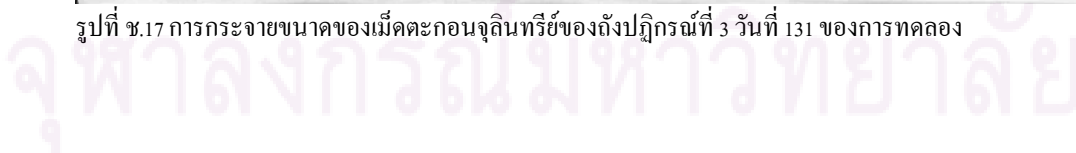
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2090 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0704 sq. m / g
Mean Diameters:	D [v, 0.1] = 54.09 um	D (v, 0.5) = 226.80 um	D (v, 0.9) = 603.57 um
D [4, 3] = 282.34 um	D [3, 2] = 85.23 um	Span = 2.423E+00	Uniformity = 7.616E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.17	7.72	1.10
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.20	9.00	1.29
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.23	10.48	1.52
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.26	12.21	1.78
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.30	14.22	2.08
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.34	16.57	2.43
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.39	19.31	2.82
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.47	22.49	3.29
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.57	26.20	3.86
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.73	30.53	4.58
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.95	35.56	5.53
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	1.26	41.43	6.79
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.66	48.27	8.45
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	2.14	56.23	10.59
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	2.99	65.51	13.28
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	3.26	76.32	16.54
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	3.80	88.91	20.34
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	4.26	103.58	24.60
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	4.81	120.67	29.20
0.91	0.03	1.06	0.03	120.67	4.84	140.58	34.04
1.06	0.03	1.24	0.06	140.58	4.97	163.77	39.02
1.24	0.03	1.44	0.09	163.77	5.06	190.80	44.06
1.44	0.04	1.68	0.13	190.80	5.21	222.28	49.30
1.68	0.04	1.95	0.17	222.28	5.41	258.95	54.71
1.95	0.05	2.28	0.22	258.95	5.69	301.68	60.41
2.28	0.06	2.65	0.28	301.68	6.03	351.46	66.44
2.65	0.07	3.09	0.36	351.46	6.53	409.45	72.97
3.09	0.09	3.60	0.44	409.45	6.83	477.01	79.90
3.60	0.10	4.19	0.54	477.01	6.78	555.71	86.58
4.19	0.11	4.88	0.65	555.71	6.11	647.41	92.89
4.88	0.13	5.69	0.78	647.41	4.73	754.23	97.42
5.69	0.15	6.63	0.93	754.23	2.58	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 23
 Malvern, UK Serial Number: MAL300137 14 Dec 07 16:54
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

รูปที่ ข.17 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 131 ของการทดลอง



MINERN MASTERSIZER

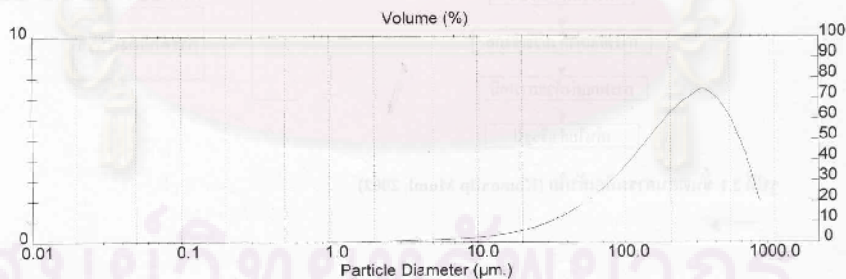
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: 14.3-14-12-50	Run Number: 10	Measured: 14 Dec 2007 17:37PM
Sample File: BANK3	Record Number: 9	Analysed: 14 Dec 2007 17:37PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 23.6 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.459 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2994 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0720 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 51.49 um	D (v, 0.5) = 227.99 um	D (v, 0.9) = 555.20 um
D [4.3] = 269.30 um	D [3, 2] = 83.33 um	Span = 2.209E+00	Uniformity = 6.794E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.05	0.00	5.63	0.17	7.72	1.15
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.19	9.00	1.35
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.23	10.48	1.58
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.27	12.21	1.84
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.32	14.22	2.17
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.39	16.57	2.56
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.48	19.31	3.04
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.59	22.49	3.63
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.73	26.20	4.36
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.89	30.53	5.25
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	1.09	35.56	6.34
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	1.32	41.43	7.65
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.58	48.27	9.24
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	1.89	56.23	11.13
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	2.24	65.51	13.36
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	2.63	76.32	15.99
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	3.07	88.91	19.07
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	3.57	103.56	22.64
0.78	0.00	0.91	0.00	103.56	4.11	120.67	25.75
0.91	0.03	1.06	0.03	120.67	4.69	140.56	31.43
1.06	0.03	1.24	0.06	140.56	5.27	163.77	35.70
1.24	0.03	1.44	0.09	163.77	5.84	190.80	42.54
1.44	0.04	1.68	0.13	190.80	6.36	222.28	48.90
1.68	0.04	1.95	0.17	222.28	6.79	258.95	55.69
1.95	0.05	2.28	0.23	258.95	7.13	301.68	62.83
2.28	0.07	2.65	0.29	301.68	7.40	351.46	70.23
2.65	0.08	3.09	0.38	351.46	7.20	409.45	77.43
3.09	0.10	3.60	0.47	409.45	6.70	477.01	84.13
3.60	0.11	4.19	0.58	477.01	5.90	555.71	90.03
4.19	0.12	4.88	0.70	555.71	4.78	647.41	94.83
4.88	0.13	5.69	0.84	647.41	3.40	754.23	98.23
5.69	0.15	6.63	0.99	754.23	1.77	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 35
 Malvern, UK Serial Number: MAL300137 14 Dec 07 17.39
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

รูปที่ ข.18 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 131 ของการทดลอง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MINERN MASTERSIZER

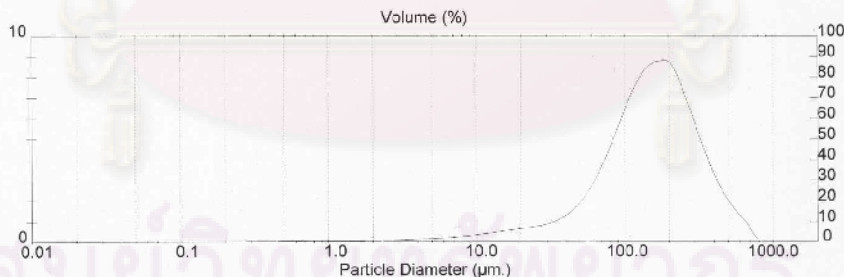
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: t1.2	Run Number: 2	Measured: 11 Jan 2008 17:19PM
Sample File: (Result Not Saved)		Analysed: 11 Jan 2008 17:19PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 11/1/51 1500		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 17.7 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = 1.5295, 0.1000]	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Modal: Polydisperse			Residual: 0.398 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1598 %Vc	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1219 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 48.09 um	D (v, C.5) = 163.99 um	D (v, 0.9) = 354.79 um
D [4, 3] = 183.04 um	D [3, 2] = 49.22 um	Span = 1.992E+00	Uniformity = 6.174E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.22	7.72	1.56
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.27	9.00	1.83
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.32	10.48	2.15
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.39	12.21	2.54
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.46	14.22	3.00
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.53	16.57	3.53
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.60	19.31	4.12
0.15	0.00	0.17	0.01	19.31	0.66	22.49	4.78
0.17	0.01	0.20	0.01	22.49	0.73	26.20	5.51
0.20	0.01	0.23	0.02	26.20	0.82	30.53	6.33
0.23	0.01	0.27	0.03	30.53	0.96	35.56	7.30
0.27	0.02	0.31	0.06	35.56	1.19	41.43	8.49
0.31	0.02	0.36	0.08	41.43	1.55	48.27	10.04
0.36	0.03	0.42	0.11	48.27	2.07	56.23	12.12
0.42	0.03	0.49	0.14	56.23	2.79	65.51	14.91
0.49	0.03	0.58	0.17	65.51	3.72	76.32	18.63
0.58	0.03	0.67	0.20	76.32	4.84	88.91	23.47
0.67	0.03	0.78	0.23	88.91	6.06	103.58	29.52
0.78	0.03	0.91	0.25	103.58	7.22	120.67	36.75
0.91	0.03	1.06	0.28	120.67	8.13	140.58	44.88
1.06	0.03	1.24	0.3*	140.58	8.63	163.77	53.51
1.24	0.03	1.44	0.34	163.77	8.75	190.80	62.26
1.44	0.03	1.68	0.37	190.80	8.63	222.28	70.90
1.68	0.04	1.95	0.4*	222.28	7.60	258.95	78.50
1.95	0.05	2.28	0.46	258.95	6.30	301.68	84.80
2.28	0.07	2.65	0.53	301.68	4.94	351.46	89.74
2.65	0.09	3.09	0.6*	351.46	3.70	409.45	93.44
3.09	0.10	3.60	0.72	409.45	2.65	477.01	96.09
3.60	0.12	4.19	0.84	477.01	1.87	555.71	97.96
4.19	0.14	4.88	0.98	555.71	1.28	647.41	99.23
4.88	0.15	5.69	1.15	647.41	0.68	754.23	99.92
5.69	0.19	6.63	1.34	754.23	0.08	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 12
 Malvern, UK Serial Number: MAL30C137 11 Jan 08 17:19
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

รูปที่ ข.19 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถ้ำปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 152 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MALVERN MASTERSIZER

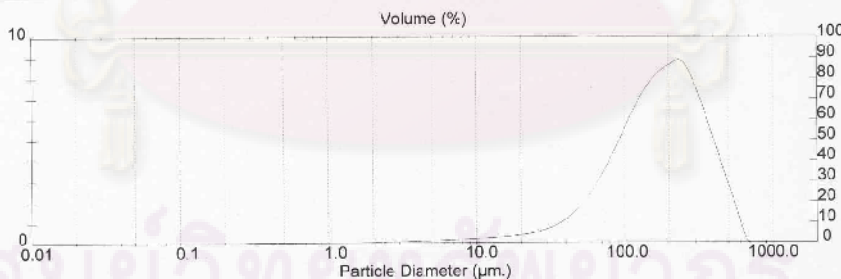
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: L2.1	Run Number: 4	Measured: 11 Jan 2008 17:47PM
Sample File: B110151	Record Number: 3	Analysed: 11 Jan 2008 17:47PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 11/1/51 1500		

System Details			
Range Lens: 3C0RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 17.2 %
Presentation: 301HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Modal: Polydisperse			Residual: 0.317 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1843 %V ₀	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1077 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 53.69 um	D (v, 0.5) = 176.36 um	D (v, 0.9) = 361.37 um
D [4, 3] = 200.72 um	D [3, 2] = 55.73 um	Span = 1.830E+00	Uniformity = 5.637E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.15	7.72	1.20
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.17	9.00	1.37
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.20	10.48	1.57
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.22	12.21	1.79
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.26	14.22	2.05
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.29	16.57	2.34
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.34	19.31	2.68
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.40	22.49	3.08
0.17	0.01	0.20	0.00	22.49	0.49	26.20	3.57
0.20	0.01	0.23	0.02	26.20	0.61	30.53	4.18
0.23	0.02	0.27	0.04	30.53	0.79	35.56	4.97
0.27	0.02	0.31	0.06	35.56	1.05	41.43	6.02
0.31	0.02	0.36	0.08	41.43	1.42	48.27	7.44
0.36	0.03	0.42	0.11	48.27	1.91	55.23	9.35
0.42	0.03	0.49	0.14	55.23	2.55	65.51	11.90
0.49	0.03	0.58	0.16	65.51	3.33	78.32	15.23
0.58	0.03	0.67	0.19	76.32	4.25	88.91	19.48
0.67	0.03	0.78	0.22	88.91	5.25	103.58	24.72
0.78	0.02	0.91	0.24	103.58	6.25	120.57	30.97
0.91	0.02	1.05	0.27	120.57	7.15	140.58	38.12
1.05	0.02	1.24	0.29	140.58	7.87	163.77	45.99
1.24	0.02	1.44	0.32	163.77	8.36	190.80	54.35
1.44	0.03	1.68	0.34	190.80	8.65	222.28	63.00
1.68	0.03	1.95	0.38	222.28	8.84	258.95	71.84
1.95	0.04	2.28	0.41	258.95	8.12	301.68	79.96
2.28	0.05	2.65	0.46	301.68	6.93	351.46	86.89
2.65	0.06	3.09	0.53	351.46	5.47	409.45	92.36
3.09	0.08	3.60	0.60	409.45	4.01	477.01	96.37
3.60	0.09	4.19	0.69	477.01	2.55	555.71	98.92
4.19	0.10	4.88	0.80	555.71	1.08	647.41	100.00
4.88	0.12	5.69	0.92	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.13	6.63	1.05	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 16
 Malvern, UK Serial Number: MAL300137 11 Jan 08 17:48
 Tel: +44 (0)1684-392456 Fax: +44 (0)1684-892789

รูปที่ ๒๐ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 152 ของการทดลอง



MASTERSIZER

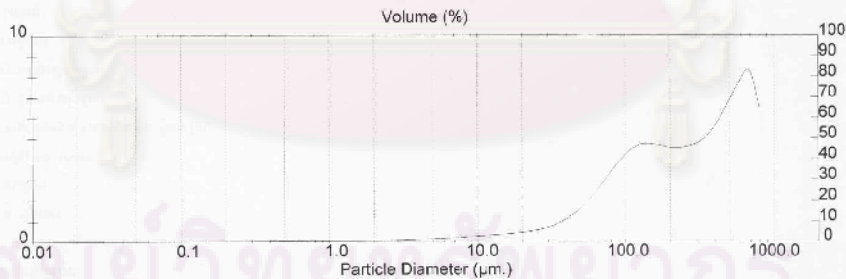
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: t.3.1	Run Number: 6	Measured: 11 Jan 2008 18:30PM
Sample File: B110151	Record Number: 5	Analysed: 11 Jan 2008 18:33PM
Sample Path: D:\		Result Source: Analysed
Sample Nctes: 11/1/51		
1500		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 15.5 %
Presentation: 3OHD	(Particle R.I. = (1.5295 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.589 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1783 %Vcl	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0855 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 58.43 um	D (v, 0.5) = 261.14 um	D (v, 0.9) = 700.67 um
D [4, 3] = 326.77 um	D [3, 2] = 67.78 um	Span = 2.459E+00	Uniformity = 7.894E-01

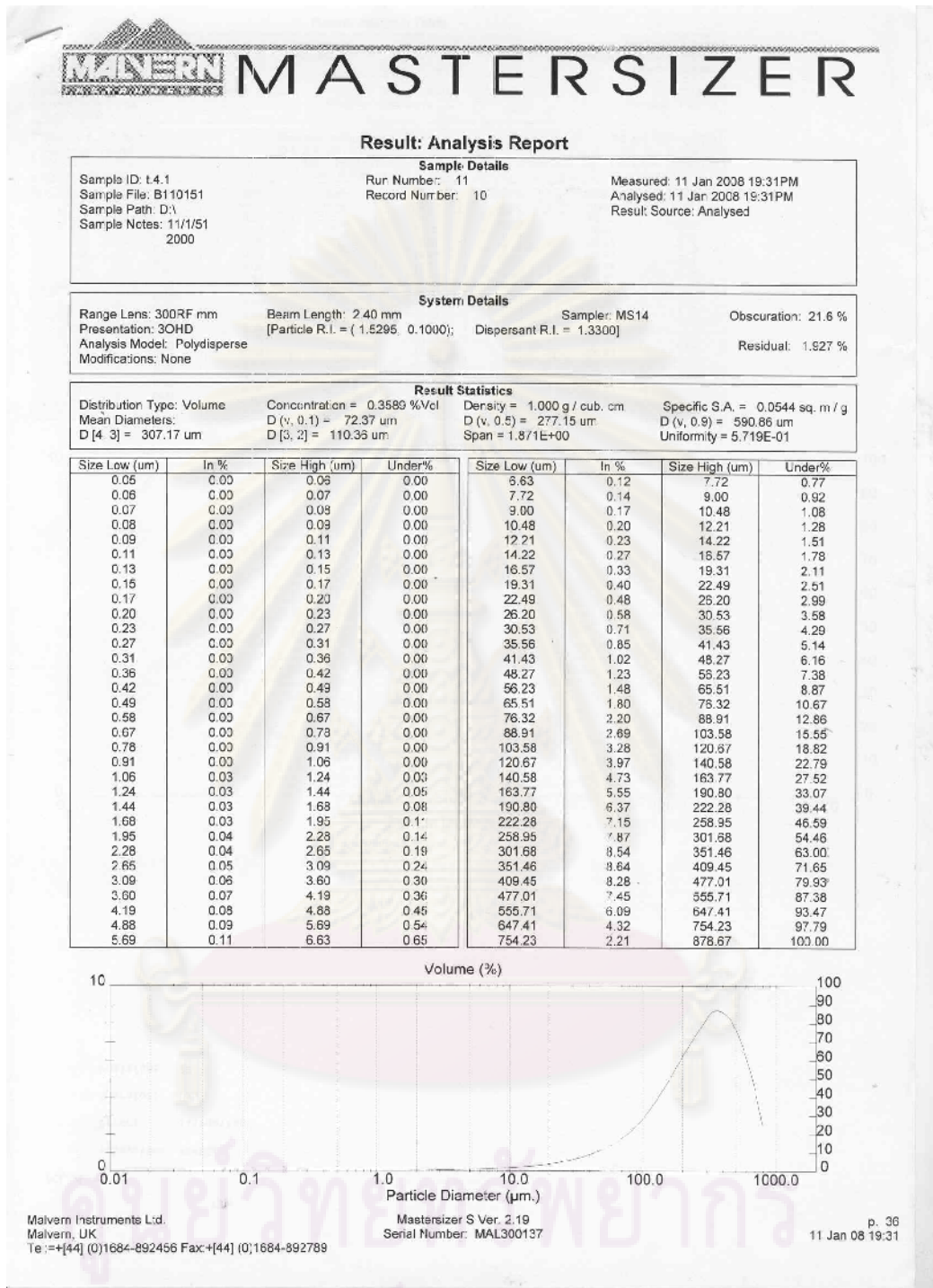
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.17	7.72	1.25
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.20	9.00	1.45
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.24	10.48	1.69
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.27	12.21	1.96
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.31	14.22	2.27
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.35	16.57	2.61
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.39	19.31	3.00
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.44	22.49	3.44
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.51	26.20	3.95
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.62	30.53	4.58
0.23	0.01	0.27	0.01	30.53	0.78	35.56	5.36
0.27	0.01	0.31	0.02	35.56	1.02	41.43	6.38
0.31	0.02	0.36	0.03	41.43	1.34	48.27	7.72
0.36	0.02	0.42	0.05	48.27	1.76	56.23	9.48
0.42	0.02	0.49	0.08	56.23	2.27	65.51	11.75
0.49	0.03	0.58	0.11	65.51	2.87	76.32	14.63
0.58	0.03	0.67	0.13	76.32	3.50	88.91	18.13
0.67	0.03	0.78	0.15	88.91	4.07	103.68	22.19
0.78	0.03	0.91	0.19	103.68	4.49	120.67	26.68
0.91	0.03	1.06	0.22	120.67	4.70	140.58	31.38
1.06	0.03	1.24	0.25	140.58	4.70	163.77	36.08
1.24	0.03	1.44	0.27	163.77	4.61	190.80	40.69
1.44	0.03	1.68	0.30	190.80	4.52	222.28	45.21
1.68	0.03	1.95	0.33	222.28	4.54	258.95	49.75
1.95	0.04	2.28	0.37	258.95	4.64	301.68	54.39
2.28	0.05	2.65	0.43	301.68	4.87	351.46	59.26
2.65	0.07	3.09	0.50	351.46	5.36	409.45	64.62
3.09	0.08	3.60	0.58	409.45	6.10	477.01	70.73
3.60	0.10	4.19	0.68	477.01	7.03	555.71	77.76
4.19	0.11	4.88	0.79	555.71	7.88	647.41	85.63
4.88	0.13	5.69	0.93	647.41	8.17	754.23	93.81
5.69	0.15	6.63	1.08	754.23	6.19	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S Ver. 2.19 p. 24
 Malvern, UK Serial Number: MAL300137 11 Jan 08 18:32
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

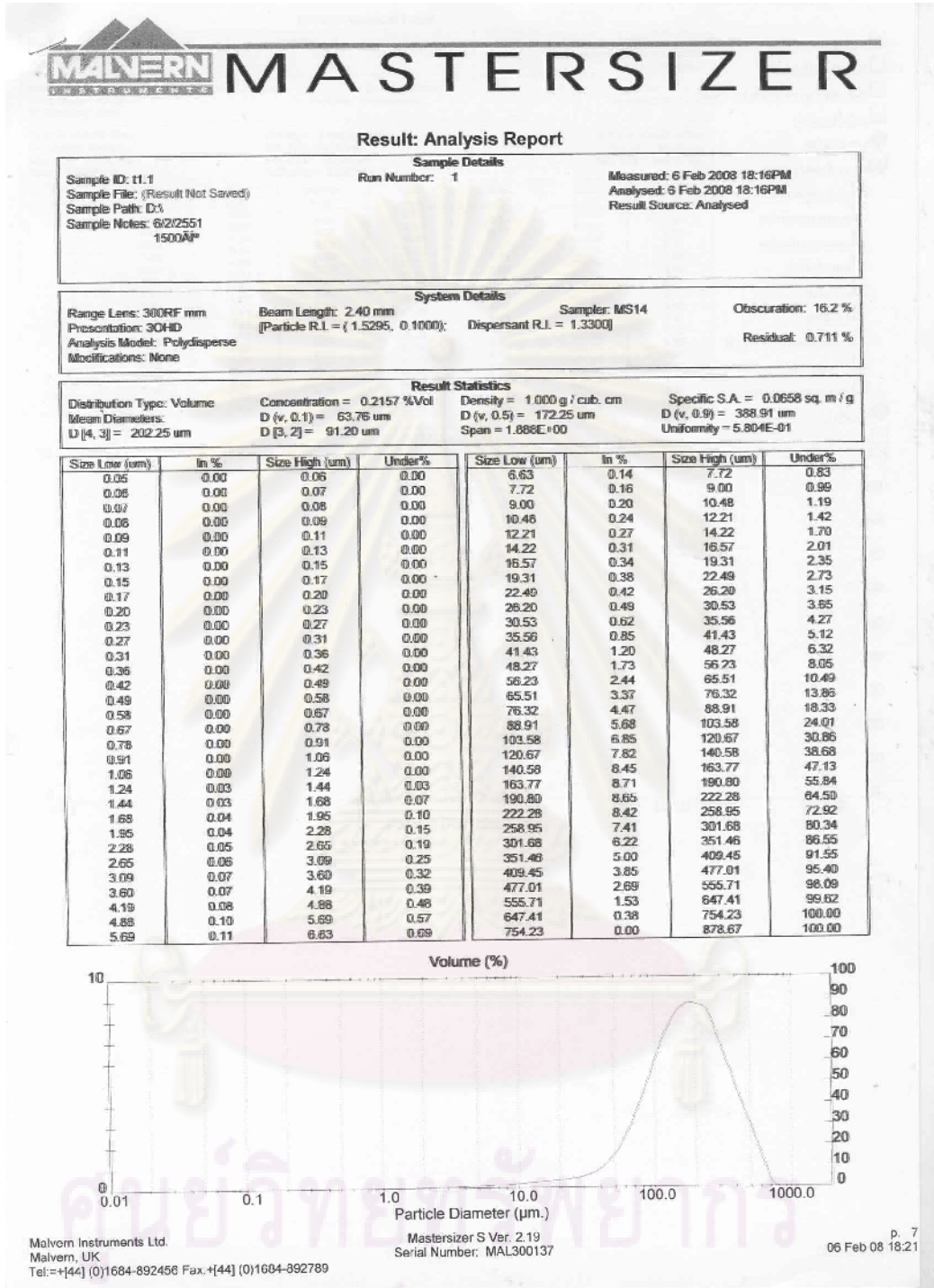
รูปที่ ข.21 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 152 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



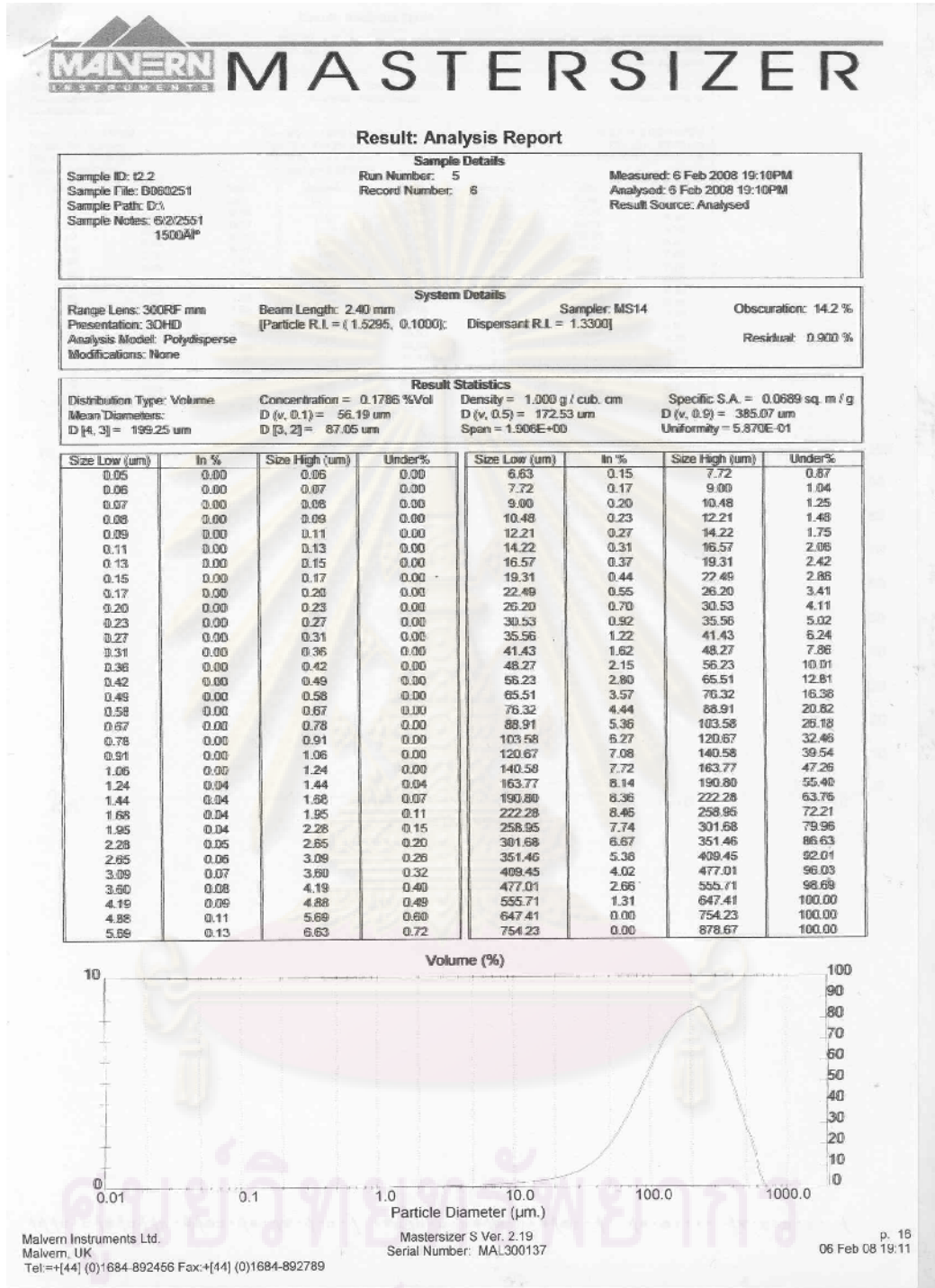
รูปที่ ๒๒ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 152 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



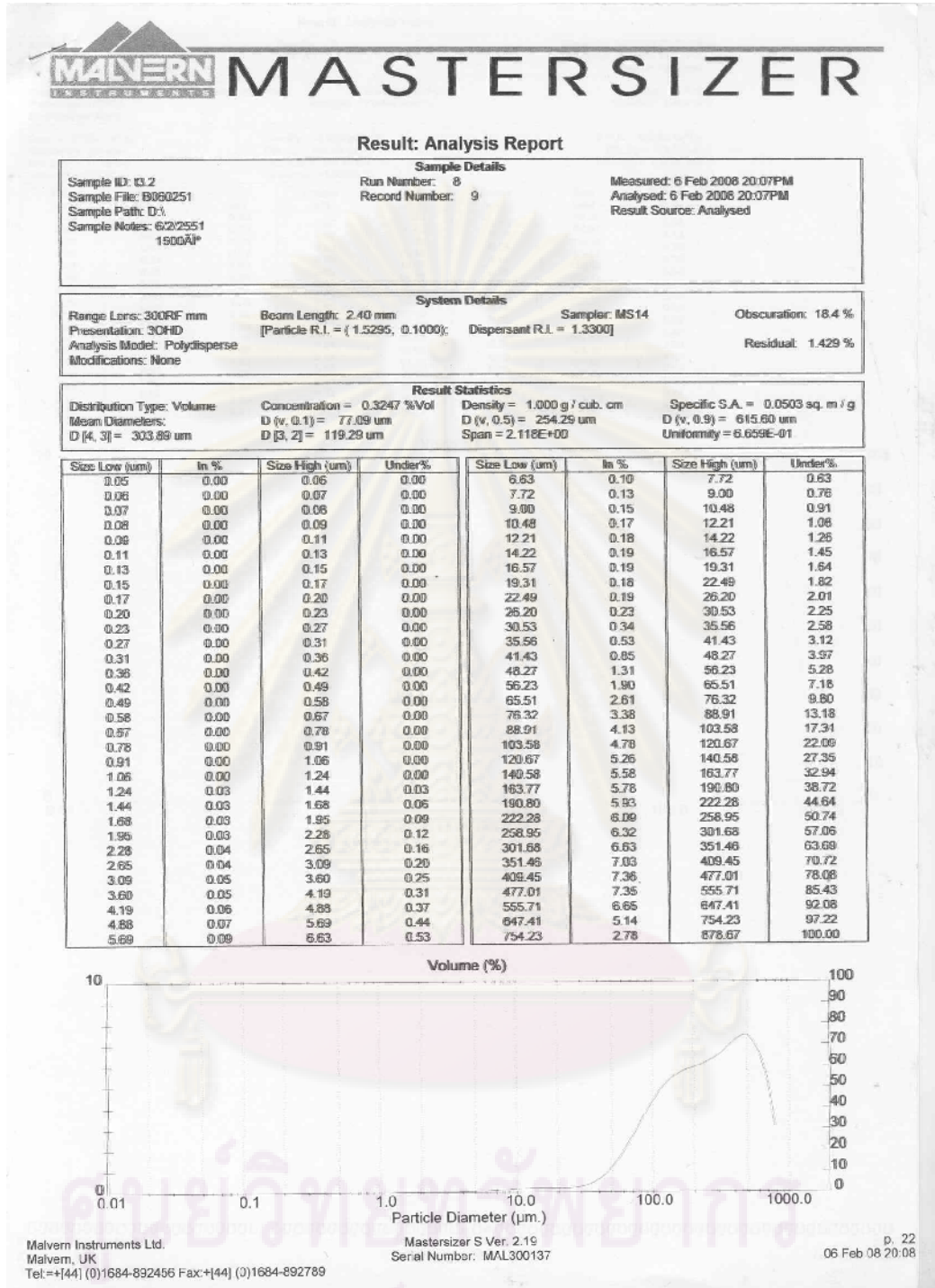
รูปที่ ข.23 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถ้ำปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 173 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



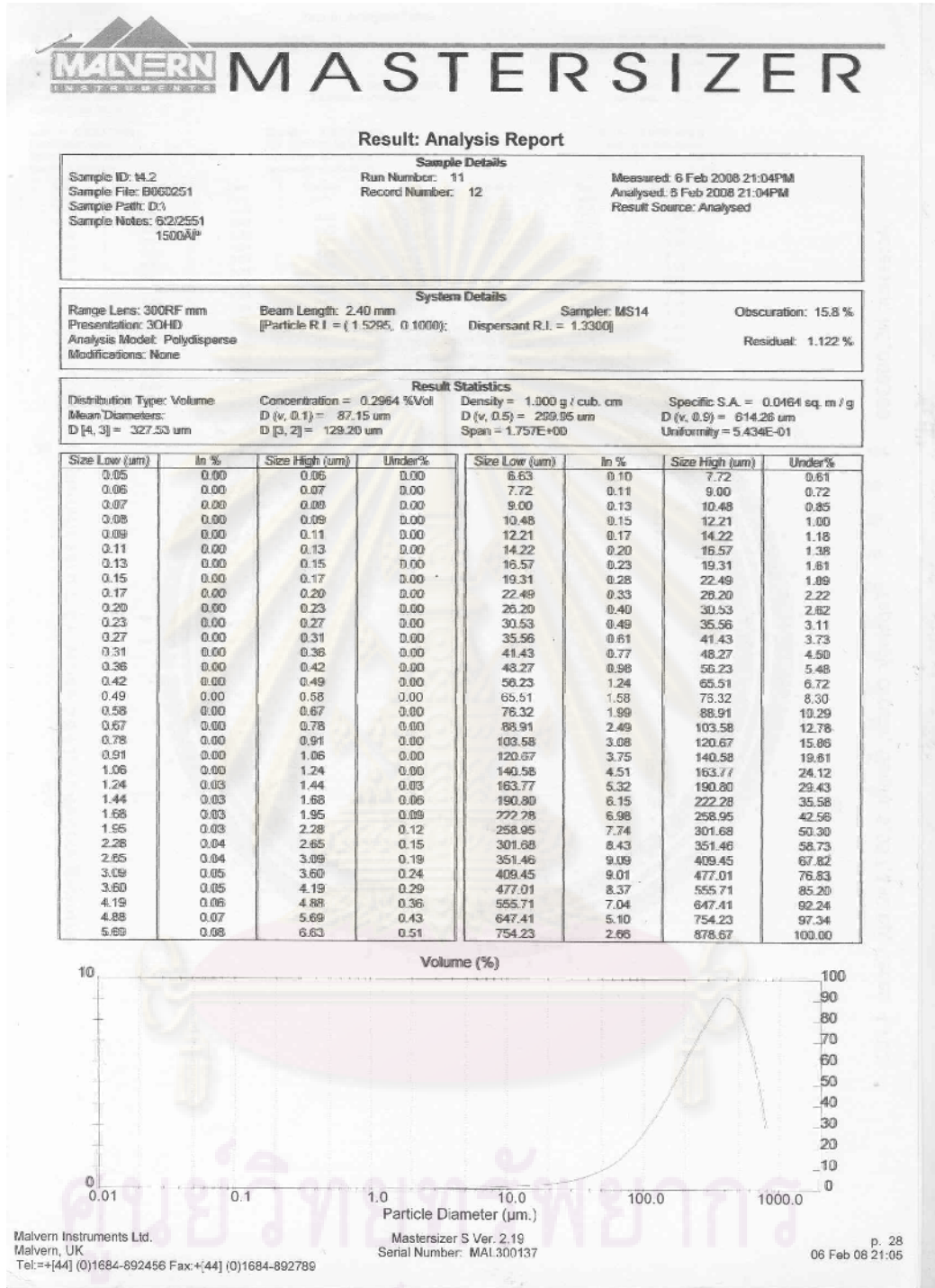
รูปที่ ข.24 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 173 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.25 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 173 ของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.26 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนลูดินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ที่ 4 วันที่ 173 ของการทดลอง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโกสินทร์ สุนทรโสภณ เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่ อำเภอปรานบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย สายวิทย์- คณิต จาก โรงเรียนพรหมานุสรณ์ จังหวัดเพชรบุรี ในปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์น้ำ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในปีการศึกษา 2547 และปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย