

ผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์
ในระบบยูเอเอสพีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรท



นางสาวทิพาวรรณ รักสงบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CARBON SOURCE ON MICROBIAL SLUDGE GRANULATION IN UASB
SYSTEM FOR TREATMENT OF SULFATE AND NITRATE CONTAINING WASTEWATER

Miss Thipawan Raksangob



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์
ในระบบยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและ
ไนเตรท

โดย

นางสาวทิพาวรรณ รักสงบ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

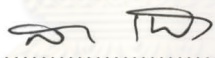
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

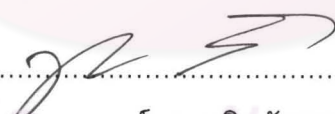
รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

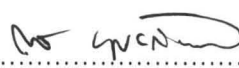
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ขวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ชะนะมา)

.....  กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

ทิพาวรรณ รักสงบ : ผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
ยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรท. (EFFECT OF CARBON
SOURCE ON MICROBIAL SLUDGE GRANULATION IN UASB SYSTEM FOR
TREATMENT OF SULFATE AND NITRATE CONTAINING WASTEWATER)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 217 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ
ยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรท ใช้ตั้งปฏิกรณ์ยูเอเอสบีลักษณะเหมือนกันจำนวน 3 ถัง
การทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนในถังที่ 1, 2 และ 3
ได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นจาก 600, 1200, 1800
จนถึง 2,400 มก./ล ตามลำดับ ความเข้มข้นไนเตรทและซัลเฟต 60 และ 90 มก./ล ตามลำดับ คิดเป็น
อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1 ตามลำดับ ช่วงที่ 2 เติมน้ำเสียต่อเนื่อง
จากช่วงที่ 1 เพื่อศึกษาผลของอัตราการระบรทุกซัลเฟตที่แตกต่างกันในถังที่ 1, 2 และ 3 ได้แก่ 1.08, 1.62
และ 2.16 ก./ล./วัน โดยมีกากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน กำหนดความเข้มข้นไนเตรท 60 มก./ล เท่ากัน
ทุกถัง

จากการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ในการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าถังที่ 1, 2 และ 3
ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 94.06, 92.06 และ 92.30 % ตามลำดับ บำบัดไนเตรทเท่ากับ 97.80,
97.83 และ 97.31% ตามลำดับ บำบัดซัลเฟตเท่ากับ 62.75, 62.14 และ 62.22 % ตามลำดับ สรุปได้ว่า
แหล่งคาร์บอนทั้งสามแหล่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรทและซัลเฟตใกล้เคียงกันและ
ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20.0:1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดจึงนำมาสู่การทดลองช่วงที่ 2
ซึ่งใช้กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน ผลการทดลองพบว่าถังที่ 1, 2 และ 3 ประสิทธิภาพการบำบัด
ซีโอดีเท่ากับ 97.08, 97.95 และ 98.65% ตามลำดับ บำบัดไนเตรทเท่ากับ 95.03, 94.94 และ 95.40%
ตามลำดับ บำบัดซัลเฟตเท่ากับ 74.64, 85.53 และ 85.67% ตามลำดับ สรุปได้ว่ากากแป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็น
ของเหลือจากกระบวนการผลิตอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อช่วยในการ
สร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์สำหรับบำบัดน้ำเสียในระบบยูเอเอสบีและระบบยังสามารถรับอัตราการระบรทุก
ซัลเฟตได้สูงถึง 2.16 ก./ล./วันด้วย นอกจากนี้ยังศึกษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
(SEM) พิจารณาร่วมกับเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน พบว่าผิวชั้นในของเม็ดตะกอนมีจำนวน
แบคทีเรียรูปร่างต่างๆเพิ่มมากขึ้นและแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่พบ คือ แบคทีเรียรีดิวิซซัลเฟต

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....ทิพาวรรณ.....รักสงบ.....

ปีการศึกษา.....2552..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

4989096020 : MAJOR OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : CARBON SOURCE / UASB / SULFATE / NITRATE

THIPAWAN RAKSANGOB: EFFECT OF CARBON SOURCE ON MICROBIAL SLUDGE GRANULATION IN UASB SYSTEM FOR TREATMENT OF SULFATE AND NITRATE CONTAINING WASTEWATER.
 THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D.,
 217 pp.

This research aims to study effect of carbon source on microbial sludge granulation in UASB system for treatment of sulfate and nitrate containing wastewater using 3 identical UASB reactors. The research was divided into 2 experiments; the first experiment used synthetic wastewater by varying carbon source in reactor no.1, 2 and 3 such as sucrose, tapioca flour and waste rice-flour, respectively. COD concentration started from 600 and increased to 1,200, 1,800 and 2,400 mg/L, respectively. Nitrate and sulfate concentration was kept constant at 60 and 90 mg/L, as a result COD:SO₄²⁻ ratios become 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 and 26.7:1, respectively. The second experiment aims to study effect of sulfate loading rate in reactor no.1, 2 and 3 to be 1.08, 1.62 and 2.16 g/L/day, respectively. The selected carbon source was waste rice-flour and kept constant nitrate 60 mg/L for every reactor.

At steady state condition, The result obtained in the first experiment showed that reactor no.1, 2 and 3 had percentages for COD removal were 94.06, 92.06 and 92.30%, respectively; for nitrate were 97.80, 97.83 and 97.31% , respectively ; for sulfate were 62.75, 62.14 and 62.22 % ,respectively. It could summarize that three carbon source could remove COD, nitrate and sulfate at similar efficiency. Also, COD:SO₄²⁻ ratios 20.0:1 presented the highest removal efficiency moved toward the second experiment and used waste rice-flour as carbon source. The result showed that reactor no.1, 2 and 3 had percentages for COD removal were 97.08, 97.95 and 98.95 % , respectively ; for nitrate were 95.03, 94.94 and 95.40 % , respectively ; for sulfate were 74.64, 85.53 and 85.67 % , respectively. Therefore, waste rice flour that obtained from the waste product can be used as an alternative carbon source for sludge granulation in UASB system and the system could accept higher sulfate loading rate 2.16 g/L/day. Moreover, from Scanning Electron Microscope (SEM) observation of the sludge granule and % electron flow assessment, it was found that inside the granule consisted of various shape of bacteria and the predominant microorganisms were Sulfate Reducing Bacteria (SRB).

Field of Study : Environmental science..... Student's Signature THIPAWAN RAKSANGOB
 Academic Year : 2009..... Advisor's Signature Chavalit Ratanatamskul

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา คณะกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ชะนะมา และอาจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการร่วมเป็นประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อการแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณสมชัย เจริญสวรรค์ และพี่ๆพนักงานโรงงานไทยน็อคส์สแตนเลสที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โรงงานเส้นหมี่ช่อเฮง ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกอนสลัดจ์และกากแป้งข้าวเจ้า สำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษฎา เวทีวุฒาจารย์ เจ้าหน้าที่บริษัทเมทโรทรีม สยาม จำกัด สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เครื่องวิเคราะห์ไอออนโครมาโตกราฟี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและหลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวอุรัจฉวี อุณหเลขกะ, นางสาวณัฐริกา ตันติวงศ์, นางสาวเพ็ญพร ฉายะวานิชย์, นางสาวจิตตรี พละกุล, นางสาวจิวโรบล แสงสว่าง, นางสาวจุฑาภรณ์ อัมระपाल และนายธนดล คุณผลิน สำหรับความช่วยเหลือที่มีให้กันมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยและคอยให้กำลังใจกันเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีได้กล่าวถึงที่มีส่วนเกี่ยวข้องและช่วยเหลือในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อทินกรณ์ และคุณแม่ไฉไล รักสงบ และครอบครัว รักสงบที่เป็นกำลังใจที่ดีและสนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment Processing).....	4
2.1.1 รูปแบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.....	6
2.1.2 ข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน.....	7
2.1.3 กลไกพื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย.....	7
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment).....	8
2.2.1 หลักการของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	8
2.2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	9
2.2.3 ประเภทของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	11
2.2.4 ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	13
2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	14
2.3 กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction).....	20
2.3.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	20
2.3.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสำคัญต่อการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต...	20

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ใน การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต.....	22
2.4 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification).....	23
2.4.1 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย.....	23
2.4.2 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	23
2.4.3 ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสำคัญต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	26
2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)	29
2.5.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี.....	29
2.5.2 คุณลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	30
2.5.3 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์แยกสามสถานะ.....	31
2.5.4 ประโยชน์ของการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ.....	32
2.5.5 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี.....	32
2.6 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granulation).....	34
2.6.1 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	34
2.6.2 ปัจจัยที่ทำให้ระบบยูเอเอสบีรับอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ได้สูง.....	34
2.6.3 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	35
2.7 กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Process of Granulation).....	37
2.7.1 ความสำคัญของ Extra Cellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ดตะกอน จุลินทรีย์.....	37
2.7.2 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	38
2.7.3 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	39
2.7.4 ทฤษฎีการเกิดเม็ดตะกอน.....	41
2.8 สมดุลมวลในระบบยูเอเอสบี.....	47
2.8.1 สมดุลมวลซีไอดี.....	47
2.8.2 สมดุลมวลของซัลเฟต.....	49
2.8.3 สมดุลมวลของไนโตรเจน.....	50
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
2.9.1 ศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทและซัลเฟตในระบบยูเอเอสบี....	51
2.9.2 ศึกษากระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี.....	54

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	57
3.1 แผนการทดลอง.....	57
3.1.1 ช่วงการทดลองที่ 1	57
3.1.2 ช่วงการทดลองที่ 2	58
3.2 การเตรียมน้ำเสีย.....	59
3.2.1 วิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	59
3.2.2 ลักษณะของน้ำเสียตลอดการทดลอง.....	60
3.3 ลักษณะและคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอน.....	61
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	62
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
3.5.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	63
3.5.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ.....	64
3.5.3 ถังพักน้ำเสีย.....	64
3.5.4 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	65
3.5.5 อุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพ.....	65
3.6 หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	66
3.7 การเดินและการควบคุมระบบ.....	67
3.7.1 การเดินระบบ.....	67
3.7.2 การควบคุมระบบ.....	68
3.8 การเก็บและวิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	69
3.9 รายละเอียดการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	70
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	72
4.1 ผลการวิจัย	72
4.1.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1.....	72
4.1.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2.....	94
4.2 ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	112
4.2.1 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับระบบ.....	112
4.2.2 ขนาดและโครงสร้างภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	114
4.2.3 บริเวณผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	117

4.2.4 บริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งซีก.....	120
4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	122
4.3.1 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์.....	126
4.3.2 ของแข็งแขวนลอยระเหย.....	128
4.4 การวิจารณ์ผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี (การทดลองช่วงที่ 1).....	130
4.4.1 ของแข็งแขวนลอยระเหยและประสิทธิภาพการบำบัด.....	130
4.4.2 ซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัด.....	132
4.4.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัด.....	133
4.4.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัด.....	134
4.5 การวิจารณ์ผลของอัตราภาระบรรทุกซัลเฟต (Sulfate Loading Rate) ที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี (การทดลองช่วงที่ 2).....	137
4.5.1 ของแข็งแขวนลอยระเหยและประสิทธิภาพการบำบัด.....	137
4.5.2 ซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัด.....	138
4.5.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัด.....	139
4.5.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัด.....	140
4.6 ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ.....	141
4.6.1 พีเอช.....	141
4.6.2 อุณหภูมิ.....	142
4.6.3 สภาพต่างทั้งหมด.....	142
4.6.4 กรดไขมันระเหย.....	142
4.7 ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity; SMA).....	143
4.8 สมดุลมวลของสารในระบบ.....	144
4.8.1 สมดุลมวลของซีไอดี.....	144
4.8.2 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน.....	145
4.8.3 สมดุลมวลของซัลเฟต.....	147
4.8.4 สมดุลมวลของไนโตรเจน.....	148

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	149
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	149
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	151
รายการอ้างอิง.....	152
ภาคผนวก.....	158
ภาคผนวก ก ผลการทดลองช่วงที่ 1.....	159
ภาคผนวก ข ผลการทดลองช่วงที่ 2	180
ภาคผนวก ค การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	190
ภาคผนวก ง การหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน	197
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ.....	202
ภาคผนวก ฉ สมดุลมวลซีโอดี ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน.....	210
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	217

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีในประเทศไทย.....	4
2.2	ปฏิกริยารีดอกซ์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย	8
2.3	เปรียบเทียบอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทต่างๆ.....	12
2.4	แบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนกับระดับอุณหภูมิ.....	14
2.5	ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก.....	18
2.6	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อการยับยั้งประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรีย 50%.....	18
2.7	ผลของแอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อระบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	19
2.8	อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	29
2.9	ทฤษฎีการเกิดเม็ดตะกอน.....	41
3.1	ระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	58
3.2	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซีโอดี 600 มิลลิกรัมต่อลิตร...	59
3.3	ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ช่วงการทดลองที่ 1	60
3.4	ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ช่วงการทดลองที่ 2.....	60
3.5	ลักษณะและคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอน.....	61
3.6	พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่างน้ำและความถี่ในการเก็บตัวอย่าง.....	69
4.1	กำหนดการทดลองช่วงที่ 1.....	72
4.2	ปริมาณของแข็งแขวนลอยและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1	83
4.3	ซีโอดีเข้า-ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	84
4.4	ปริมาณไนเตรทและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1	87
4.5	ปริมาณซัลเฟตและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1	89
4.6	ปริมาณก๊าซชีวภาพช่วงการทดลองที่ 1.....	92

ตารางที่	หน้า
4.7	กำหนดการทดลองช่วงที่ 2..... 94
4.8	ปริมาณของแข็งแขวนลอยและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2 104
4.9	ซีไอดีเข้า-ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 2..... 104
4.10	ปริมาณไนเตรทและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2 106
4.11	ปริมาณซัลเฟตและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2 108
4.12	ปริมาณก๊าซชีวภาพช่วงการทดลองที่ 2..... 111
4.13	ชนิดของแบคทีเรียสร้างมีเทน..... 112
4.14	ชนิดของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต..... 113
4.15	ชนิดของแบคทีเรียดีไนโตรฟายอิง..... 114
4.16	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นระบบ..... 123
4.17	การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 123
4.18	เปอร์เซ็นต์ของช่วงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1 126
4.19	เปอร์เซ็นต์ของช่วงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 127
4.20	ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยตลอดการทดลอง..... 128
4.21	ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หลังสิ้นสุดการทดลอง..... 143
4.22	ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 1..... 144
4.23	ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 2..... 144
4.24	เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) ของการทดลองช่วงที่ 1... 145
4.25	เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) ของการทดลองช่วงที่ 2... 146
4.26	ค่า % sulfur recovery ของซัลเฟตในการทดลองช่วงที่ 1..... 147
4.27	ค่า % sulfur recovery ของซัลเฟตในการทดลองช่วงที่ 2..... 147
4.28	ค่า % nitrogen recovery ของไนโตรเจนในการทดลองช่วงที่ 1..... 148
4.29	ค่า % nitrogen recovery ของไนโตรเจนในการทดลองช่วงที่ 2..... 148
ก.1	พีเอชของการทดลองช่วงที่ 1..... 159
ก.2	อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1..... 161
ก.3	สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1..... 163
ก.4	กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 1..... 165

ตารางที่	หน้า
ก.5	ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 1..... 166
ก.6	ซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 1..... 167
ก.7	ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 1..... 168
ก.8	ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1..... 169
ก.9	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1 171
ก.10	ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1..... 173
ก.11	ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1..... 174
ก.12	ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1..... 176
ก.13	ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1..... 178
ก.14	ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 1..... 179
ข.1	พีเอชของการทดลองช่วงที่ 2..... 180
ข.2	อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2..... 181
ข.3	สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2..... 182
ข.4	กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2..... 182
ข.5	ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2..... 183
ข.6	ซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 2..... 184
ข.7	ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2..... 184
ข.8	ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2..... 185
ข.9	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2 185
ข.10	ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2..... 186
ข.11	ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2..... 187
ข.12	ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2..... 187
ข.13	ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2..... 188
ข.14	ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 2..... 189
ง.1	ค่า Conversion Factor (CF) ที่อุณหภูมิต่างๆ 199
ง.2	ข้อมูลดิบของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาต่างๆ ตลอดการทดลองของ ตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ..... 200
ง.3	ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หลังสิ้นสุดการทดลอง..... 201

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	6
2.2	6
2.3	7
2.4	9
2.5	25
2.6	26
2.7	27
2.8	27
2.9	31
2.10	32
2.11	35
2.12	36
2.13	37
2.14	38
2.15	39
2.16	40
2.17	42
2.18	44
2.19	45
3.1	62
3.2	62

ภาพที่	หน้า	
3.3	รายละเอียดแบบจำลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีในห้องปฏิบัติการ.....	64
3.4	แบบจำลองหลักการตกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	65
3.5	อุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพแบบแทนที่น้ำ.....	66
3.6	หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	66
3.7	ลักษณะการติดตั้งระบบยูเอเอสบี.....	67
4.1	ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	73
4.2	ค่าอุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	75
4.3	ค่าสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	77
4.4	ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	78
4.5	ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	80
4.6	ปริมาณของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่1...	82
4.7	ซีไอดีเข้า-ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองช่วงที่1...	86
4.8	ไนเตรทเข้า-ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	88
4.9	ซัลเฟตเข้า-ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	90
4.10	การยับยั้งของอะซิโตคลาस्टิกเมทาโนเจนโดยโซเดียมซัลเฟต.....	91
4.11	ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองช่วงที่ 1.....	92
4.12	ปริมาณ Sulfate Loading Rate ในแต่ละถังปฏิกรณ์.....	94
4.13	ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	95
4.14	ค่าอุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	97
4.15	ค่าสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	98
4.16	ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	100
4.17	ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	101
4.18	ปริมาณของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2..	103
4.19	ซีไอดีเข้าและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	105
4.20	ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	108
4.21	ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน	109

ภาพที่	หน้า	
4.22	ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตตลอดการทดลองครั้งที่ 2.....	110
4.23	ก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองครั้งที่ 2.....	111
4.24	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) ขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 50 เท่า).....	116
4.25	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....	118
4.26	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า).....	119
4.27	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) บริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งซีก (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....	121
4.28	การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง.....	124
4.29	การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ	126
4.30	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยช่วงการทดลองที่ 1.....	130
4.31	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีช่วงการทดลองที่ 1.....	132
4.32	ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทช่วงการทดลองที่ 1.....	133
4.33	ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตช่วงการทดลองที่ 1.....	134
4.34	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ไนเตรทและซัลเฟตของการทดลองครั้งที่ 1.....	136
4.35	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยช่วงการทดลองที่ 2.....	137
4.36	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีช่วงการทดลองที่ 2.....	138
4.37	ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทช่วงการทดลองที่ 2.....	139
4.38	ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตช่วงการทดลองที่ 2.....	140
4.39	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ไนเตรทและซัลเฟตของการทดลองครั้งที่ 2.....	141
ค.1	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของตะกอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ.....	190
ค.2	การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองครั้งที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน.....	191

ภาพที่	หน้า
ค.3 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน.....	192
ค.4 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน.....	193
ค.5 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดีเท่ากับ 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	194
ค.6 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดีเท่ากับ 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	195
ค.7 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีโอดีเท่ากับ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	196
ง.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity; SMA).....	197
ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	200
ง.3 อัตราการเกิดก๊าซมีเทน.....	201
จ.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ช่วงการทดลองที่ 1.....	202
จ.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	203
จ.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	204
จ.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	205
จ.5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ช่วงการทดลองที่ 2.....	206
จ.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	207
จ.7 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	208
จ.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	209

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาน้ำเสียจัดเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขเป็นอันดับต้นๆ ของปัญหาสิ่งแวดล้อมในประเทศ โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มักเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่สำคัญแห่งหนึ่ง ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่ปล่อยออกมาก็จะแตกต่างกันไปตามประเภทของโรงงาน กระบวนการผลิต เทคโนโลยีการผลิต และวัตถุดิบที่เลือกใช้ ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทต้องใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกัน เช่น โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานชุบโลหะ และโรงงานผลิตสแตนเลส น้ำเสียจากกระบวนการผลิตมักมีสารจำพวกโลหะหนัก ซัลเฟตและไนเตรทปนเปื้อนในปริมาณสูงซึ่งสารเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและไม่สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีธรรมชาติจำเป็นต้องใช้วิธีทางเคมี (Chemical) หรือการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion exchange) บำบัด ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีและเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเอาระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Treatment) อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ มาย่อยสลายและช่วยกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารจำพวกโลหะหนัก ซัลเฟต และไนเตรทจะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์เพื่อการเจริญเติบโตส่งผลให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment) และระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรด (Acid forming bacteria), แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Producing Bacteria, MPB) และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria, SRB)

ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ได้รับความนิยมระบบหนึ่ง เนื่องจากนำไปพัฒนาเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ทั้งระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แต่ระบบนี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่ที่จุลินทรีย์ในระบบเจริญเติบโตแบบแขวนลอย (ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง) ทำให้กว่าตะกอนจุลินทรีย์จะจับตัวเป็นเม็ดตะกอน (Granules) นั้นจะต้องใช้เวลาสร้างเม็ดตะกอนนานถึง 3-6 เดือน และต้องเติมแหล่งคาร์บอน (Carbon Source) ให้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ใน

ปริมาณสูง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสพีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรท เพื่อศึกษาและพัฒนาความรู้เกี่ยวกับแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียและเพื่อประโยชน์ในการบำบัดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของการเติมแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้าที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ซัลเฟตและไนเตรทและการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสพี

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราภาวะบรรทุกซัลเฟตที่มีต่อการกำจัดซีโอดี ซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสียที่มีไนเตรทและซัลเฟตสูงโดยใช้กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะใช้ถังปฏิกรณ์จำลองยูเอเอสพีลักษณะเหมือนกันจำนวน 3 ชุด ทำการติดตั้งและเดินระบบบริเวณริมระเบียงชั้น 17 อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 105 วัน ดำเนินการทดลอง ดังนี้

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 แหล่งคาร์บอนน้ำตาลทราย

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แหล่งคาร์บอนแป้งมัน

ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 แหล่งคาร์บอนกากแป้งข้าวเจ้า

กำหนดความเข้มข้นของไนเตรทและซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเป็น 60 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นจาก 600, 1200, 1800 จนถึง 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1

1.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบต่อเนื่องจากช่วงที่ 1 เป็นระยะเวลา 30 วัน แหล่งคาร์บอนที่เติมลงใน 3 ถึงปฏิกรณ์ ได้แก่ กากแป้งข้าวเจ้า

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ค่าซีโอดีเท่ากับ 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ค่าซีโอดีเท่ากับ 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ค่าซีโอดีเท่ากับ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

กำหนดความเข้มข้นของไนเตรทน้ำเข้าระบบทั้งสามถึงปฏิกรณ์เป็น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซัลเฟตของน้ำเข้าระบบถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 180, 270 และ 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราภาวะบรรทุกซัลเฟตเท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตรต่อวัน

โดยพารามิเตอร์ทำการศึกษาทั้งสองช่วงการทดลอง ได้แก่ พีเอช(pH) อุณหภูมิ (Temperature) สภาพด่างทั้งหมด(Alkalinity) กรดไขมันระเหย(VFA) ซีโอดี(COD) ไนเตรท (Nitrate) ซัลเฟต(Sulfate) ซัลไฟด์(Sulfide) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด(TSS) ปริมาณก๊าซทั้งหมด (Biogas) สัดส่วนของก๊าซ(GC) ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน(SMA) ขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (SEM) การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Particle Size Analyzer)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรท และซัลเฟต รวมถึงการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีภายในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.4.2 ช่วยในการหาแหล่งคาร์บอนที่มีราคาถูกหรือเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตในโรงงานต่างๆ เช่น เศษแป้ง, เศษผลไม้จากโรงงานผลิตผลไม้กระป๋อง, กากน้ำตาล ฯลฯ เพื่อเป็นทางเลือกในการประหยัดค่าใช้จ่ายในการเติมแหล่งคาร์บอนให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีได้

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิจัยไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประยุกต์ใช้และพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่น้ำเสียมีซัลเฟตและไนเตรทได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment Processing)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เกิดจากจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติใช้สารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำเสียเป็นอาหาร เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์หรือความสกปรกในน้ำลดลงหรือหมดไป

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีในประเทศไทย

ระบบ	ลักษณะ
1. บ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond)	อาศัยธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ประกอบด้วย Anaerobic Pond, Facultative Pond, Aerobic Pond, Maturation Pond เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
2. บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon, AL)	อาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) แบบทุ่นลอยหรือแบบยึดติดกับแท่น
3. แอคทีเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge Process, AS)	อาศัยการทำงานของ Aerobic Bacteria เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ใช้ได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเดินระบบจะมีความยุ่งยาก จำเป็นต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพให้เหมาะสมกับการทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์
4. ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF)	ถังกรองไร้อากาศที่ภายในมีตัวกลาง (Media) เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้มากขึ้น บรรจุอยู่ตัวกลางที่ใช้ เช่น หิน หลอดหรือลูกบอลพลาสติก

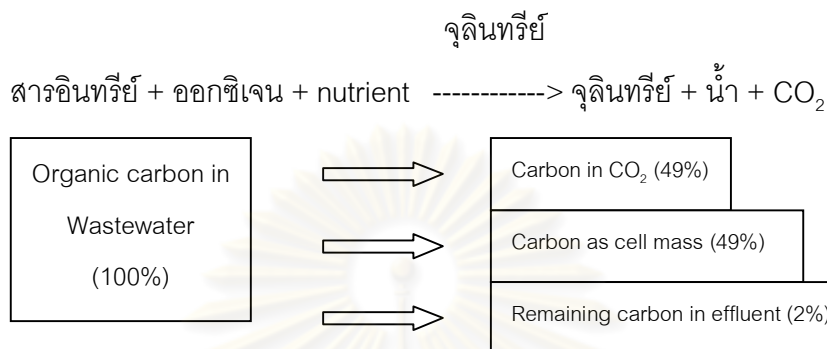
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีในประเทศไทย

ระบบ	ลักษณะ
5.เอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR)	เป็นประเภทเติมเข้า - ถ่ายออก (Fill-and-Draw Activated Sludge) ประกอบด้วย 5 ช่วง ดังนี้ ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) นำน้ำเสียเข้าระบบ, ช่วงทำปฏิกิริยา (React) ช่วยลด BOD ในน้ำเสีย, ช่วงตกตะกอน (Settle) ทำให้ตะกอนตกลงก้นถัง, ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw) ระบายน้ำที่ผ่านการบำบัด และช่วงพักระบบ (Idle) เพื่อซ่อมแซมหรือรอรับน้ำเสียใหม่
6.น้ำเสียคลองวนเวียน (Oxidation Ditch, OD)	อาศัยจุลินทรีย์ ใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหาร จากนั้นจึงแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านบำบัดแล้ว โดยวิธีตกตะกอนในถังตกตะกอน (Sedimentation Tank)
7.แผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC)	น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางทรงกระบอกภายในถังบำบัด โดยหมุนอย่างช้า ๆ เมื่อหมุนขึ้นพื้นน้ำและสัมผัสอากาศ จุลินทรีย์ที่ติดอยู่กับตัวกลางจะใช้ออกซิเจนจากอากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่สัมผัสติดตัวกลางขึ้นมาและเมื่อหมุนจมลงก็จะนำน้ำเสียขึ้นมาบำบัดใหม่สลับกันเช่นนี้ ตลอดเวลา
8.โปรยกรอง (Trickling Filter)	น้ำเสียจะถูกฉีดเป็นฝอยตกลงมายังก้อนหินที่เลี้ยงจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับก้อนหินจะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในน้ำเสียขณะที่น้ำไหลผ่านก้อนหิน
9.ยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)	ป้อนน้ำเสียเข้าระบบจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ขึ้นสู่ด้านบน (Up-flow Feeding) เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบจะเจริญเติบโตอยู่ในแบบแขวนลอย โดยอาศัยการยึดเกาะกันเองของจุลินทรีย์ (Self-Immobilization)

2.1.1 รูปแบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

1) แบบแอโรบิกหรือแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment)

สารอินทรีย์จะถูกจุลินทรีย์ในธรรมชาติย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นจำนวนมาก (ประมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์)

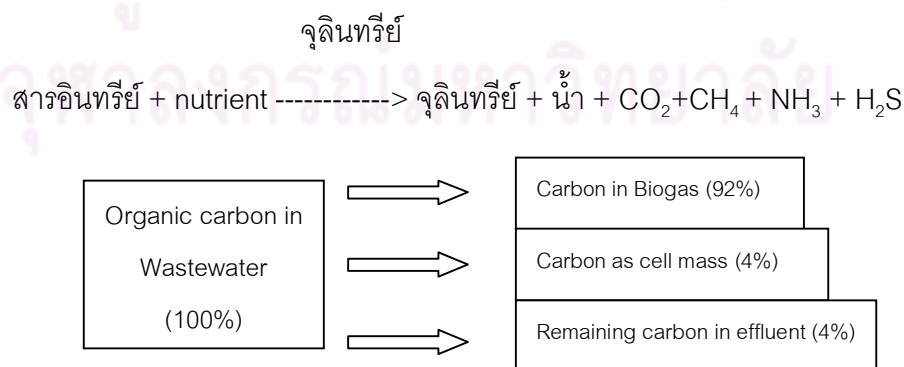


ภาพที่ 2.1 ปฏิบัติการในการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน

ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบนี้คือ ระบบมีประสิทธิภาพสูงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง เนื่องจากต้องมีการพ่นอากาศให้กับระบบและยังต้องกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน นอกจากนี้กระบวนการบำบัดแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการให้ออกซิเจนอย่างเพียงพอกับระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง ระบบบำบัดแบบน้ำเสียคลองวนเวียน เป็นต้น

2) แบบแอนแอโรบิกหรือแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment)

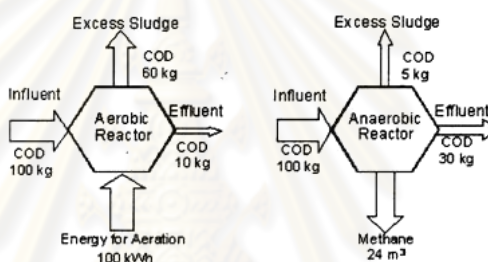
อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนโดยจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวอย่างเช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบยูเอเอสบี ปฏิบัติการในการย่อยสลาย ดังนี้



ภาพที่ 2.2 ปฏิบัติการในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.1.2 ข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนและแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนจะได้น้ำทิ้งที่มีสารที่ต้องการออกซิเจนเหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย (ประมาณ 10% ของสารอินทรีย์ตั้งต้น) โดยสารอินทรีย์ตั้งต้นส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นตะกอนส่วนเกิน (Excess sludge) ในรูปของมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ (Bacterial biomass) คิดเป็นปริมาณซีโอดีประมาณ 60% ของซีโอดีเข้าระบบ ซึ่งจำเป็นต้องนำไปบำบัดเพิ่มเติม ส่วนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีปริมาณของแข็ง (Residual solid) และสารที่ต้องการออกซิเจนเหลืออยู่ในน้ำทิ้งปริมาณมากกว่ากระบวนการใช้ออกซิเจน (ประมาณ 30 % ของสารอินทรีย์ตั้งต้น) แต่จะให้ตะกอนส่วนเกินในปริมาณน้อยกว่าและมีความเสถียรกว่า การใช้ออกซิเจน คิดเป็นปริมาณซีโอดีประมาณ 5% ของซีโอดีเข้าระบบ และยังให้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงและแหล่งพลังงานได้



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบสมดุลซีโอดีและพลังงานของกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน (Journey, W.K. and McNiven S ,1996)

2.1.3 กลไกพื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนจะมีพื้นฐานเดียวกัน คือ เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยจะเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ซึ่งสารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียจะเป็นสารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสีย ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานให้กับจุลินทรีย์ ในขณะที่สารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียจะมีหลายชนิดและมักจะเป็นสารอื่นที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน ไนเตรท ซัลเฟต เป็นต้น เมื่อเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะได้พลังงานขึ้นมาจำนวนหนึ่ง โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน และอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ เนื่องจากในน้ำเสียมีสารรับอิเล็กตรอนอยู่หลายชนิด

ทำให้ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ชนิดของสารรีดิวซ์คาร์บอนตัวสุดท้ายสามารถจำแนกกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (มันลิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ลำดับที่	สารรีดิวซ์คาร์บอน	ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	ชื่อของปฏิกิริยา
1	ออกซิเจน	คาร์บอนไดออกไซด์	Aerobic Oxidation
2	ไนโตรเจน	ไนโตรเจน	Denitrification
3	ซัลเฟต	ซัลไฟด์	Sulfate Reduction
4	คาร์บอนไดออกไซด์	มีเทน	Methanogenesis
5	สารอินทรีย์	สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็ก	Fermentation

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment)

2.2.1 หลักการของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีหน้าที่หลัก คือ บำบัดตะกอนสลัดจ์และสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนสารอินทรีย์ (อาจเป็นจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใดๆก็ได้) และการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาด้านการบำบัดตะกอนสลัดจ์ในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงเป็นส่วนหนึ่งที่จำเป็นของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ทำลายสารอินทรีย์ในตะกอนสลัดจ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงเป็นกระบวนการขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลงก่อนส่งต่อไปยังกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนทำการบำบัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือ วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ช่วยประหยัดพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มาก

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนหลายประการ ดังนี้

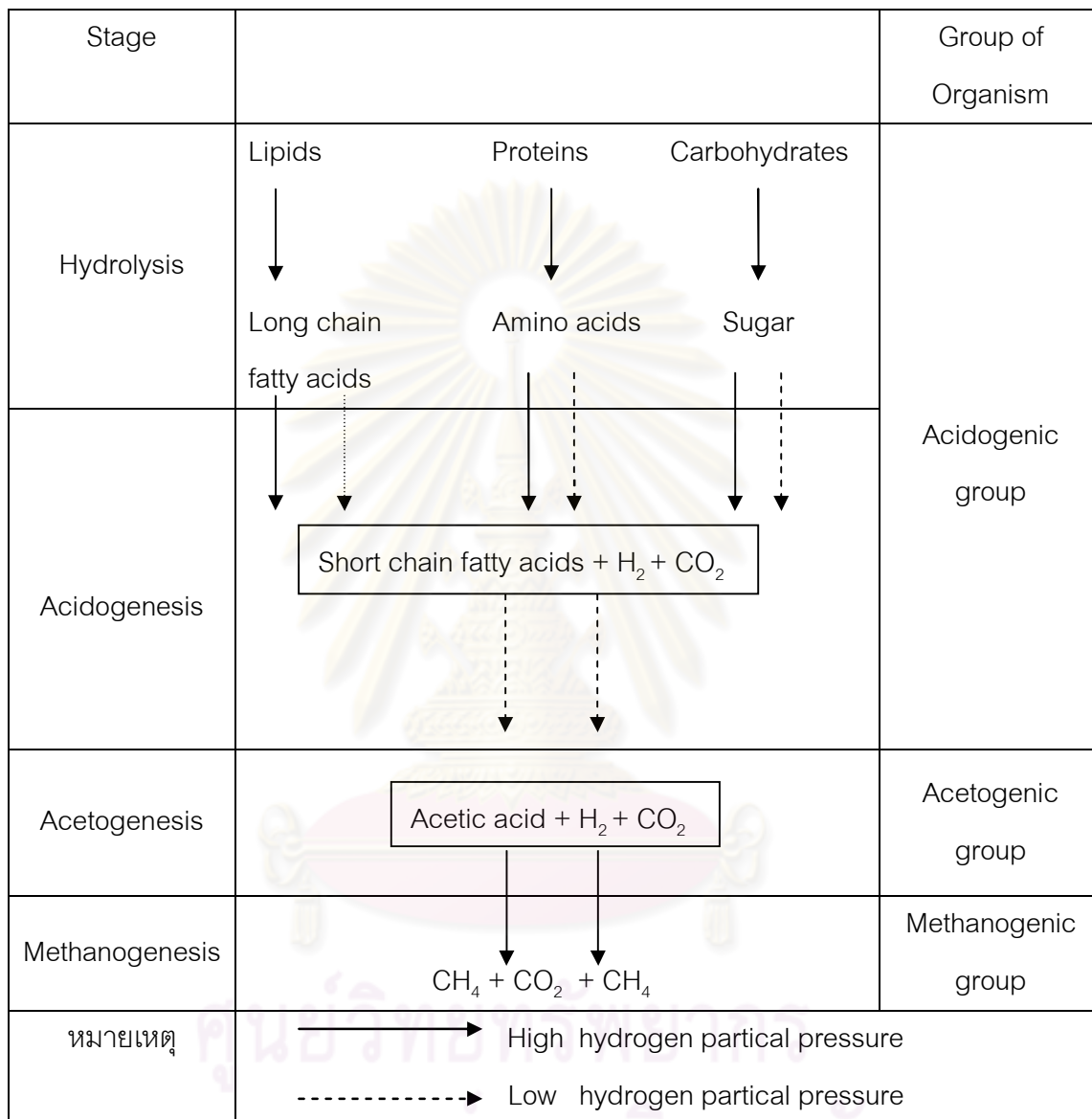
- ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยา ซึ่งนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยลงได้
- มีเสถียรภาพในการทำงานของระบบต่ำ
- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ
- สามารถทำงานได้ดีหลังจากที่มีการหยุดทำงานไประยะหนึ่ง โดยไม่ต้องเริ่ม

เลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ใหม่

2.2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

(Step of organic decomposition)

ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นก๊าซมีเทนโดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Sam-Soon, 1990 อ้างถึงในภูค้ำ พิมจักร, 2546)

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก โดยวิธีการทำให้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีลักษณะซับซ้อนที่ละลายและไม่ละลายในน้ำเสียให้ละลายในน้ำเสียและถูกย่อยกลายเป็นโมเลกุลอย่างง่ายได้ โดยใช้เอนไซม์ที่แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งผลิตและส่งออกมามีนอกเซลล์ โดยสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่ายที่ได้จะเป็นน้ำตาล

กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียในรูปของซีโอดีหรือบีโอดีจะไม่ได้ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนผ่านขั้นตอนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ เพราะเป็นเพียงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลซับซ้อนให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่ายเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่ายจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids) โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เรียกว่า กระบวนการสร้างกรด (Acidogenic step) ซึ่งเกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่ม Fermentative bacteria หรือ Acid forming bacteria กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรดนี้มีอยู่หลายชนิด คือ Acetic acid, Propionic acid, Butyric acid, Valeric acid แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีความสำคัญมาก และเป็นกลุ่มหลักในขั้นตอนนี้ รวมเรียกว่า Acid Forming Bacteria หรือ Acidogen ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ (Fermentative bacteria)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งมีอยู่หลายชนิด Propionic acid, Lactic acid และอื่นๆ ให้เป็นกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียกลุ่ม Homogenic bacteria โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะเป็น Facultative bacteria ซึ่งแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยและขั้นตอนการสร้างมีเทน คือ กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 จะเป็นสารอาหารให้แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic) แต่เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเพื่อให้แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

เป็นการเปลี่ยนกรดอะซิติกให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (Methane gas) โดยกลุ่มแบคทีเรียกลุ่มที่สำคัญที่สุดในขั้นตอนนี้ คือ Methanogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสำคัญมากในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพราะแบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทนและเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic bacteria) คือ Methanogenic bacteria จะเจริญเติบโตได้ดีและเปลี่ยนกรดอะซิติก (Acetic acid) ไปเป็นก๊าซมีเทนได้ในสภาวะไร้อากาศเท่านั้น หากมีออกซิเจนอิสระในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถึงปฏิบัติการเพียงเล็กน้อยก็อาจจะส่งผลให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ต่ำลงทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถึงปฏิบัติการต่ำลงด้วย

2.2.3 ประเภทของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (ศักดิ์ชัย สุริยจันทร์พราทอง, 2542)

1) บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) ลักษณะเป็นบ่อดินขนาดใหญ่กักเก็บน้ำได้หลายวัน นิยมสร้างที่ความลึก 3-5 เมตร สำหรับประเทศเมืองหนาวจะมีปัญหาประสิทธิภาพลดลงในฤดูหนาว แต่สำหรับประเทศไทยอุณหภูมิค่อนข้างสูงและไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจะไม่ค่อยพบปัญหาเรื่องความแปรปรวนของประสิทธิภาพ

ปัญหาที่พบ มักเกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หากควบคุมระบบไม่ดีพอ จึงเหมาะสำหรับสร้างในบริเวณที่ไกลจากชุมชนและที่ดินราคาถูกเนื่องจากใช้เนื้อที่มาก

2) ถังเกราะ (Septic Tank) ลักษณะเป็นแบบปิด น้ำไม่สามารถซึมได้และไม่มี การเติมอากาศ โดยทั่วไปมักใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากส้วม น้ำเสียจากครัวเรือน หากสิ่ง ที่ไหลเข้ามาในบ่อเกราะมีแต่ของจระหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยง่าย หลังการย่อยแล้วจะกลายเป็น ก๊าซ, น้ำและกากตะกอน (Septage)

3) ถังย่อยแบบสัมผัส (Anaerobic Contact) ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ใน น้ำเสีย สารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดอาจเป็นของแข็งหรือสารละลายก็ได้ และอาจเป็นถึงปฏิกิริยา แบบมีการหมุนเวียนตะกอนหรือไม่ก็ได้ แต่นิยมใช้แบบที่มีการหมุนเวียนตะกอน

ปัญหาที่พบ การสะสมแบคทีเรียให้คงอยู่ในระบบไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจาก สลัดจ์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถตกตะกอนได้ดีจึงมีการหลุดของสลัดจ์เกิดขึ้นตลอดเวลา และ ความสามารถในการรับ Organic Loading ต่ำ

4) ระบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศ (Anaerobic Fluidized Bed หรือ AFB) ระบบแบบนี้คล้ายคลึงกับระบบถังกรองไร้อากาศตรงที่มีน้ำไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบน จัดเป็น ระบบ Fixed Film แบบไร้อากาศที่มีสารตัวกลางขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายเป็นที่จับเกาะของ แบคทีเรีย อัตราไหลของน้ำเสียจะต้องสูงมากจนกระทั่งทำให้มีการลอยตัวของสารตัวกลาง ตัวอย่างสารตัวกลาง ได้แก่ ทราย แอนทราไซต์ ถ่านกัมมันต์ การใช้สารตัวกลางขนาดเล็กทำให้ ระบบนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (คิดต่อหน่วยปริมาตร) สูงมาก ซึ่งเท่ากับการมีแบคทีเรียจำนวนมาก อยู่ในระบบ อัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้จึงสูงมากทำให้ถึงปฏิกรณ์ที่ให้มีขนาดเล็ก กว่าระบบอื่นๆ

ปัญหาที่พบ คือ ต้องทำให้สารตัวกลางลอยตัวตลอดเวลาก่อให้เกิดปัญหาใน การออกแบบและควบคุมระบบหลายอย่าง และต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการทำให้สารตัวกลาง ลอยตัวสูงกว่าระบบอื่น

5) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Fixed Film หรือ Anaerobic Filter) ลักษณะเป็นการบรรจุวัสดุตัวกลาง เช่น เชือกไนลอน ตาข่าย อย่างเป็นระเบียบ มีระยะห่าง

(Orderly pack) และการไหลของน้ำเสียสม่ำเสมอ การบรรจุวัสดุตัวกลางลักษณะนี้ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตแบบยึดเกาะบนผิววัสดุตัวกลางแต่ส่วนใหญ่เจริญเติบโตแบบแขวนลอยอยู่ในสารละลายระหว่างช่องว่างของวัสดุตัวกลาง ดังนั้นเมื่อป้อนน้ำเสียเข้าระบบ น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นจุลินทรีย์คล้ายการกรองจึง เรียกว่า ถังกรองไร้อากาศ

นอกจากนี้การจัดเรียงวัสดุที่แตกต่างกันยังส่งผลถึงการทำงานและเสถียรภาพของระบบในระยะยาวด้วย ระบบนี้อาจมีการป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ (Up-flow Anaerobic Fixed Film) หรือป้อนจากด้านบน (Down-flow Anaerobic Fixed Film) โดยระบบที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันนี้คือระบบที่ป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากลดปัญหาการอุดตันลงได้มาก

6) ถังย่อยสลายแบบธรรมดา (Conventional Anaerobic Digester) ลักษณะเป็นถังย่อยสลายแบบปิดมีระบบระบายก๊าซอยู่ทางด้านบนโดยระบบจะไม่มีกรวนและควบคุมอุณหภูมิ

7) ยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เป็นระบบที่ถูกพัฒนาใช้เพื่อจำกัดข้อด้อยของระบบถังกรองไร้อากาศ โดยสามารถเก็บจุลินทรีย์ไว้ได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางที่มีราคาแพงแต่ให้ประสิทธิภาพดีกว่าในปริมาตรที่เท่ากัน โดยน้ำเสียจะถูกป้อนจากด้านล่างให้ไหลขึ้นผ่านชั้นจุลินทรีย์ ซึ่งถูกเลี้ยงไว้จนมีลักษณะเป็นเม็ด (Granule) ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเม็ดตะกอนที่ดีจะมีความหนาแน่นที่เหมาะสมแก่การตกตะกอนลงสู่กันดังโดยมีความเร็วในการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 2-90 เมตรต่อชั่วโมง เพื่อมิให้หลุดไปกับน้ำออกเมื่อระบบถูกป้อนด้วยน้ำเสียให้มีความเร็วไหลขึ้นในช่วง 0.5-1.5 เมตรต่อชั่วโมง ระบบจึงจะมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบอัตราการบรรจุก๊าซอินทรีย์ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนประเภทต่างๆ

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน	อัตราการบรรจุก๊าซอินทรีย์ (กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
1. ถังเกรอะ	0.1-2
2. ถังย่อยแบบสัมผัส	1-5.5
3. ถังกรองไร้อากาศ	4-15
4. ชั้นลอยตัวไร้อากาศ	10-30
5. ยูเอเอสบี	15-25

2.2.4 ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นระบบที่ซับซ้อนมีจุลินทรีย์อาศัยอยู่รวมกันมากมายหลายกลุ่ม ความสัมพันธ์ของจุลินทรีย์เหล่านี้มีทั้งพึ่งพาและแข่งขันกัน สารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนรูปเนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของกลุ่มจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งโดยกลุ่มจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันแต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถใช้โดยจุลินทรีย์หลายกลุ่มซึ่งใช้สารอาหารชนิดเดียวกันก็จะเป็นความสัมพันธ์แบบแข่งขันกัน จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่รวมกันนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปต่างๆ เช่น มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลไฟด์ เป็นต้น แต่สารอินทรีย์ที่มีในระบบจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มใดและถูกใช้ในสัดส่วนเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมายโดยเฉพาะปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเด่นหรือมีบทบาทมากที่สุดในระบบ เมื่อพิจารณาในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน แบคทีเรียที่โดดเด่น คือ กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดและกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานร่วมกันโดยผลิตภัณฑ์หลักของระบบคือ ก๊าซมีเทน

แบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acid Forming bacteria)

แบคทีเรียสร้างกรดจัดเป็น Facultative anaerobic bacteria ซึ่งไม่ต้องการออกซิเจนอิสระแต่สามารถทนได้ถ้ามีปริมาณน้อย ๆ แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลงจะเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) แบคทีเรียกลุ่มนี้มักพบในน้ำเสียทั่วไป เช่น Clostridium และ Coliform bacteria กลุ่มแบคทีเรียนี้จะทำการย่อยสลายสารเหล่านี้ให้มีโมเลกุลเล็กลงโดยการปล่อยเอนไซม์ออกมาจากเซลล์ ซึ่งเอนไซม์มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับประเภทของสารที่จะถูกย่อย หลังจากนั้นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียแล้วถูกย่อยต่อไปให้เป็นกรดไขมันระเหย พร้อมทั้งมีการสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นด้วยกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในขั้นแรกนี้ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดไพรูโวนิกเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลง ถ้าหากสภาพต่าง (Alkalinity) ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าพีเอชต่ำกว่า 6.4 ซึ่งจะส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

2) กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Producing Bacteria)

แบคทีเรียสร้างมีเทน จัดเป็นพวก Obligate anaerobic bacteria จะดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ถ้ามีเพียงเล็กน้อยก็จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ส่งผลให้การบำบัดน้ำ

เสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่มีประสิทธิภาพ คือ ไม่มีการสร้างก๊าซมีเทนแทนกรดไขมันระเหยแบบที่เรียกกลุ่มนี้พบได้ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องหรือที่อับอากาศ เช่น ดินเลนจากก้นแม่น้ำทะเลสาบ ได้แก่ Methanobacterium, Methanosarcina และ Methanococcus โดยจะทำหน้าที่ย่อยกรดไขมันระเหยและแอลกอฮอล์จากการย่อยในขั้นตอนแรกเพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แบคทีเรียสร้างมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

- Obligate Acetoclastic Methanogen สามารถใช้กรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการด้านล่าง



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



- Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างมีเทนได้จากกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจน แต่จะชอบใช้ไฮโดรเจนมากกว่าแบคทีเรียพวกสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงที่มีพีเอชแคบประมาณ 6.8-7.2 และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งมักจะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ (Specific Growth Rate) ทำให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นได้ช้า และมักเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยแบคทีเรียแต่ละกลุ่มในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีความต้องการสภาวะอุณหภูมิและระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการดำรงชีวิต สามารถแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนกับระดับอุณหภูมิ

กลุ่มแบคทีเรีย	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Psychophilic range	5-15
Mesophilic range	20-45
Thermophilic range	50-65

ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) แต่โดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิก เนื่องจากในช่วงนี้จะใช้พลังงานค่อนข้างน้อยและจุลินทรีย์พวกเทอร์โมฟิลิกจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่า

ส่วนช่วงไซโคฟิลิก (Psychophilic) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยมากและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังนั้น การรักษาคูณหภูมิจึงมีสำคัญมากกว่าที่จะควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด ซึ่งการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก

2) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชเป็นปัจจัยทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการทำงานของแบคทีเรียทุกชนิด โดยปกติแบคทีเรียจะเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 - 7.8 ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรีย 2 กลุ่มหลัก คือ

2.1 กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acid Forming Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6.0-6.5 และสามารถทนได้ต่ำถึง 4.5

2.2 กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane producing Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6.5-8.2 แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 จะส่งผลกระทบต่อพวก Methanogenic bacteria อย่างรุนแรง

ส่วนทางด้านประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่าหรือสูงกว่า 6.5-7.8 และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็ว

สารเคมีที่ใช้ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง (ทวิชัย ธีระเศรษฐนันท์, 2540) ที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)

3) สภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนต (Alkalinity as bicarbonate)

สภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนต (จันทิมา สกุดพานิชย์, 2548) บอกให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำปริมาณกรดที่เพิ่มเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงอย่างรวดเร็วและมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ระดับสภาพต่างที่จะทำให้มีกำลังบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสที่จะเกิดกรดได้มาก ดังนั้นกำลัง

บัพเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีสภาพต่างประมาณ 1,500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าต่ำกว่านี้เสถียรภาพของระบบจะต่ำ

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อระดับของสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนตระบบจะมีกำลังบัพเฟอร์สูง เมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าพีเอชของระบบกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว

4) โออาร์พี (ORP)

โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) หรือความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลายโดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะวัดโออาร์พีได้ค่าเป็นบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรท ซึ่งแสดงว่าน้ำมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีและถ้าวัดได้ค่าเป็นลบในน้ำเสียที่ไม่มีออกซิเจน แสดงว่าน้ำมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยแต่ให้อิเล็กตรอนได้ดี ค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์

5) ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย (Substrate)

สำหรับสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียจะมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย จากการศึกษาพบว่า สารอาหารที่ต่างชนิดกันจะมีอัตราการย่อยสลายสารอาหารที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายเร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

6) กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids)

กรดไขมันระเหยเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรด โดยสารอินทรีย์ที่เข้ามาจะถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นได้ง่ายขึ้น สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีควรจะมี ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปของกรดอะซิติกประมาณ 200-400 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกรด โดยระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วและแสดงถึงการเสียสมดุลของระบบทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการชะลอตัวของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น

ถ้า VFA/Alkalinity มีค่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังบัพเฟอร์สูง ระบบทำงานได้ดี

ถ้า VFA/Alkalinity มีค่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ อาจทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลงหรือล้มเหลวได้

7) สารอาหารเสริม (Nutrient)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีข้อดี คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจุลินทรีย์ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยควรมีอัตราส่วนอย่างน้อย COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 หรือ COD:N:P เท่ากับ 350:5:1 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD:N ยังมีผลต่อลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วย โดยทำให้เม็ดตะกอนมีลักษณะเป็นปุยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวสูงถึง 100:10

แบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการธาตุอาหารบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ (Trace element) มิฉะนั้นระบบอาจไม่ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพได้ ธาตุต่างๆ เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) อย่างไรก็ตามการเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นการลำบากเนื่องจากซัลไฟด์ไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยการเติม Yeast extract ให้แก่ระบบโดยตรงในอัตราที่ไม่ต่ำกว่า 1.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย ซึ่ง Yeast extract เป็นอาหารที่สมบูรณ์ไปด้วยธาตุและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่แบคทีเรียต้องการเพียงเล็กน้อยแต่มีความจำเป็น

8) สารพิษ (Toxic)

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นมีอยู่หลายชนิด จะมีความรุนแรงมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณที่เหมาะสม ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นสารพิษ ได้แก่

8.1 พิษของไอออนบวกและโลหะหนัก

พิษของไอออนบวก เช่น Na^+ , K^+ , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ถ้ามีความเข้มข้นต่ำพอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย ถ้ามีมากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งความเป็นพิษของ Mg^{2+} และ Ca^{2+} จะมีมากกว่า Na^+ , K^+ ถึง 10 เท่า (เนื่องจากไอออนบวกที่วาเลนซีและน้ำหนักอะตอมสูงจะเป็นพิษมากกว่าวาเลนซีต่ำ) การลดความเป็นพิษทำได้โดยการทำแอนตาโกนิซึม (Antagonism) คือ เมื่อไอออนบวกอยู่ร่วมกันในความเข้มข้นที่พอเหมาะ พิษของไอออนบวกหนึ่งจะสามารถลดความเป็นพิษของไอออนอีกชนิดหนึ่งได้ เช่น ความเป็นพิษของ Na^+ ที่ความเข้มข้น 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะลดลงได้ถ้ามี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ในปริมาณที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งไอออนบวก (McCarty, 1964)

ชนิดของไอออนบวก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100-200	3,500-5,500	8,000
K ⁺	200-400	3,500-5,500	12,000
Ca ²⁺	100-200	2,500-4,500	8,000
Mg ²⁺	75-150	1,000-1,500	3,000

ส่วนโลหะหนัก ได้แก่ Mn²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ และ Cr³⁺ โดยโลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปของไอออน พบว่า Cu²⁺ จะมีผลต่อระบบมากที่สุด โดยความเป็นพิษของ Cu²⁺ > Cu⁺ > Fe²⁺ > Cd²⁺ > Zn²⁺ ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ถ้าถึงน้ำเสียมีปริมาณซัลไฟด์ที่เหมาะสม เพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ แต่โลหะหนักบางประเภทก็มีความจำเป็นต่อแบคทีเรียแม้จะมีปริมาณเล็กน้อยก็ตาม

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อการยับยั้งประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรีย 50% (Mosey และ Hughes, 1975)

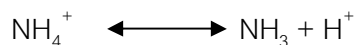
โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Fe ²⁺	1-10
Zn ²⁺	10 ⁻⁴
Cd ²⁺	10 ⁻⁷
Cu ⁺	10 ⁻¹²
Cu ²⁺	10 ⁻¹⁶

8.2 พิษของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิดมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่น กรดโพรพิโอนิก ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำที่มีสารอินทรีย์ดังกล่าวเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้แบคทีเรียคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

8.3 พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมาจากการย่อยสลายสารจำพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของ NH_4^+ และ NH_3 ดังสมการ



โดยมีค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ซึ่งผลของ NH_3 จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียและเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่า NH_4^+

ตารางที่ 2.7 ผลของแอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อระบบไม่ใช้ออกซิเจน (Kugelman และ McCarty, 1965)

$(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$ -N (มิลลิกรัม/ลิตร)	ผลต่อระบบ
50-200	มีปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลเสียต่อระบบ
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูง
มากกว่า 3,000	เป็นพิษโดยตรง

สัดส่วนของปริมาณแอมโมเนีย (NH_3) จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1% ของผลรวมแอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจน แต่ถ้าค่าพีเอชสูงขึ้นปริมาณแอมโมเนียจะมีมากขึ้นซึ่งมีผลยับยั้งต่อแบคทีเรียมากขึ้น จึงควรรักษา ค่าพีเอชในระบบให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่าเพื่อป้องกันอันตรายต่อแบคทีเรีย

8.4 พิษของซัลไฟด์

ซัลไฟด์ถ้ามีปริมาณมากไปในระบบไร้ออกซิเจนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่ถ้าในระบบมีโลหะหนักปะปนอยู่ ซัลไฟด์จะจับกับโลหะหนักแล้วตกตะกอนลงมา ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของซัลไฟด์ลดลง โดยถ้าค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์อยู่ในช่วง 200-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันซิน ตันซูลเวสต์, 2536) จะทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย แต่ในระบบถ้ามีพีเอชต่ำกว่า 7 รูปของซัลไฟด์จะอยู่ในรูปของ $\text{H}_2\text{S}(\text{sol})$ มากขึ้น ซึ่งจะมีอันตรายต่อเซลล์แบคทีเรีย ดังนั้นในระบบจึงควรรักษาพีเอชให้อยู่ในระดับสูงเพื่อป้องกันความเป็นพิษของซัลไฟด์ต่อระบบ

2.3 กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction)

2.3.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria, SRB)

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (Obligate anaerobe) จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรทรอป (Chemoheterotroph) ซึ่งจะดำรงชีวิตและเจริญเติบโตได้เมื่อรับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรียประเภทนี้ ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้ คือความสามารถในการรีดิวซ์สารประกอบของซัลเฟอร์ที่ถูกออกซิไดส์ เช่น ซัลเฟต ซัลไฟด์ ไธโอซัลเฟต เป็นต้น โดยทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์ กรดไขมัน แอลกอฮอล์ หรือไฮโดรเจนโมเลกุลได้เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างเอนไซม์ Hydrogenase แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและเจริญเติบโต คือ

- 1) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (Incompletely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria: I-SRB) โดยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลาย คือ อะซิเตต
- 2) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สมบูรณ์ (Completely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria: C-SRB) โดยสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.3.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสำคัญต่อการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

1) อุณหภูมิ

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงกลุ่มเชื้อบริสุทธิ์ (Pure cultures) โดยส่วนใหญ่จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วงเดียวกัน คือ 30-40 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอย่างมาก โดย Visser และคณะ (1992 อ้างถึงใน Visser, 1994) พบว่าการเกิดซัลเฟตรีดักชันของตะกอนดินน้ำเค็มลดลงระหว่าง 2-3.9 เท่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม 10 องศาเซลเซียส

2) ความต้องการเกลือและความทนต่อเกลือ

ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟต ซึ่งแยกเป็นพวกที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยกับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด แบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยมักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่งจึงจะเจริญเติบโตได้ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตกลุ่มนี้มาเลี้ยงในน้ำจืดก็จะได้ผลในทางลบต่อการเจริญเติบโต ชนิดและปริมาณของเกลือสำหรับแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มที่เหมาะสมคือ โซเดียมคลอไรด์ 20 กรัมต่อลิตร และแมกนีเซียมคลอไรด์ 1.5 กรัมต่อลิตร นอกเหนือจากเกลือทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว บางสายพันธุ์ยังต้องการแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มอีกที่ความเข้มข้นอย่างต่ำ 0.5 กรัมต่อลิตร และปริมาณความต้องการเกลือที่จำเป็นจะลดลงสำหรับกลุ่มที่มาจากแหล่งน้ำกร่อย แบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำจืดอาจยับยั้งการเจริญเติบโตได้ถ้าในตัวกลางมีโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่มีอยู่ในน้ำทะเล

อย่างไรก็ตามความสามารถในการปรับตัวของแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำจืดบางสายพันธุ์ ซึ่งสามารถทนอยู่ในตัวกลางที่มีระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเท่ากับในระดับความเข้มข้นในน้ำทะเล และบางพวกจะสามารถปรับตัวให้อยู่ได้ทั้งระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 60 กรัมต่อลิตรหรือแม้ไม่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่เลยก็ตาม

3) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

แบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจะมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่ค่าเป็นกลาง คือ 7 และมักถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำขังจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่าพีเอชในแหล่งน้ำประมาณ 3-4 แต่เมื่อนำแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำขึ้นมาทดสอบพบว่าจะถูกยับยั้งการเจริญเติบโต เมื่อพีเอชต่ำกว่า 6 ทำให้เกิดสันนิษฐานว่าแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตที่อยู่ในแหล่งน้ำของเหมืองแร่จะอาศัยอยู่ในช่องว่างหรือรูขนาดเล็กที่มีค่าพีเอชที่สูงขึ้นและเหมาะสมต่อการดำรงชีพมากกว่า โดยค่าพีเอชที่สูงขึ้นในช่องว่างขนาดเล็กที่มีแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตอาศัยอยู่นี้ อาจเกิดผลของปฏิริยาการออกซิไดส์สารอาหารของแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟต ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงปฏิริยาการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีติวซ์ซัลเฟตพบว่า อาจเป็นปฏิริยาที่มีการใช้ไฮโดรเจนไอออนหรือเป็นปฏิริยาการสร้างบัพเฟอร์ เช่น ไบคาร์บอเนตหรือไบซัลไฟด์เมื่อใช้ไฮโดรเจนหรืออะซิเตตเป็นสารอาหาร แต่เมื่อสารอาหารหรือสารอินทรีย์ใช้ยาว ผลของปฏิริยาการย่อยสลายสารอาหารจะผลิตไฮโดรเจน ไอออนขึ้นมาทำให้ค่าพีเอชลดลงได้ เมื่อพิจารณาไฮโดรเจนไอออนร่วมกับไบคาร์บอเนตหรือไบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิริยาซัลเฟตรีดักชัน สามารถมองได้ว่าถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หนีออกจากตัวกลางได้ ปฏิริยาซัลเฟตรีดักชันมักทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นเสมอ

4) ความมีชีวิตรอดในสภาวะที่มีออกซิเจน

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียที่ทนต่อสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยไม่ได้ แต่ก็พบว่ายังดำรงชีพอยู่ได้เมื่ออยู่ในสภาพที่มีออกซิเจนอิสระชั่วคราว และสามารถฟื้นตัวได้เมื่อกลับเข้าสู่สภาพไร้ออกซิเจน นอกจากนี้พบว่ามีซัลไฟด์ที่มีอยู่ในตัวกลางมีบทบาทต่อผลกระทบของออกซิเจนที่มีต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ในลักษณะที่แตกต่างกันในกรณีที่มีซัลไฟด์พร้อมกับออกซิเจนจะมีผลกระทบในทางลบมากกว่ากรณีที่มีออกซิเจนเพียงอย่างเดียว โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจีโนส *Desulfovibrio* สามารถทนอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนได้หลายชั่วโมงโดยไม่ต้องมีซัลไฟด์อยู่ในตัวกลาง

5) การปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะ: การจับกลุ่มของเซลล์และเซลล์ชนิดเส้นใย (Morphological adaptation: aggregating cells and grinding filaments)

การรวมกลุ่มของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอาจเกิดการปรับตัวเพื่อรับกับสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพ เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ การมีสารให้อิเล็กตรอนหรือเกลืออยู่ในช่วงสภาวะที่ไม่เหมาะสมหรือการมีออกซิเจนเป็นตัวกลาง ในสภาวะดังกล่าวแบคทีเรียจะแสดงลักษณะผิดปกติ (morbid) เช่น มีเซลล์ขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมหรือหยุดการเคลื่อนที่จากเดิมที่เคยเคลื่อนที่ หรืออาจเกิดขึ้นจากลักษณะทางธรรมชาติของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ โดยมีข้อดีของการเกาะกลุ่มหรือเกาะติดผนังก็คือจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดั่งสารอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต

ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับสารรับอิเล็กตรอนและประเภทของแบคทีเรียในระบบ ในกรณีที่มีซัลเฟตอยู่ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบจะเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างกรด, แบคทีเรียสร้างอะซิเตต, แบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยเฉพาะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนจัดเป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญต่อขั้นตอนสุดท้ายในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต โดยแบคทีเรียทั้งสองชนิดต่างก็สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (Mineralization)

นอกจากนี้แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดยังมีความคล้ายคลึงกันในเชิงสรีระวิทยาหลายประการ คือ มีลักษณะเป็นแบคทีเรียไร้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด มีช่วงอุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคล้ายกัน และมีลักษณะเป็นแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรโทรฟร่วมกัน ดังนั้นจึง

สามารถพบแบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้ร่วมกันในกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตนอกเหนือไปจากแบคทีเรียสร้างกรด

เนื่องจากแบคทีเรียหลายกลุ่มในระบบใช้สารอาหารประเภทเดียวกัน ในขณะที่แบคทีเรียบางกลุ่มก็ใช้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งเป็นสารอาหาร ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่เราพอจะแบ่งความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ออกได้เป็น

- การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) ในการแย่งใช้ไฮโดรเจนและกรดอะซิติกเป็นสารอาหาร และผลของการแข่งขันเป็นการกำหนดผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ว่าจะเป็นการผลิตมีเทนหรือซัลไฟด์
- การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกในการแย่งใช้กรดโฟสไฟโอนิกและกรดบิวทิริกเป็นสารอาหาร

2.4 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

2.4.1 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

สารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำเสีย มี 4 ชนิด ดังนี้

- 1) สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน หมายถึง สารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ
- 2) สารแอมโมเนียไนโตรเจน หมายถึง ไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในรูปแอมโมเนียหรือสารประกอบแอมโมเนีย
- 3) สารประกอบไนไตรท์ หมายถึง สารประกอบที่อยู่ในรูป NO_2^- ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันที่ยังไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น
- 4) สารประกอบไนเตรท หมายถึง สารประกอบที่อยู่ในรูป NO_3^- ซึ่งเป็นผลจากการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น และหากสภาพแวดล้อมมีออกซิเจนปริมาณมากเกินพอแล้ว จัดว่าเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรมากที่สุด

2.4.2 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

เป็นกระบวนการเกิดรีดักชันของไนเตรทไนโตรเจน โดยไนเตรททำหน้าที่เป็นตัวรับไฮโดรเจนตัวสุดท้ายสำหรับการหายใจของจุลินทรีย์ในที่ไม่มีออกซิเจน เรียกว่า การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงเป็นพวกแพคัลเททีฟ และใช้ pathways ทางชีวเคมีเหมือนกันทั้งระหว่างการหายใจแบบใช้ออกซิเจนและแบบไม่ใช้ออกซิเจน ความแตกต่างที่สำคัญคือ เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการถ่ายอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย และตำแหน่งกระทำในสายการถ่าย

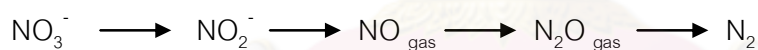
เทอเล็กตรอน กระบวนการดีไนตริฟิเคชันอาศัยจุลินทรีย์ทั้งพวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้และพวกที่สร้างอาหารเองได้ โดยแบคทีเรียพวกนี้สามารถใช้ออกซิเจนเช่นเดียวกับไนเตรท และบางชนิดสามารถทำการหมักเมื่อไม่มีไนเตรทหรือออกซิเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในดีไนตริฟิเคชัน (Autotrophic denitrification) แบคทีเรียใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนแทนคาร์บอนอินทรีย์หลายชนิดที่พบตามธรรมชาติในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงทำให้แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงเกิดได้ค่อนข้างง่าย การรีดักชันของไนเตรทในระบบทางชีวภาพมี 2 แบบคือ

1) Assimilation เป็นการรีดักชันไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียไนโตรเจนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องขึ้นกับออกซิเจนและเกิดขึ้นเมื่อไม่มีแอมโมเนีย โดยมีไนเตรทเป็นไนโตรเจนเพียงรูปเดียวที่จะนำไปใช้ได้

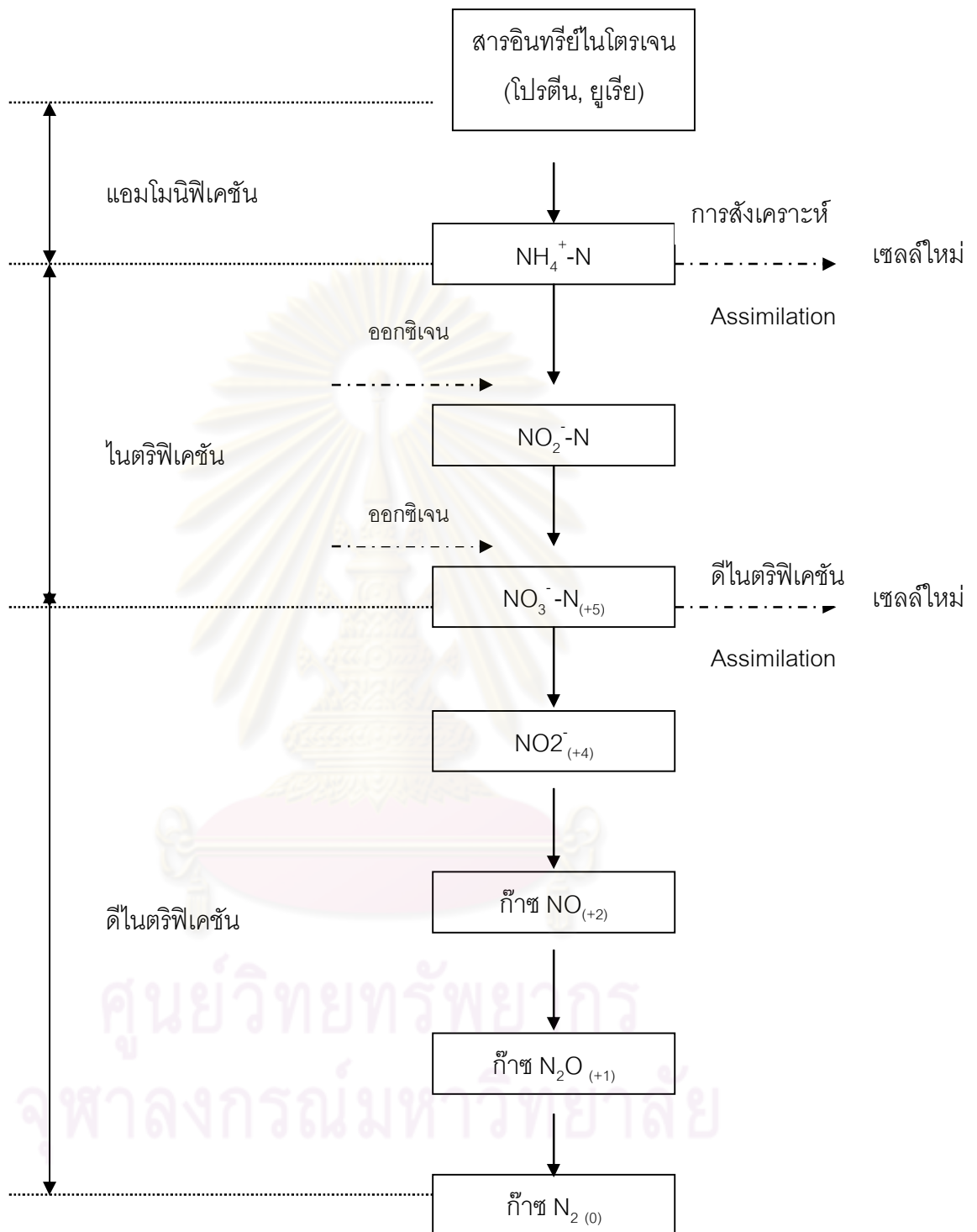
2) Dissimilation เป็นการรีดักชันไนเตรทให้เป็นไนโตรเจนก๊าซ ซึ่งไนโตรเจนก๊าซที่มีมากที่สุดคือ ก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีในรูปแบบอื่นๆ เช่น ไนตรัสออกไซด์และไนตริกออกไซด์

ขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนที่ไนเตรทถูกลดไปเป็นไนไตรท์ เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน 2 ตัว จากการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงทุกตัวจะสร้างไนไตรท์เป็นผลผลิตในปฏิกิริยาขั้นแรก

ขั้นที่สอง ไนไตรท์จะถูกลดไปอยู่ในรูปของผลผลิตสุดท้ายที่เป็นก๊าซ ซึ่งขั้นตอนการรีดักชันของไนเตรท แสดงได้ดังสมการ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

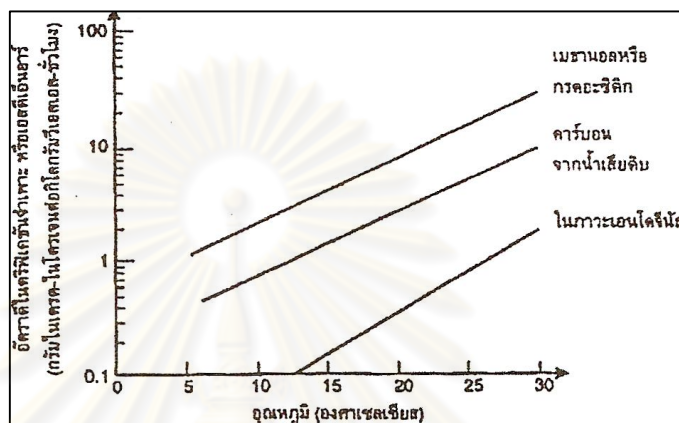


ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการกำจัดสารไนโตรเจน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.3 ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสำคัญต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

1) อุณหภูมิ

แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงมีความไวต่ออุณหภูมิ แม้ว่า จะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 5–25 องศาเซลเซียส แต่ก็ทำงานได้ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิเท่ากับหรือมากกว่า 20 องศาเซลเซียส โดยอัตราดีไนตริฟิเคชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าทุกๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสในช่วง 5–25 องศาเซลเซียส



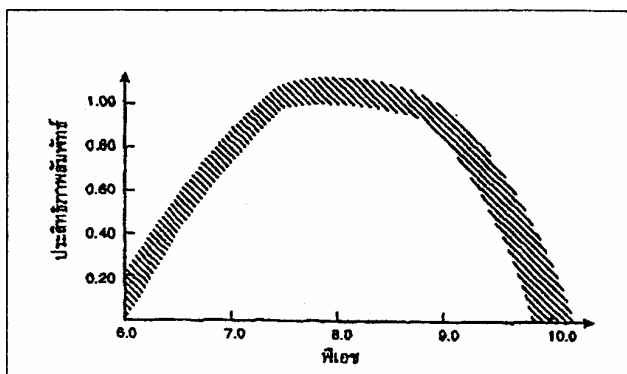
ภาพที่ 2.6 อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆเมื่อใช้สารอาหารต่างกัน (Henze และ คณะ, 1996)

2) ออกซิเจน

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารอาหารในเซลล์เมื่อมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะให้พลังงานสูงกว่าเมื่อมีไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อในน้ำมีออกซิเจนละลายอยู่คู่กับไนเตรท แบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนก่อนการใช้ไนเตรท ทำให้สิ้นเปลืองคาร์บอนอินทรีย์มากจนไม่เหลือสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้ออกซิเจนมารบกวนกระบวนการนี้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำหากมีค่ามากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรจะยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้

3) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

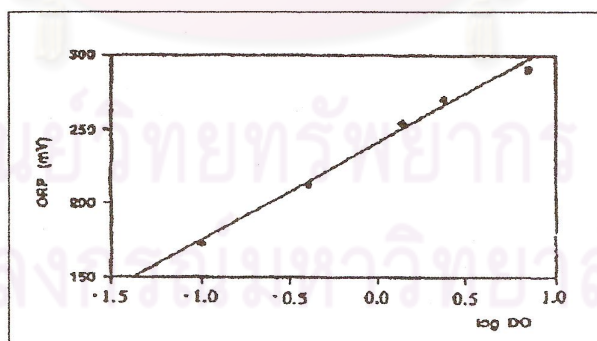
กระบวนการดีไนตริฟิเคชันนั้นจะเกิดการสร้างสภาพต่างขึ้นมา ส่งผลให้น้ำมีค่าพีเอชสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดย Henze และคณะ (1996) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 7-9 และเมื่อพีเอชลดต่ำลง เช่น ต่ำกว่า 7 จะเกิดไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เป็นผลสุดท้ายของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแทนที่จะเป็นก๊าซไนโตรเจน (N₂) ซึ่งไม่ควรเกิดเช่นนี้เพราะก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวม ถ้าพีเอชค่อนข้างต่าง ไนตรัสออกไซด์จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ดี ส่วนก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีพิษรุนแรงมักไม่เกิดขึ้นในระบบจริง



ภาพที่ 2.7 เปรียบเทียบประสิทธิกรสัมพันธ์ในตรีฟิเคชันที่พีเอชต่างกัน (Henze และคณะ, 1996)

4) ไออาร์พี

ออกซิเจนอิสระมีผลเสียต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นในถังปฏิกรณ์ควรมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำที่สุด แต่เนื่องจากมาตรวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มีจำหน่ายในปัจจุบันไม่สามารถวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มีปริมาณต่ำๆ ได้ จึงมีการนำพารามิเตอร์อื่นมาทดแทนสำหรับการควบคุมระบบ จากภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำและไออาร์พีในการทดลองแบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสกับสลัดจ์กัมมันต์ในประเทศสวีเดน ซึ่งเห็นได้ว่าแม้จะมีสลัดจ์อยู่ในถังทดสอบแต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง เนื่องจากอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันจำเพาะส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับไออาร์พี ดังนั้นการใช้ไออาร์พีเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมการเกิดดีไนตริฟิเคชันแทนค่าออกซิเจนละลายน้ำ จึงเป็นทางเลือกที่วิศวกรให้ความสนใจและควรกำหนดให้อยู่ในช่วง -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์สำหรับสภาวะแอนอกซิก (anoxic)



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำและไออาร์พีเมื่อมีสลัดจ์กัมมันต์อยู่ด้วย (Lie และ Wilander, 1994 อ้างถึงใน จันทิมา สกุลพานิชย์, 2546)

5) ความเค็ม

ความเค็มในรูปของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงเล็กน้อย โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์อย่างรวดเร็ว (Shock loading) Panswad และ Anan (1999 อ้างถึงในจันทิมา สกุลพานิชย์, 2546) ทำการศึกษาผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อระบบแอนแอโรบิก-แอนออกซิก-แอโรบิก โดยใช้เชื้อที่ชินและไม่ชินต่อเกลือมาก่อน ซึ่งพบว่าทั้งชนิดเฮเทอโรทรอปพอโตโทรฟิกลงไนตริฟายเออร์ และเฮเทอโรโทรฟิกลงไนตริฟายเออร์ สามารถปรับตัวเข้ากับความเค็มได้สูงถึง 30,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและไนโตรเจนลดลงเพียง 27 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

6) ปริมาณไนโตรเจน

ไนโตรเจนในรูปแบบของกรดไนตริก (HNO_2) อิสระ คือ ไนโตรเจนในรูปที่ไม่แตกตัวเป็นอิออน สามารถยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ด้วยความเข้มข้นเพียง 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้นนี้ และพีเอชในช่วง 6-8 จะเทียบเท่ากับไนโตรเจนในรูปแตกตัวเป็นอิออนเท่ากับ 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ผลกระทบของไนโตรเจนต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรียจึงยังไม่มีมากในการปฏิบัติภาคสนามจริง แต่ถ้ามีสารพิษอื่นๆ มาทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียไม่ทำงานหรือทำงานช้าลง ก็อาจมีไนโตรเจนสะสมมากขึ้นจนเป็นอันตรายต่อระบบได้

7) อายุสลัดจ์

เมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้นการผลิตเซลล์สุทธิจะลดลง ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ต้องการแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะลดลง นอกจากนี้ถ้าอายุสลัดจ์ในถังแอนออกซิกเพิ่มขึ้นอัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะจะลดลงด้วย นอกจากนี้อายุสลัดจ์แล้วอุณหภูมิยังมีผลต่ออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันด้วย กล่าวคือ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ระบบก็จะเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้น แต่ถ้ารวมถังเติมออกซิเจนที่มีไว้สำหรับการไนตริฟิเคชันด้วยแล้ว การเพิ่มอายุสลัดจ์รวมจะทำให้การกำจัดไนโตรเจนโดยรวมดีขึ้นเพราะหากไม่มีไนตริฟิเคชันมาก่อนแล้วก็จะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันขึ้นไม่ได้

8) ภาวะไนโตรเจน

Abeling และ Seyfried (1992 อ้างถึงในภูคำ พิมจักร, 2546) กล่าวว่าในสภาวะที่แบคทีเรียขาดแคลนอาหาร อัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันกรณีถ้าระบบมีไนโตรเจนจะเกิดได้ดีกว่ามีไนโตรเจน โดยมีอัตราจำเพาะประมาณ 0.22 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อชั่วโมง และ 0.4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อชั่วโมง และถ้าระบบมีแหล่งคาร์บอนอย่างเพียงพอก็จะมีอัตราจำเพาะประมาณ 5.1 มิลลิกรัมไนโตรเจน

ไนโตรเจนต่อกรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อชั่วโมง และ 7.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อชั่วโมง

9) อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียชนิดเฮเทอโรโทรฟส่วนใหญ่ต้องใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานในการทำงาน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ((Henze และคณะ, 1996)

สารอินทรีย์	ซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม	หน่วย
น้ำเสียชุมชนยุโรป	3-3.5	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
	4-5	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
สลัดจ์	1.5-2.5	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
	2.9-3.2	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
เมทานอล	2.3-2.7	กรัม MeOH ต่อกรัมไนโตรเจน
	3.5-4.1	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
กรดอะซิติก	1.0-1.2	โมล MeOH ต่อโมลไนโตรเจน
	2.9-3.5	กรัม HAc ต่อกรัมไนโตรเจน
	3.1-3.7	กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน
	0.9-1.1	โมล HAc ต่อโมลไนโตรเจน

2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

2.5.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

โครงการพัฒนาระบบยูเอเอสบีเริ่มต้นในปี 1970 โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมของรัฐบาลประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งดำเนินการวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ Centrale Suiker Maats-chappij (CSM) และมหาวิทยาลัย Delft University of Technology รวมถึงมหาวิทยาลัย Wageningen และ Amsterdam ผลการวิจัยและพัฒนาในช่วงปี 1974-1977 ได้นำมาเริ่มต้นก่อสร้างระบบยูเอเอสบีในโรงงานต้นแบบ และได้รับการพัฒนาขึ้นมาในปี 1996 โดย Sanders พบว่าการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีอยู่ในถังหมักเป็นจำนวนมาก โดยการติดตั้งถังตกตะกอนไว้ตอนบนของถังหมักจะทำให้เวลาในการบำบัดน้ำเสียสั้นลงและยังสามารถรับปริมาณน้ำเสียเข้าระบบได้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการมี High loading rate

จะทำให้เกิดก๊าซซึ่งทำให้เกิดการผสมที่ดีในชั้นตะกอนล่าง (sludge bed) และชั้นตะกอนลอย (sludge blanket)

ต่อมาในปี 1980 Lettinga, Roersm และ Grin ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบีโดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดี พร้อมทั้งพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์และก๊าซชีวภาพ เรียกว่า อุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator หรือ GSS) ใช้แยกระหว่างของแข็ง ของเหลว และก๊าซเพื่อช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น ทำให้ระบบยูเอเอสบีสามารถเก็บกักจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ดียิ่งขึ้น

2.5.2 คุณลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบี เป็นระบบบำบัดทางชีววิทยาระบบหนึ่งที่มีความสนใจและมีการพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้น โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แขวนลอย ซึ่งมีการพัฒนาให้เกาะตัวกันในลักษณะเป็นเม็ดตะกอน (Granule) หัวใจสำคัญของระบบยูเอเอสบี คือ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งอาศัยการยึดเกาะกันเองของจุลินทรีย์ (Self-Immobilization) ระบบนี้อาศัยการกวนผสมที่เกิดจากการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์จากด้านล่างไหลขึ้นสู่ด้านบน (Up-flow Feeding) และการกวนผสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจริงจากกิจกรรมการย่อยสลายเป็นสำคัญ โดยตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเสียด้วยอุปกรณ์แยกสามสถานะ ทำให้สามารถรักษาจุลินทรีย์ประสิทธิภาพสูงไว้ในระบบได้

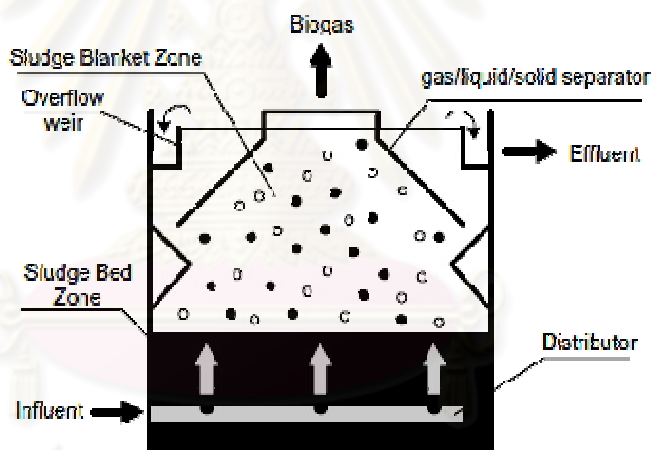
ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีจะเป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอกก็ได้ ซึ่งลักษณะของถังจะเป็นออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) ส่วนที่เป็นถังหมักและระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) บริเวณนี้จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ การไหลของน้ำเสียในถังจะเป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน มีการป้อนน้ำเสียจะป้อนเข้าทางด้านล่างของถังยูเอเอสบีผ่านทางระบบการกระจายน้ำเสีย ซึ่งการกระจายน้ำเข้าถังจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของถัง การเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในถังยูเอเอสบีจะควบคุมให้ตะกอนสะสมเป็นชั้นตะกอนที่มีความหนาแน่น น้ำเสียที่ต้องการบำบัดจะไหลผ่านชั้นตะกอน แบคทีเรียในชั้นตะกอนซึ่งอยู่กันอย่างหนาแน่นจะเกิดการรวมกันเป็นเม็ด (Granule) โดยเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงจะจมตัวอยู่ด้านล่าง มีการจัดเรียงตัวจากขนาดใหญ่ขึ้นไปหาเล็กเหมือนชั้นทรายกรอง ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่าฟองกระจายขึ้นมาเป็นชั้นตะกอนแขวนลอย โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นและการไหลของน้ำที่เข้ามาจากด้านล่างของถังจะช่วยทำให้เกิดการผสมขึ้น

2) ส่วนตกตะกอนและแยกก๊าซ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมและลดปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่หลุดออกไปกับน้ำทิ้ง และทำหน้าที่รวบรวมก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จึงมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ เพื่อทำหน้าที่แยกก๊าซชีวภาพ ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยแผ่นกั้นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา โดยทำหน้าที่ดังนี้

2.1) แยกน้ำกับก๊าซโดยอาศัยหลักการที่ว่าน้ำสามารถไหลเลี้ยวไปมาได้ ในขณะที่ก๊าซมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้น ยกเว้นมีสิ่งกีดขวางหรือแผ่นปะทะใดๆ มาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้น หลังจากผ่านพ้นสิ่งกีดขวางนั้นแล้วก็จะลอยตัวเป็นเส้นตรงดังเดิม จึงออกแบบและติดตั้งแผ่นปะทะเพื่อขวางทิศทางการไหล ทำให้น้ำและก๊าซมาปะทะแล้วเบี่ยงเบนการไหลของน้ำและก๊าซออกจากกัน

2.2) แยกตะกอนออกจากน้ำโดยทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกอนแบคทีเรียที่ไหลขึ้นมา การแยกตะกอนจะเกิดในส่วนบนสุดของถัง โดยในส่วนนี้จะไม่มีการมีก๊าซ มีความปั่นป่วนต่ำ สามารถแยกก๊าซและตะกอนได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีพื้นที่ส่วนที่เป็นน้ำนิ่งเพียงพอที่ตะกอนจะตกกลับมายังถังปฏิบัติการได้



ภาพที่ 2.9 ลักษณะและการทำงานของระบบบำบัดยูเอเอสบี

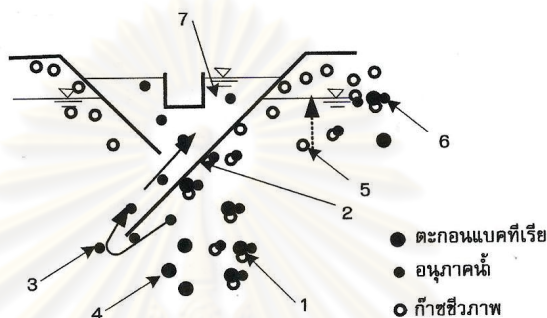
2.5.3 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator : GSS) มีดังนี้

- 1) ตะกอนแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพและอนุภาคของน้ำเกาะและไหลขึ้นมาพร้อมกัน
- 2) กระแทกกับแผ่น GSS ทำให้เกิดการแยกออกจากกัน
- 3) อนุภาคน้ำจะไหลไปตามแผ่น GSS โดยออกไปยังทางน้ำออกด้านบน
- 4) ตะกอนแบคทีเรียขนาดใหญ่ที่ไม่มีก๊าซสะสมอยู่จะตกกลับลงมา

5) ก๊าซชีวภาพซึ่งไม่สามารถย้อนกลับได้เช่นเดียวกับน้ำ จะไหลขึ้นไปสะสมยัง ส่วนรวบรวมก๊าซทางด้านบน

6) กรณีที่กลุ่มของตะกอนแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพ และอนุภาคของน้ำไม่ไปชนกับ แผ่น GSS จะเกิดการแยกตัวเมื่อถึงผิวน้ำ

7) สำหรับตะกอนขนาดเบาที่สามารถไหลตามกระแสได้ออกมาได้ จะเกิดการ ตกตะกอนในส่วนบนของแผ่น GSS เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเร็วการไหลของน้ำต่ำและน้ำ ค่อนข้างนิ่ง



ภาพที่ 2.10 หลักการทำงานของอุปกรณ์แยกสามสถานะแสดงตามลำดับขั้นที่ 1 - 7

2.5.4 ประโยชน์ของการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator : GSS) สำหรับระบบบิวเอเอสบี (Lettinga และ Hulshoff, 1991) มีดังนี้

- 1) เพื่อแยกและนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกรณ์
- 2) เพื่อป้องกันการหลุดออก (Wash out) ของจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น
- 3) เพื่อให้ตะกอนตกกลับไปด้านล่างของถังปฏิกรณ์
- 4) เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket) ขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็วเข้าไปในส่วนตกตะกอน

5) เพื่อเป็นการทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพที่ดีขึ้น

2.5.5 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบิวเอเอสบี

ข้อดี มีดังนี้

1) ต้องการพลังงานในการเดินระบบต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศและไม่ใช้เครื่องจักรกล

2) ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

3) มีความเหมาะสมในการใช้ระบบบำบัดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่และในพื้นที่เขตชุมชนนอกเมือง

4) ใช้สารอาหารน้อยและต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน

5) ปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดจากระบบน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและตะกอนที่ได้มีความคงตัวสูง ลดภาระในการกำจัดตะกอนต่อไป

6) ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (ก๊าซมีเทน) สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้

7) สามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบอื่น ๆ

8) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่มีปัญหาและการเริ่มต้นระบบใหม่สามารถกระทำได้ง่าย ระบบฟื้นตัวได้เร็วจึงเหมาะกับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู

ข้อจำกัด มีดังนี้

1) ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ (Start up) ค่อนข้างนาน โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 3-6 เดือน

2) ควรเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวกันเป็นเม็ด มิฉะนั้นประสิทธิภาพของระบบจะต่ำหรือสามารถรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ได้น้อย

3) ต้องควบคุมปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบและควบคุมอัตราการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ (Wash out) ให้เกิดน้อยที่สุด

4) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

5) จุลินทรีย์ในระบบมีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงพีเอชที่ค่อนข้างแคบประมาณ 6.8-8.2

6) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ผลผลิตต่างๆที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

7) ระบบต้องการการดูแลและควบคุมอย่างใกล้ชิด การเดินระบบต้องอาศัยผู้ควบคุมที่มีความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการควบคุมสภาพการทำงานที่สมดุลระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนทำได้ยาก

8) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่สามารถเป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้ เนื่องจากยังคงมีสารตัวกลาง (Intermediates) ต่างๆเหลืออยู่ทำให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดีสูง ประสิทธิภาพในการลดบีโอดีต่ำ

2.6 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granulation)

2.6.1 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granular sludge) (Lettinga และ Hulshoff, 1985)

ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนที่นำมาเป็นหัวเชื้อ (Seed sludge) และส่วนประกอบของน้ำเสีย เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีอยู่หลายชนิด ดังนี้

1) Sarcina Granular เป็นชนิดที่มีรูปร่างกลม ส่วนใหญ่เกาะกันเป็นกลุ่ม Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกเข้มข้นมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 6.5 มิลลิเมตร จึงถูกชะล้างออกได้ง่ายและยังเป็นชนิดที่มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ

2) Spinky Granular เป็นชนิดที่มีความยาวมากกว่า 1 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งข้าวโพด

3) Filamentous เป็นชนิดที่มีรูปร่างเป็นแท่งต่อกันเป็นสายยาวประกอบด้วย Methanotrix ชนิดที่เป็นเส้น Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นจากน้ำเสียที่มีแต่กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids)

4) Rod เป็นชนิดที่มีรูปร่างกลม ประกอบด้วย Methanotrix ชนิดที่เป็นเส้นรวมกันประมาณ 5 เซลล์ มักพบในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันและโรงงานน้ำตาล

2.6.2 ปัจจัยที่ทำให้ระบบยูเอเอสพีสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง

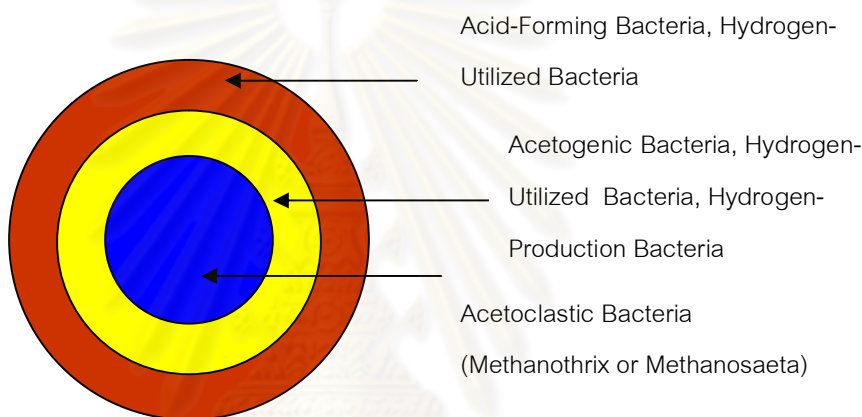
1) น้ำหนักของเม็ดตะกอน เม็ดตะกอนในระบบยูเอเอสพีจะมีน้ำหนักมาก ส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าสูง ซึ่งอาจมีค่าสูงถึง 60 เมตรต่อชั่วโมง ทำให้ความแตกต่างจากความเร็วในการไหลของน้ำเสียมาก ทั้งนี้โดยปกติแล้วความเร็วในการไหลของน้ำเสียจะไม่เกิน 2 เมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นเวลากักเก็บตะกอน (Solid Retention Time, SRT) จึงสูงกว่าเวลากักเก็บน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT)

2) ความสามารถของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (Methanogenic Activity: MA) ซึ่งพบว่าในระบบยูเอเอสพีสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงถึง 50 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยที่ค่า MA จะสูงหรือต่ำนั้นจะขึ้นอยู่กับการอัดตัวกันแน่นของแบคทีเรียและประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรีย

2.6.3 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granules)

Guiot, Pauss และ Costerton (1992) กล่าวว่า ความเร็วในการไหลขึ้นของน้ำในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถตกตะกอนได้ดี เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีข้อดี คือ มีความหนาแน่นสูง เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีอัตราส่วนของแบคทีเรียต่อปริมาณที่สูงมาก ไม่เสียพื้นที่ในถังปฏิกรณ์เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลาง (Media) ให้จุลินทรีย์เกาะติด

การศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) พบว่าโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 3 ชั้น แสดงดังภาพที่ 2.11



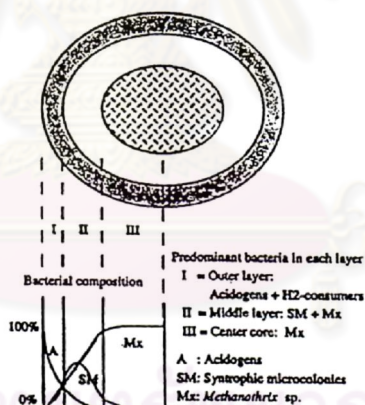
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (McLeod, Guiot และ Costerton, 1990)

- 1) โครงสร้างชั้นนอก ประกอบด้วย แบคทีเรียหลายกลุ่ม ได้แก่ Hydrogenic acidogens, Sulfate reducers, *Methanosarcina* spp. และ H_2 -utilizing methanogens
- 2) โครงสร้างชั้นกลาง ประกอบด้วย Hydrogenic acetogens และ H_2 -utilizing methanogens เช่น *Methanosarcina* spp., *Methanococcales* spp. และ *Methanospirillum* spp. เป็นต้น
- 3) โครงสร้างชั้นใน ประกอบด้วย แบคทีเรียประเภท Acetoclastic ส่วนใหญ่เป็น *Methanosaeta* spp.

แบคทีเรียกลุ่ม H_2 -utilizing methanogens ในชั้นกลางและชั้นนอกมีความแตกต่างกัน คือ กลุ่มแบคทีเรียชั้นนอกจะใช้ substrate ที่ต่ำกว่า (มีค่า K_s สูง) กลุ่มแบคทีเรียชั้นกลางและแบคทีเรียกลุ่ม Acetoclastic ที่อยู่ชั้นในมีค่า K_s ต่ำกว่า แบคทีเรียกลุ่ม Acetoclastic ในชั้นกลางการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granulation) เป็นโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียแต่ละชนิดต่างกันโดยเฉพาะในแกนกลางของเม็ด

ตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งเป็น Acetoclastic methanogens ซึ่งส่วนใหญ่เป็น *Methanosaeta* spp. เป็นส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนโดยอาศัย substrate เช่น อะซิเตท ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มชั้นนอกและชั้นกลาง ทั้งนี้ *Methanosaeta* spp. เป็นแบคทีเรียที่มีค่า affinity สูงสุดในกลุ่มแบคทีเรีย Acetoclastic methanogens ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของ *Methanosaeta* spp. ในสภาวะที่มีข้อจำกัดของการแพร่กระจายอะซิเตทมายังแกนกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

โครงสร้างและขนาดของชั้นแบคทีเรียในแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยสลายสารอาหารและการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ผิววนอกสุดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์พบว่ามีกลุ่ม Acidogens จะมีปริมาณมากเพราะบริเวณรอบนอก (Bulk liquid) มีความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตสูงและยังเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสร้างกรด (Acidogenesis) ที่มีค่าสูงกว่าขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยและขั้นตอนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) อะซิเตทที่ถูกผลิตจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ต่อไป แสดงดังภาพที่ 2.12

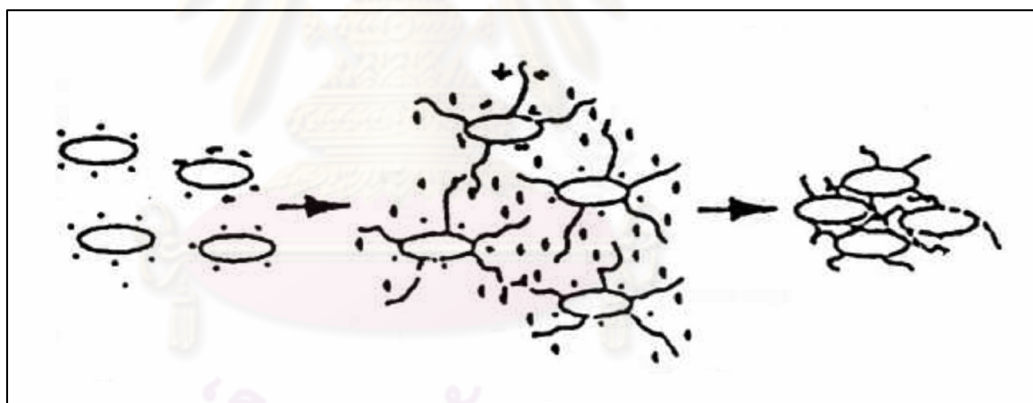


ภาพที่ 2.12 โครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต (Fang, Chui และ Li, 1994 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545.)

2.7 กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Process of Granulation)

2.7.1 ความสำคัญของ Extra Cellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Schmidt และ Ahring, 1995)

Extra Cellular Polymers (ECP) เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ประกอบไปด้วยโพลีเมอร์ของ saccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก มีความสามารถในการดักจับสารอาหารที่ละลายได้ (Soluble nutrients) และช่วยในการยึดเกาะระหว่างเซลล์ของแบคทีเรีย เมื่อมีการศึกษาของโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าแบคทีเรียที่อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มี ECP ล้อมรอบอยู่ โดยพบปริมาณ ECP ที่อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีค่าประมาณ 0.6-20 เปอร์เซ็นต์ VSS ซึ่ง ECP ที่พบส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโปรตีนและ polysaccharide เท่ากับ 2:1 ถึง 6:1 และมีไขมันอยู่ในปริมาณ 0.02-0.05 เปอร์เซ็นต์ VSS เนื่องจากแบคทีเรียที่กระจายอยู่ในน้ำเสียมีประจุเป็นลบจึงเกิดแรงผลักระหว่างเซลล์แบคทีเรียทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้ เมื่อ ECP ซึ่งมีประจุบวกมาล้อมรอบที่ผิวของเซลล์แบคทีเรียทำให้เซลล์แบคทีเรียสามารถรวมตัวกันได้ แสดงดังภาพที่ 2.13 แต่ถ้ามีปริมาณ ECP มากเกินไปอาจทำให้เกิดการผลักระหว่างประจุบวกทำให้เซลล์แบคทีเรียไม่สามารถรวมตัวกันได้

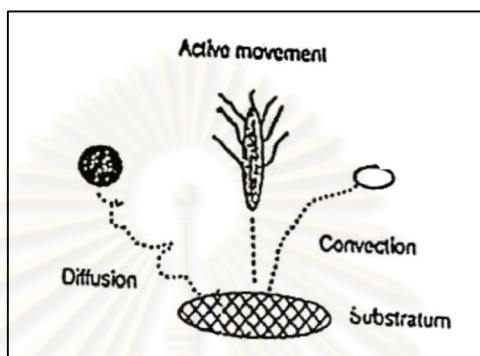


ภาพที่ 2.13 บทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่า ECP เป็นผลที่เกิดจากแบคทีเรียจำเพาะกลุ่มหนึ่งหรือแบคทีเรียทุกชนิดในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตาม ECP โดยเฉพาะ polysaccharide เป็นผลผลิตที่เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic) และแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acidogenic) น้อยมาก ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic) เป็นกลุ่มที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมากในการสร้าง ECP

2.7.2 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Schmidt และ Ahring, 1995) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Transport การเคลื่อนไหวของเซลล์ด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในภาพที่ 2.14 ไปจับตัวกับอนุภาคเซลล์อื่นของแบคทีเรียกลายเป็นอนุภาคพื้นฐาน (Substratum) ด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การแพร่กระจาย (Brownian motion), การพัดพา (Convective) โดยของเหลวและก๊าซ, การตกตะกอนหรือการเคลื่อนไหวของเซลล์โดย Flagella

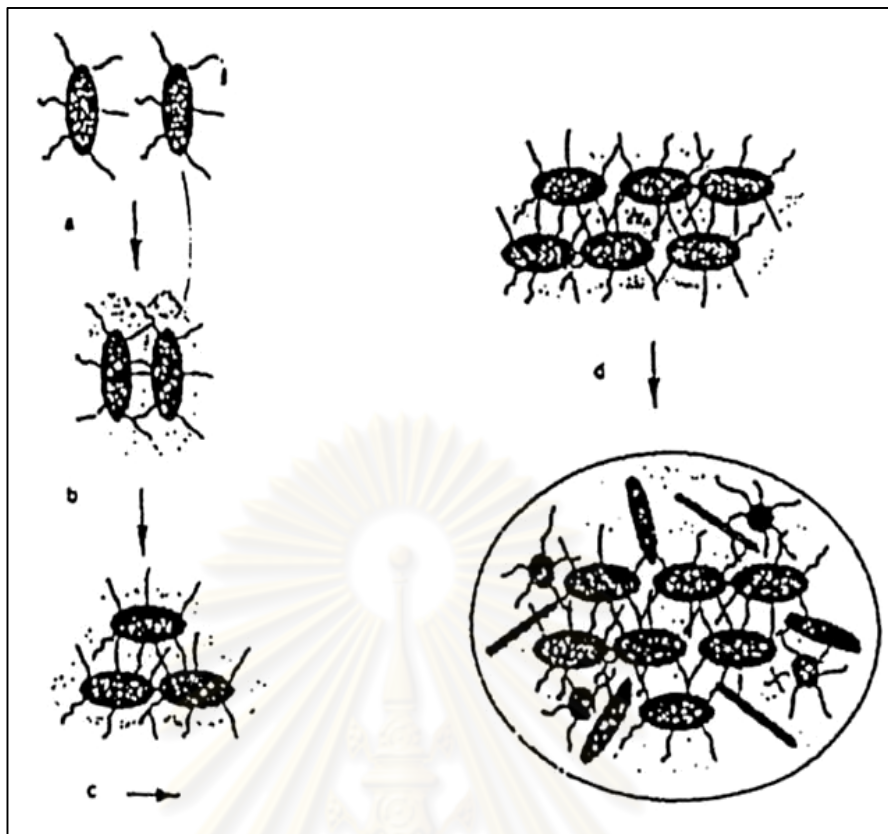


ภาพที่ 2.14 กลไกการเคลื่อนไหวต่างๆที่มีผลต่อการรวมตัวของแบคทีเรีย

ขั้นตอนที่ 2 Reversible Adsorption การดูดติดผิวของเซลล์แบคทีเรียกับอนุภาคพื้นฐาน ซึ่งอาจเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรืออนุภาคของแข็งเฉื่อย โดยเป็นผลจากแรงทางประจุไฟฟ้า (Ionic strength) ซึ่งเซลล์สามารถแยกตัวหรือหลุดออกไปได้อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 3 Irreversible adhesion ด้วยพันธะที่แข็งแรงของพอลิเมอร์ (ECP) การยึดเกาะของเซลล์เข้ากับอนุภาคพื้นฐานนั้นเซลล์อาจมีโอกาที่จะหลุดออกจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ยากและยังไม่ใช่ที่แน่ชัดว่า ECP ถูกผลิตขึ้นมาก่อนหรือหลังการยึดเกาะของเซลล์ (Adhesion)

ขั้นตอนที่ 4 Multiplication หรือการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในชั้น ECP โดยเซลล์ที่แบ่งตัวใหม่ยังคงอยู่ในชั้น ECP และเกิดการเพิ่มขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเกิดการดักเซลล์ใหม่ที่อยู่ในน้ำเสียเข้ามารวมตัวในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์อีกด้วยกลไกการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลล์ โดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 กลไกการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลล์ โดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Schmidt และ Arhing, 1995)

(a) The reversible association of two bacteria becomes irreversible adhesion. ECP are used to bind the two bacteria to each other.

(b) Cell division provides sister cells that are bound within the ECP.

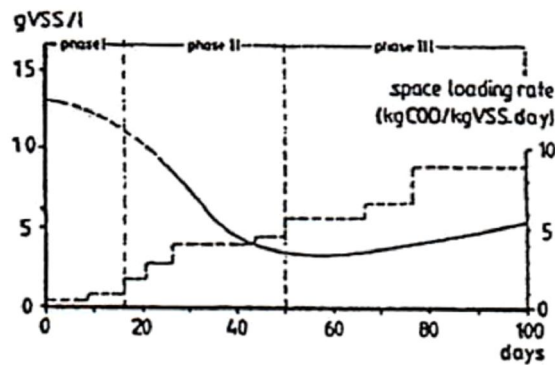
(c) Microcolony formation.

(d) Granulation is a function of cell division within the microcolonies and new recruitment of bacteria from the liquid.

2.7.3 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Pelletization)

Hulshoff-Pol และคณะ (1983) (อ้างถึงในทวิชัย ธีระเศรษฐ์นันท์, 2540)

ได้ศึกษากลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่หรือการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์แสดงดังภาพที่ 2.16 นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงขั้นตอนของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 2.16 การเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพี Hulshoff-Pol และคณะ (1983) (อ้างถึงใน ทวีชัย วีระเศรษฐนันท์, 2540)

ขั้นตอนที่ 1 Washout Stage (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ในขั้นตอนนี้เป็นช่วงเริ่มต้นระบบ เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีแล้ว น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอนทำให้ชั้นตะกอนล่างเกิดการขยายตัวและเกิดก๊าซขึ้นในระบบ ทำให้เกิดจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (Filamentous organism) ซึ่งส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง แบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบาจะไหลออกมากับน้ำล้างตลอดเวลา ขณะที่มีการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในระบบอย่างช้าๆ

ขั้นตอนที่ 2 Transition Stage (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2-5 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ในขั้นตอนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูง เนื่องจากการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้เกิดก๊าซภายในระบบมากขึ้นส่งผลให้มีการหลุดของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กๆ ออกนอกถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และหนักสามารถคงอยู่ในถังต่อไปได้และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าในขั้นตอนนี้เป็น การคัดเลือกพันธุ์จุลินทรีย์ในระบบด้วย

ขั้นตอนที่ 3 Progressive granular (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 3-5 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีมากกว่าการหลุดออกนอกถังของตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อระบบได้ผ่านขั้นตอนี้แล้วระบบจะสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ระบบจะสามารถรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาระบบอาจรับได้มากถึง 5 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

2.7.4 ทฤษฎีและกลไกการเกิดเม็ดตะกอน

การสร้างเม็ดตะกอนเป็นหัวใจหลักของระบบยูเอเอสบี จึงมีการคิดค้นทฤษฎีการสร้างเม็ดตะกอนโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ทฤษฎีการเกิดเม็ดตะกอน (Hulshoff และคณะ, 2004)

กลไก	อ้างอิง	ชื่อทฤษฎี
ด้านกายภาพ (Physical)	Hulshoff Pol และคณะ (1983)	Selection Pressure
	Pereboom (1994)	Growth of Colonized Solids
ด้านคุณสมบัติของแบคทีเรีย (Microbial)	Dolfing (1987)	-
	Sam-Soon และคณะ (1987)	Cape Town Hypothesis
	Wiegant (1987)	Spaghetti Theory
	Chen and Lun (1993)	-
	De Zeeuw (1980)	Three type of VFA Degrading Granules
	Dubourgier และคณะ (1987)	Bridging of Microflocs
	McLeod และคณะ (1990)	-
	Morgan และคณะ (1991)	Bundles of Methanotrix
	Vanderhaegen และคณะ (1992)	-
	Wu และคณะ (1996)	Anaerobic Granulation with Defined Species
Ahn (2000)	-	
ด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic)	Thaveesri และคณะ (1995)	Surface Tension Model
	Schmidt and Ahring (1996)	-
	Zhu และคณะ (1997)	Crystallized Nuclei
	Tay และคณะ (2000)	Formation Proton Translocation-Dehydration

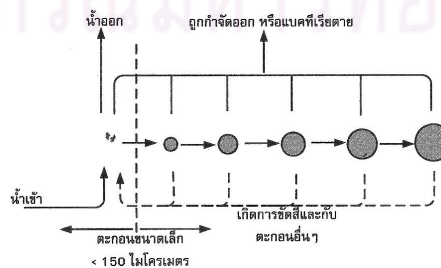
1) กลไกทางด้านกายภาพ (Physical)

ทฤษฎี Selection Pressure (อัตราภาวะบรรทุทุกัดพันธุ) เป็นผลเนื่องมาจากอัตราภาวะบรรทุทุกทางชลศาสตร์ ซึ่งก็คืออัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบต่อพื้นที่หน้าตัดของถัง ส่งผลต่อความเร็วไหลขึ้นของน้ำ และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมีผลต่อการกวนผสมและความปั่นป่วนในชั้นตะกอนรวมไปถึงความเร็วไหลขึ้น

ภายใต้สภาวะที่อัตราภาวะบรรทุทุกัดพันธุมีค่าสูง ตะกอนที่มีขนาดเล็กและเบา จะถูกกำจัดออกจากระบบ ดังนั้นเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กและเบาจะมีน้อย เม็ดตะกอนส่วนใหญ่ จึงเป็นเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ที่ได้จากการขยายตัวของนิวเคลียส ทั้งนี้อาจเกิดได้ทั้งจากการรวมตัวของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือแบคทีเรียขนาดเล็กที่มีอยู่ในชั้นตะกอน ชั้นตะกอนจะเริ่มสะสมตัวจากนั้นจะมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นจนมีขนาดสูงสุด ซึ่งจะเกิดความสมดุลระหว่างอัตราการเกิดขึ้นและการสูญเสียเซลล์แบคทีเรีย เม็ดตะกอนที่เริ่มเกิดขึ้นเป็นลักษณะของเส้นใยที่มาเกาะกันเป็นกลุ่ม โดยเริ่มจากการเป็นกลุ่มที่หลวมและมีขนาดใหญ่จากนั้นจึงอัดตัวกันแน่นขึ้น

หากระบบอยู่ในสภาวะที่อัตราภาวะบรรทุทุกัดพันธุต่ำ แบคทีเรียที่มีการเจริญเติบโตจะเป็นแบบที่มีน้ำหนักเบาและฟุ้งกระจายทำให้ตะกอนที่ได้มีลักษณะเป็นฟูขนาดใหญ่ น้ำหนักเบาและจมตัวไม่ดี โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญจะเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Methanotrix ซึ่งสามารถเกิดเป็นสายแบคทีเรียได้ยาวถึง 200-300 ไมโครเมตร ดังนั้นหากแบคทีเรียชนิดนี้ไม่ได้รวมตัวเป็นเม็ดที่หนาแน่นและมีน้ำหนักเพียงพอจะมีโอกาสที่จะหลุดออกจากระบบได้ง่าย นอกจากนี้แล้วอาจเกิดการสะสมของฟองก๊าซในกลุ่มของแบคทีเรียทำให้ตะกอนหลุดออกจากระบบได้ด้วย

Growth of Colonized Suspended Solids สมมุติฐานว่าการเกิดเม็ดตะกอนเริ่มต้นมาจากการรวมตัวและขัดสีกันของเม็ดตะกอนขนาดเล็ก รวมถึงการรวมตัวกับสารแขวนลอยที่เข้ามา กับน้ำเสีย โดยขนาดของเม็ดตะกอนจะถูกควบคุมจากการหลุดออกของแบคทีเรียส่วนเกิน โดยความปั่นป่วนและก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ มีส่วนทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กในถังเท่านั้น โดยไม่มีส่วนในการทำลายเม็ดตะกอน แสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนตามทฤษฎี Growth of Colonized Suspended Solids (Pereboom, 1994)

2) กลไกทางด้านคุณสมบัติของแบคทีเรีย (Microbial)

ทฤษฎีที่สำคัญได้แก่ Cape Town Hypothesis โดยระบุว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการสร้างเม็ดตะกอนจะสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ค่าความดันย่อยของไฮโดรเจน (H_2 partial pressure) สูง, สภาพการไหลของน้ำเสียเป็นแบบรางขนาน (Plug flow) หรือแบบกึ่งรางขนาน (Semi-plug flow), พีเอชประมาณ 7.0, มีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของแอมโมเนียและมีปริมาณกรดอะมิโนไม่จำเป็นที่ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีนชนิด Cysteine อยู่จำกัด

สำหรับทฤษฎี Spaghetti Theory ซึ่งเป็นทฤษฎีที่อธิบายการสร้างเม็ดตะกอน โดยแบ่งขั้นตอนการสร้างเม็ดตะกอนออกเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนตั้งต้นหรือนิวเคลียส(nucleus) จากนั้นจึงขยายขนาดเม็ดตะกอน กระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจะเริ่มจากการที่ Methanotrix แบคทีเรียรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก ทั้งนี้การรวมตัวจะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนภายในถัง โดยอาศัยความเร็วในการไหลขึ้นของน้ำเสียเป็นกลไกในการคัดเลือกเม็ดตะกอน นอกจากนี้ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในระบบต้องไม่สูงเกินไป เนื่องจากทำให้การขยายตัวของเม็ดตะกอนที่ได้เกิดขึ้นได้ช้า เม็ดตะกอนแบคทีเรียตั้งต้นหรือนิวเคลียสที่เกิดจากการรวมตัวกันจะขยายตัวขึ้นโดยอาศัยการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนเอง และการจับเอาแบคทีเรียที่กระจายอยู่ภายในถัง แบคทีเรียภายในเม็ดตะกอนในช่วงนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียจำพวกเส้นใย จากนั้นจึงพัฒนากลายเป็นเม็ดตะกอนของแบคทีเรียจำพวกแท่ง (Rod-Type Granules) เมื่ออายุของแบคทีเรียสูงขึ้น

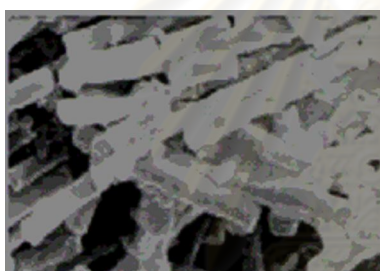
Ecological Approach เป็นทฤษฎีที่อธิบายการสร้างเม็ดตะกอนที่เกี่ยวข้องกับระบบนิเวศภายในระบบบยูเอเอสบี ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบบยูเอเอสบีแรกได้แก่ การรวมตัวกันระหว่างฟลอคขนาดเล็กโดยแบคทีเรียชนิด Methanotrix (เป็นการรวมกันระหว่างทฤษฎี Bridging of Microflocs และ Bundles of Methanotrix) กลไกการเกิดเม็ดตะกอนเริ่มจากการที่ Methanotrix ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดเส้นใย ถูกห้อมล้อมด้วยแบคทีเรียจำพวกแท่ง ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) เกิดเป็นฟลอคขนาดเล็กประมาณ 10-15 ไมโครเมตร จากนั้นกลุ่มของฟลอคแต่ละกลุ่มจะเข้ามารวมตัวกันเป็น ฟลอคขนาดใหญ่ขึ้น โดยอาจมีขนาดมากกว่า 200 ไมโครเมตร ทั้งนี้บทบาทในการเพิ่มขนาดของเม็ดตะกอนจะเป็นหน้าที่ของแบคทีเรียสร้างกรด

ทฤษฎีต่อมาได้แก่ การรวมตัวของ Methanotrix โดยอาศัย Extracellular Polymer หรือ ECP (Bundles of Methanotrix Surrounded by ECP) การเกิดเม็ดตะกอนซึ่งจะเกิดขึ้นจากการพัฒนาเม็ดตะกอนตั้งต้นหรือนิวเคลียส โดยเม็ดตะกอนตั้งต้นจะเกิดจากการรวมตัวของ Methanotrix และแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เป็นกลุ่มของแบคทีเรีย ทั้งนี้เมื่อเกิดเป็นเม็ดตะกอน

ตั้งต้นจะไม่มีการรวมตัวกันระหว่างเม็ดตะกอนที่เกิดขึ้น แต่การขยายตัวของเม็ดตะกอน เกิดจากการเกาะยึดกันของแบคทีเรียสร้างมีเทนและสร้างกรดกับเม็ดตะกอนตั้งต้นนี้ โดยเชื่อว่า Methanothrix และโพลีเมอร์มีบทบาทสำคัญต่อการสร้างและการขยายตัวของเม็ดตะกอน

นอกจากนี้ Three types of VFA Degrading Granules ยังศึกษาผลของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ต่อการสร้างเม็ดตะกอน พบว่าทั้ง Methanothrix และ Methanosarcina มีบทบาทสำคัญในการสร้างเม็ดตะกอน โดยเม็ดตะกอนที่ได้แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

- 1) เม็ดตะกอนที่อัดตัวแน่น องค์ประกอบส่วนใหญ่เกิดจากการอัดตัวกันของแบคทีเรียแบบแท่งเดี่ยว หรือ Methanothrix ที่เป็นสายสั้น (ภาพ 2.18 ก.)
- 2) เม็ดตะกอนที่จับตัวกันแบบหลวมๆ เกิดจากการรวมตัวกันของ Methanothrix (ภาพ 2.18 ข.)
- 3) เม็ดตะกอนที่อัดตัวแน่น โดยเกิดจากการรวมตัวของ Methanosarcina (ภาพ 2.18 ค.)



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 2.18 ชนิดของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนแต่ละชนิดถ่ายภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (Grotenhuis และคณะ, 1987 และ Hulshoff, 1989)

Herbert Fang (2000) กล่าวว่าไว้ว่าการชนและรวมตัวของแบคทีเรียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจนเกิดเม็ดตะกอนไม่ได้เกิดจากความบังเอิญ แต่แบคทีเรียจะหาบริเวณที่จะไปรวมกัน โดยเป็นจุดที่สามารถรับอาหารและมีการกำจัดผลผลิตที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเกิดการสร้างแกนกลางหรือนิวเคลียสขึ้นและเจริญเติบโตขึ้นเป็นเม็ดตะกอน ความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นนั้น จะถูกกำหนดโดยสารอาหารและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้ Ahn (2000) ยังได้สร้างแบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนชั้นแรกแบบที่เรียสร้างมีเทนจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ จากนั้นจะเคลื่อนที่มาเกาะติดกันเนื่องจากกลไกทางด้านศาสตร์ในถัง ส่วนประกอบของเม็ดตะกอนในช่วงนี้ส่วนใหญ่จะเป็นมีเทนแบคทีเรียจำพวกเส้นใย หลังจากนั้นแบคทีเรียสร้างกรดจะเข้ามาเกาะติดโดยกลุ่มของแบคทีเรียสร้างกรดจะเป็นกลุ่มที่สร้างสารอาหารให้แบคทีเรียชนิดที่สร้างมีเทน เมื่อรวมตัวกันจึงทำให้เกิดเป็นแกนกลางของเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นสูง จากนั้นแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายกลุ่มอื่นๆจึงจะเริ่มมารวมตัวกันทำให้เกิดเป็นเม็ดตะกอนขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.19

ลักษณะ	ขั้นตอน	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดตะกอน	Log pH ₂ (ATM)
	การเจริญของแบคทีเรียในกลุ่ม สร้างกรด(เส้นใย) และสร้างมีเทนในสภาวะที่มีแรงดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ	-	ต่ำ (-6.0)
	เริ่มมีการรวมตัวกันของแบคทีเรียทั้งสองประเภท	< 100 ไมโครเมตร	
	เกิดการรวมตัวเป็นแกนกลางโดยมีแบคทีเรียสร้างกรดอยู่ในบริเวณด้านนอกแบบหลวมๆ	< 1 มม.	
	การรวมตัวเริ่มแน่นและกลายเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็ก	1-2 มม.	
	เม็ดตะกอนเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นและชั้นของแบคทีเรียมีมากขึ้น	2-5 มม.	สูง (-2.7 ถึง -3.7)

ภาพที่ 2.19 กระบวนการสร้างเม็ดตะกอน (Ahn, 2000)

3) กลไกทางด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic)

เป็นทฤษฎีที่อธิบายการเกิดเม็ดตะกอน โดยการพิจารณาจะตั้งอยู่บนสมมุติฐานของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีภายในระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยการเข้ามากระทบกันของเซลล์ การดูดติดผิว การเกาะยึด การเพิ่มจำนวน เป็นต้น ทฤษฎีต่างๆที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นอาจจะยุ่งยากและเป็นข้อมูลเชิงจุลชีววิทยา และยังคงมีความหลากหลายในการอธิบายกลไกการสร้างเม็ดตะกอนจึงยากต่อการนำเอาไปใช้งาน

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการศึกษาและควบคุมระบบ โดยทั่วไปจะใช้หลักการในการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสมกับการเกิดเม็ดตะกอนมากที่สุด เพื่อให้ตะกอนรวมตัวกันเป็นเม็ดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการเดินระบบจึงพยายามควบคุมอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ เนื่องจากควบคุมได้ง่ายและเชื่อกันว่ามีผลต่อการสร้างเม็ดตะกอนเป็นอันดับแรกและมีผลสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการบรรทุกคัดพันธุ์

ลักษณะของการเกิดเม็ดตะกอน เมื่อเทียบกับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่จ่ายให้แก่ระบบ โดยทำการสังเกตจากพฤติกรรมของตะกอนแบคทีเรีย อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ < 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) เป็นการเริ่มต้นเดินระบบ หลังจากทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบี ชั้นตะกอนล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าไปและก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ รวมทั้งมีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจำพวกเส้นใย (Filamentous organisms) ทำให้ตะกอนแบคทีเรียจมตัวได้น้อยลง

ช่วงที่ 2 (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 2-5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ในช่วงนี้มีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงเนื่องจากการเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ทำให้เกิดการผลิตก๊าซมากขึ้น ตะกอนแบคทีเรียที่มีขนาดเล็กหลุดออกจากถัง ส่วนตะกอนแบคทีเรียที่มีขนาดใหญ่และหนักจะสามารถอยู่ในถังได้ ซึ่งถือว่าเป็นการคัดเลือกแบคทีเรียในของระบบโดยอัตโนมัติ ทำให้การรวมตัวกันของตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ภายในถังมีลักษณะเป็นเม็ดตะกอน ขนาดของเม็ดตะกอนแบคทีเรียจะมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยอาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มิลลิเมตร

ช่วงที่ 3 (อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ > 5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ถือเป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรียมีมากกว่าการหลุดออกของตะกอนแบคทีเรีย เนื่องจากตะกอนส่วนที่เบาได้หลุดออกไปในช่วงที่ 2 เป็นส่วนใหญ่แล้ว หลังจากระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ระบบจะสามารถรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถจะรับได้

นอกจากนี้ลักษณะของน้ำเสียยังส่งผลต่อการเกิดเม็ดตะกอนอีกด้วย ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

1) ซีโอดีของน้ำเสีย ในน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูงสามารถเกิดกรดไขมันระเหยในปริมาณที่มาก สารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีค่าสูงจะส่งผลเสียต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถย่อยสลายสารอาหารได้เร็วกว่า ทำให้มีแบคทีเรียสร้างกรดเกาะอยู่กับเม็ดตะกอนแบคทีเรียมากขึ้น ส่งผลต่อขนาดของเม็ดตะกอนและการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ในทางกลับกันหากซีโอดีของน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำเกินไป และเม็ดตะกอนแบคทีเรียมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้เกิดโพรงขึ้นภายในเม็ดตะกอน เนื่องจากสารอาหารของแบคทีเรีย

จะถูกใช้หมดไปก่อนที่จะผ่านไปถึงแบคทีเรียที่อยู่ด้านใน แบคทีเรียที่อยู่ในบริเวณใจกลางของเม็ดตะกอนจะไม่ได้รับอาหาร ทำให้แบคทีเรียตายและถูกย่อยสลายไป

2) ส่วนประกอบของน้ำเสีย หมายถึง ชนิดของสารอาหารในน้ำเสีย ทั้งนี้ โครงสร้างของเม็ดตะกอนจะสัมพันธ์กับชนิดของสารอาหารในน้ำเสีย ตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำเสียเป็นสารจำพวกกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก แบคทีเรียที่อยู่บนเม็ดตะกอนจะเป็นแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทนเป็นส่วนใหญ่ แต่หากลักษณะของน้ำเสียมีความซับซ้อนมากขึ้นก็จะพบแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เช่น Acidogens ในโครงสร้างของเม็ดตะกอนด้วย

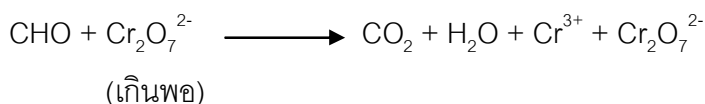
นอกจากนี้ในการวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าลักษณะของน้ำเสียยังส่งผลต่อลักษณะของเม็ดตะกอนที่ได้ด้วย กล่าวคือลักษณะของน้ำเสียที่มีสารอาหารจำพวกที่ให้พลังงานสูง (Energy-rich) ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตและน้ำตาล เช่น น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง จะได้เม็ดตะกอนที่ตกตะกอนได้ดีและมีค่าความสามารถของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนสูง ส่วนน้ำเสียที่มีสารอาหารจำพวกโปรตีน เช่น น้ำเสียจากโรงงานอาหารกระป๋องจะทำให้เม็ดตะกอนเกิดได้ยากและมีลักษณะเป็นปุยจมน้ำไม่ค่อยดี

2.8 สมดุลมวลในระบบยูเอเอสบี

2.8.1 สมดุลมวลซีไอดี

เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตและไนเตรทเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น จะมีการแข่งขันกันในการใช้สารอาหารระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน(MPB) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต(SRB) และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง(DNB) ดังนั้นในการวัดว่าแบคทีเรียชนิดใดสามารถใช้สารอาหารได้ในสัดส่วนเท่าใดนั้นสามารถวัดได้จากปริมาณซีไอดีที่ถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียแต่ละชนิด

ซีไอดี คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทั้งที่แบคทีเรียย่อยสลายได้และไม่สามารถย่อยสลายได้ในน้ำเสีย ให้เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยา ดังสมการ



ส่วนสารจำพวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยาแทน ซึ่งปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ซีไอดี คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นต้องอาศัยสารออกซิไดซ์อย่างแรง และต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง

จากหลักการวิเคราะห์ซีโอดีที่ใช้สารออกซิไดซ์อย่างแรงย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นค่าซีโอดีจึงเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำได้แต่การใช้สารออกซิไดซ์ที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูง เช่น ไดโครเมต ทำให้สารให้อิเล็กตรอนอื่นในระบบที่ไม่เป็นสารอินทรีย์ที่ให้อิเล็กตรอนกับไดโครเมตและเปลี่ยนไปเป็นอีกรูปหนึ่ง เช่น ซัลไฟด์ออกไซด์ออกซิไดซ์โดยไดโครเมตเป็นซัลเฟต เป็นต้น ดังนั้นการวัดซีโอดีจึงไม่ได้เป็นการวัดสารอินทรีย์ในน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการวัดปริมาณสารให้อิเล็กตรอนในน้ำทั้งหมด ดังนั้นต้องพยายามกำจัดสารให้อิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ในน้ำก่อนการวัดค่าซีโอดี

สมมูลมวลของซีโอดีก่อนและหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถพิจารณาได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\% \text{COD recovery} = [(\text{soluble COD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD} + \text{soluble CH}_4 - \text{COD} + \Delta \text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta \text{NO}_3^- - \text{COD}) / \text{COD}_{\text{in}}] \times 100$$

เมื่อ	COD_{in}	=	ซีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ
	$\text{soluble COD}_{\text{eff}}$	=	ซีโอดีทั้งหมดหลังออกระบบ
	$\text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD}$	=	ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน
	$\text{soluble CH}_4 - \text{COD}$	=	ซีโอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ
	$\Delta \text{SO}_4^{2-} - \text{COD}$	=	ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน
	$\Delta \text{NO}_3^- - \text{COD}$	=	ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

โดยซีโอดีในรูปก๊าซมีเทนหาได้จาก

$$\text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD} = (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 / 24.86) \times 16 \times 4/Q$$

เมื่อ	$\text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD}$	=	ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	Total gas volume	=	ปริมาณก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตรต่อวัน)
	$\% \text{CH}_4$	=	ร้อยละของมีเทน
	24.86	=	ปริมาณก๊าซ 1 โมล ที่ 30°C (ลิตร) (ปริมาณก๊าซ 1 โมล ที่ 0°C เท่ากับ 22.4 ลิตร)
	Q	=	อัตราการไหลของน้ำเสียต่อวัน (ลิตรต่อวัน)
	16	=	น้ำหนักของมีเทน 1 โมล (กรัม)
	4	=	ซีโอดีของก๊าซมีเทน 1 กรัม (กรัม)

โดยซีไอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ ในน้ำออกระบบหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{soluble CH}_4 - \text{COD} &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \\ \text{เมื่อ } K_{\text{hCH}_4} &= \text{ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซมีเทนที่ } 30^\circ\text{C} \\ & \quad (\text{โมลต่อลิตร เท่ากับ } 12.40 \times 10^{-4}) \\ \text{Partial Pressure of CH}_4 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)} \\ \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (\text{ซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี } 2/3 \text{ มิลลิกรัม}) \\ \Delta\text{NO}_3 - \text{COD} &= (\text{ไนเตรทเข้า} - \text{ไนเตรทออก}) \times 2/3.1 \\ &= (\text{ไนเตรทที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี } 2/3.1 \text{ มิลลิกรัม}) \end{aligned}$$

นอกจากนี้ สมดุลมวลของซีไอดีที่สร้างขึ้นมายังทำให้สัดส่วนซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย เรียกว่าเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน หาได้จากสมการ

$$\% \text{ electron flow MPB} = [(\text{CH}_4 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100$$

$$\% \text{ electron flow SRB} = [(\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100$$

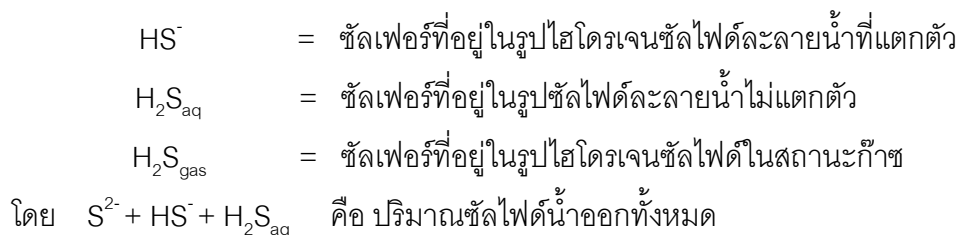
$$\% \text{ electron flow DNB} = [(\Delta\text{NO}_3 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100$$

จากเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน เราสามารถเปรียบเทียบการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียได้ เพื่อแสดงให้เห็นว่าถ้าแบคทีเรียตัวใดมีเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนมากกว่าจะเป็นแบคทีเรียที่มีความโดดเด่น (Predominate) มากกว่าในระบบนั้น

2.8.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์

เมื่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏจักรก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS^- และ S^{2-} ในวัฏจักรของเหลว รวมถึงซัลไฟด์ที่ตกตะกอนผลึกกับโลหะหนักเป็นตะกอนผลึกของโลหะซัลไฟด์ โดยสมภาวะสมดุลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของเฮนรี โดยสมดุลมวลของซัลเฟอร์ในระบบหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \% \text{sulfur recovery} &= [(\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}) / \text{SO}_4^{2-} \text{ in}] \times 100 \\ \text{เมื่อ } \text{SO}_4^{2-} \text{ in} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเข้า} \\ \text{SO}_4^{2-} \text{ eff} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่ในน้ำออก} \\ \text{S}^{2-} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์อิสระ} \end{aligned}$$



2.8.3 สมดุลมวลของไนโตรเจน

เมื่อแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนโตรเจน สมดุลมวลของไนโตรเจนในระบบหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \% \text{nitrogen recovery} &= [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_2) / \text{NO}_3^- \text{ in}] \times 100 \\ \text{เมื่อ } \text{NO}_3^- \text{ in} &= \text{ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำเข้า} \\ \text{NO}_3^- \text{ eff} &= \text{ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำออก} \\ \text{N}_{2\text{gas}} &= \text{ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน} \\ \text{soluble N}_2 &= \text{ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำโดยไนโตรเจน} \end{aligned}$$

ในรูปก๊าซไนโตรเจนหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \text{N}_{2\text{gas}} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{N}_2 / 24.86) \times 28 \times 124 / 28 / Q \\ \text{Total gas volume} &= \text{ปริมาณก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตรต่อวัน)} \\ \% \text{N}_2 &= \text{ร้อยละของไนโตรเจน} \\ 24.86 &= \text{ปริมาณก๊าซ 1 โมล ที่ } 30^\circ\text{C (ลิตร) (ปริมาณก๊าซ 1 โมล} \\ &\text{ที่ } 0^\circ\text{C เท่ากับ 22.4 ลิตร)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= \text{อัตราการไหลของน้ำเสียต่อวัน (ลิตรต่อวัน)} \\ \text{โดยไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \text{soluble N}_2 &= K_{\text{HN}_2} \times \text{Partial pressure of N}_2 \times 28,000 \times 124 / 28 \\ K_{\text{HN}_2} &= \text{ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซไนโตรเจนที่ } 30^\circ\text{C (โมลต่อลิตร)} \\ &\text{เท่ากับ } 6.03 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Partial pressure of N}_2 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซไนโตรเจน (สัดส่วนก๊าซ} \\ &\text{ไนโตรเจน)} \end{aligned}$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 ศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทและซัลเฟตในระบบยูเอเอสบี

อนุตร เปียงแก้ว (2542) ศึกษาการควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอน ใช้น้ำตาลทรายและอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน กำหนดความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดีคงที่ตลอดการทดลองคือ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 12, 6 และ 0.6 ตามลำดับ

พบว่าเมื่อใช้น้ำตาลทรายที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6, 6 และ 12 ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าเท่ากับ 66, 87, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อใช้อะซิเตทเท่ากับ 72, 82 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตมีค่ามากกว่า 6 การเกิดซัลเฟตรีดักชันจะเกิดได้เต็มที่ เนื่องจากมีซีไอดีอยู่ในระบบมากเกินไปพอขณะที่มีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด ซัลเฟตในระบบจึงถูกรีดิวซ์เกือบทั้งหมด ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าลดลง เนื่องจากในระบบมีซัลเฟตอยู่มากเกินไปพอ ในขณะที่มีซีไอดีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นความเข้มข้นของซีไอดีจึงเป็นตัวควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน และการใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าลดลงเมื่อเทียบการใช้น้ำตาลทราย

อุรษา เศรษฐวิริกิจ (2542) ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตที่มีต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีจำนวน 3 ถัง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นระบบ ใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตที่ทำการทดลอง คือ 4 และ 2 โดยใช้ความเข้มข้นซีไอดี 5 ค่า คือ 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการเกิดซัลเฟตรีดักชันสูงถึง 92.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเข้มข้นของซีไอดี 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 2 ประสิทธิภาพการเกิดซัลเฟตรีดักชันสูงเท่ากันถึง 95.1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเข้มข้นซีไอดี 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆ การทดลอง โดยค่าเฉลี่ยสัดส่วนการใช้อีไอดีระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 82.0 เปอร์เซ็นต์ MPB/ 18.0 เปอร์เซ็นต์ SRB และ 62.9 เปอร์เซ็นต์ MPB/37.1 เปอร์เซ็นต์ SRB ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4 และ 2 ตามลำดับ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเพิ่มขึ้น

Yamaguchi และคณะ (1999) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง ใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 2 ถัง ถังแรกมีปริมาณซัลเฟตสูง (ซีไอดี 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลเฟต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถังที่สองมีปริมาณซัลเฟตต่ำ (2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและซัลเฟต 33 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าในถังแรก(ปริมาณซัลเฟตสูง) กำจัดซีไอดีและซัลเฟตได้ 70 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2-3 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนการผลิตมีเทนถูกระงับในระหว่าง 50 วันแรกและปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพลดต่ำลงจนเป็นศูนย์จนกระทั่งวันที่ 234 สมรรถนะในการกำจัดซีไอดีเหลือเพียงแค่ 33.7 และ 12.6 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากการสะสมของซัลไฟด์ที่ 229 และ 114 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวเท่ากับ 107 และ 69 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทดลองโดยทำการติดตั้ง sulfide-stripping เข้าไปในปฏิกรณ์ หลังจากนั้นการกำจัดซีไอดีจึงเพิ่มขึ้นเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณซัลไฟด์ สำหรับถังที่สอง(ปริมาณซัลเฟตต่ำ) กำจัดซีไอดีได้ 80-90 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นผลมาจากการระบวมการสร้างมีเทนเท่านั้น จึงสรุปได้ว่าการกำจัดซีไอดีในน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมีเทน แต่จะถูกดำเนินการโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น และปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงคือ ปริมาณของซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในถังปฏิกรณ์ จึงควรรักษาระดับของซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในถังปฏิกรณ์ให้มีค่าต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้สมรรถนะการกำจัดซีไอดีเป็นที่น่าพอใจ เพราะว่าการกักเก็บของทั้ง MPB และ SRB จะลดลงเมื่อ ปริมาณของซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น

Lens และคณะ (2001) ศึกษาผลกระทบของความเร็วไหลขึ้นต่อแบคทีเรียสร้างกรดและการลดลงของซัลเฟตที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีใช้ความเร็วไหลขึ้น 1.0 เมตรต่อชั่วโมง และถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี (EGSB) ใช้ความเร็วไหลขึ้น 6.8 เมตรต่อชั่วโมง ใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย แป่งน้ำตาล แลคเตต ไพโรไฟโอเนต และอะซิเตต อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10 ผลการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีขาดแบคทีเรียสร้างมีเทนโดยใช้กรดอะซิเตต ซึ่งเห็นได้จากการที่มีการสะสมของอะซิติกที่ถูกผลิตขึ้นในระบบ สัดส่วนของก๊าซมีเทนในระบบต่ำและไม่พบแอกติวิตี้จากการทดสอบแอกติวิตี้ของแบคทีเรียโดยใช้อะซิติก ส่วนถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี พบว่า ในระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนจากอะซิติก เห็นได้จากการทดสอบแอกติวิตี้โดยใช้อะซิเตตซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.59 กรัมซีไอดีต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน ในด้านการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ (น้อยกว่า 3 ลิตรต่อวัน) และประสิทธิภาพการไล่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S stripping) น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปฏิกรณ์อีจีเอสบีมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 8.5 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการไล่ไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

จันทิมา สกุลพานิชย์ (2548) ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสพีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูง ใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีจำนวน 3 ถัง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ช่วงแรกของการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ช่วงที่สองใช้น้ำเสียโรงงานสแตนเลส แต่ละช่วงเติมแคลเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อแคลเซียมเท่ากับ 10:0.85, 10:1.70 และ 10:3.40 โดยใช้ความเข้มข้นซีโอดีซัลเฟตและไนเตรทเท่ากับ 600, 90 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาทั้งสองช่วงพบว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อแคลเซียมเท่ากับ 10:1.70 ระบบยูเอเอสพีมีประสิทธิภาพดีที่สุดทั้งในด้านการบำบัดน้ำเสียและขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยที่อัตราส่วนนี้สามารถพบเม็ดตะกอนขนาดใหญ่มากกว่า 1,200 ไมครอนสูงถึง 60.38 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่พบในตอนเริ่มต้นระบบและเมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนร่วมกับเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงมีค่าเท่ากับ 63.81, 22.41 และ 13.78 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นสายพันธุ์หลักที่พบในเม็ดตะกอน

ปริญา รัตนา (2549) ศึกษาเพื่อหาผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีผลต่อปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีจำนวน 3 ถัง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ช่วงแรกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 และความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากันทั้ง 3 ถัง ช่วงที่สองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสแตนเลส กำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10:1, 15:1 และ 20:1 และความเข้มข้นของซัลเฟตและไนเตรท 90 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาทั้งสองช่วงพบว่า อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่ 5:1 และ 15:1 เป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9.2 ศึกษากระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี

Teo, Xu, และ Tay (2000) ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อยืนยันทฤษฎีที่เสนอโดย Tay และคณะ พบว่า ความสามารถในการเปลี่ยนถ่ายโปรตอน (Proton Translocating Activity) บนผิวของแบคทีเรียเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Yu และคณะ (2000) ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงการเริ่มต้น (Start up) ของระบบยูเอเอสบีด้วยการเติมแคลเซียม พบว่า การเติมแคลเซียมที่ความเข้มข้น 150-300 มิลลิกรัมต่อลิตร จะช่วยเพิ่มมวลชีวภาพและความสามารถในการสร้างเม็ดตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบได้ดี

Chiu-Yue Lin และคณะ (2001) ศึกษาผลความเป็นพิษของสารประกอบซัลเฟออร์ที่มีต่อเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าระดับความเป็นพิษของสารประกอบซัลเฟออร์มีความไม่แน่นอน ดังนี้ $SO_4^{2-} > S^{2-} > SO_3^{2-}$ แต่บางครั้งจะเป็น $SO_4^{2-} > SO_3^{2-} > S^{2-}$ แต่โดยรวมแล้วประสิทธิภาพของเม็ดตะกอนในระบบจะลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อในระบบมี S^{2-} 34 มิลลิกรัมต่อลิตร, SO_3^{2-} 26 มิลลิกรัมต่อลิตร และ SO_4^{2-} 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

Yu และคณะ (2001) ศึกษาผลการเติม $AlCl_3$ ในปริมาณที่แตกต่างกันลงในระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี เติมน้ำในระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 146 วัน ถึงแรก ไม่เติม $AlCl_3$ ดังที่สอง เติม $AlCl_3$ ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การเติม $AlCl_3$ จะช่วยในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในช่วง 35-65 วัน และพบว่าเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าการเติม $AlCl_3$ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบีได้

Sharma และ Singh (2001) ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารรอง (Trace Nutrients) ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าการเติมเหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ช่วยให้เกิดเม็ดตะกอนได้ดีขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้การเกิดเม็ดตะกอนแย่ง

ชลธิชา น้ำดอกไม้ (2545) ศึกษาการใช้ตะกอนเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 32 แหล่ง คือ จากตะกอนแอกติเวทเต็ดสลัดจ์และจากถังย่อยสลัดจ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการสร้างเม็ดตะกอนในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าตะกอนที่มาจากแอกติเวทเต็ดสลัดจ์ มีการรวมตัวกับเป็นเม็ดได้เร็วกว่าตะกอนสลัดจ์จากถังย่อยสลัดจ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยถึงยูเอเอสบีที่ 1 ตะกอนแอกติเวทเต็ดสลัดจ์ใช้ระยะเวลาการเกิดเม็ดตะกอนนาน 31 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 91 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนเม็ดส่วนใหญ่ 40 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดใหญ่กว่า 0.425 มิลลิเมตร ความเร็วในการจมตัว 16-47 เมตรต่อชั่วโมง ถึงยูเอเอสบีที่ 2 ถึงย่อย

สลัดจ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ใช้ระยะเวลาการเกิดเม็ดตะกอนนาน 66 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 89 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนเม็ดส่วนใหญ่ 53 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดใหญ่กว่า 0.425 มิลลิเมตร

Hyun Seong Jeong และคณะ (2003) ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของโพลีเมอร์ด้วยระบบยูเอเอสบี พบว่า การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อสร้างเม็ดตะกอนนั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ต้องใช้ระยะเวลานานถึง 6 เดือน จึงเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์จำนวน 5 มิลลิกรัมเป็นหัวเชื้อสำหรับการเพิ่มปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดตั้งแต่ 1-5 มิลลิเมตรและสามารถตกตะกอนได้เร็วกว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียทั่วไปมากเพราะว่าในระบบยูเอเอสบี เม็ดตะกอนจุลินทรีย์สามารถเกิดได้สูงสุดถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 18 กิโลกรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน

Show, Wang, Foong และ Tay (2004) ศึกษาการลดระยะเวลาช่วง Start-up ระบบและการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี โดยเติมโพลีเมอร์ประจุลบชนิดแคตไอออนในช่วง Start-up กำหนดให้ถังที่ 1 ไม่เติมโพลีเมอร์ ส่วนถังที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 เติมโพลีเมอร์ปริมาณ 20, 40, 80, 160 และ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่า ถังที่ 4 เติมโพลีเมอร์เข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน สามารถลดระยะเวลาช่วง Start-up ระบบได้ดี 43 เปอร์เซ็นต์และยังบำบัดน้ำเสียได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของถังที่ 1 ที่ไม่มีการเติมโพลีเมอร์อีกด้วย นอกจากนี้ยังเพิ่มค่าการระบรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 40 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน หลังจากเดินระบบไปแล้ว 59 วัน ส่วนถังที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 เพิ่มค่าการระบรทุกสารอินทรีย์ได้ในวันที่ 104, 80, 69, 63 และ 69 วัน ตามลำดับ ส่วนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณโพลีเมอร์ที่เติมในระบบ โดยถังที่ 4 ที่เติมโพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร มีโครงสร้างเม็ดตะกอนและการเพิ่มจำนวนมากที่สุด และเป็นจุลินทรีย์จำพวก Methanogenic เป็นส่วนใหญ่

Hulshoff Pol และ Lettinga (2004) ศึกษากระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี พบว่าแรกเริ่มของการสร้างเม็ดตะกอนเกิดจากการรวมตัวของแบคทีเรียที่มีหน้าที่สร้างเยื่อหุ้มเซลล์และกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้าๆอย่างเห็นได้ชัดเจนและยังพบว่าแบคทีเรียจำพวก *Methanosaeta concillii* ยังเป็นตัวช่วยในการสร้างเม็ดตะกอนอีกด้วย นอกจากนั้น Cape Town Hypothesis ยังพบว่าในพื้นที่เขตร้อนมีแบคทีเรียจำพวก *Methanobacterium* สามารถเจริญได้ดีในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนสูงและยังเพิ่มจำนวนมากขึ้นซึ่งเป็นการคัดเลือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียชนิดนี้ในระบบยูเอเอสบีด้วย

สุรภี เบญจปัญญาวงศ์ (2549) ศึกษาการเติมโพลีเมอร์ที่มีต่อเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ในระบบบยูเอเอสบีเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ผลการทดลองพบว่า โพลีเมอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกรัมเอสเอส จะลดเวลาในการเกิดเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ลงและเพิ่มจำนวนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น โดยการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดีระหว่างถังที่ไม่เติมโพลีเมอร์ พบว่าประสิทธิภาพเท่ากับ 93.40 เปอร์เซ็นต์และถังที่เติม โพลีเมอร์ประสิทธิภาพเท่ากับ 94.41 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสูงขึ้นอีกด้วย

ธงชัย มหัจฉริยวงศ์ (2549) ศึกษาการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างเม็ดตะกอน ในระบบบยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าการเติมโพลีเมอร์เพื่อช่วยในการ สร้างเม็ดตะกอนสำหรับระบบบยูเอเอสบีทำให้เม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และควรเติมโพลีเมอร์ เพียงสัปดาห์ละครั้งจะทำให้ระบบเสถียรและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยติดตั้งถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีเหมือนกันจำนวน 3 ชุด เตินระบบต่อเนื่องบริเวณริมสระเปียงชั้น 17 อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

3.1.1 ช่วงการทดลองที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบ เป็นระยะเวลา 105 วัน

3.1.1.1 ตัวแปรควบคุม ได้แก่

- อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน
- ระยะเวลาที่น้ำ 4 ชั่วโมง
- ความเร็วการไหลขึ้นของน้ำในระบบ 0.5 เมตรต่อชั่วโมง
- ความเข้มข้นไนเตรทของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.1.2 ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่เติมลงในแต่ละถังปฏิกรณ์ ได้แก่
ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน
ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า

- ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 600,1200,1800 และ 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1

3.1.1.3 ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา ได้แก่

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สภาพ่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย ซีโอดี ไนเตรท ซัลเฟต ซัลไฟด์ ของแข็งแขวนลอย ปริมาณก๊าซทั้งหมด สัดส่วนของก๊าซ ขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

3.1.2 **ช่วงการทดลองที่ 2** ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบ เป็นระยะเวลา 30 วัน
ดำเนินการทดลองต่อจากช่วงที่ 1

3.1.2.1 ตัวแปรควบคุม ได้แก่

- อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน
- ระยะเวลาที่น้ำ 4 ชั่วโมง
- ความเร็วการไหลขึ้นของน้ำในระบบ 0.5 เมตรต่อชั่วโมง
- แหล่งคาร์บอนที่เติมลงใน 3 ถังปฏิกรณ์ ได้แก่ กากแป้งข้าวเจ้า
- ความเข้มข้นไนเตรทของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.2.2 ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเข้าระบบ

ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 เท่ากับ 180 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราภาวะ
บรรทุกซัลเฟต 1.08 กรัมต่อลิตรต่อวัน

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 เท่ากับ 270 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราภาวะ
บรรทุกซัลเฟต 1.62 กรัมต่อลิตรต่อวัน

ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 เท่ากับ 360 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราภาวะ
บรรทุกซัลเฟต 2.16 กรัมต่อลิตรต่อวัน

- ความเข้มข้นซีโอดีถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20:1 ทุกถังปฏิกรณ์

3.1.2.3 ตัวแปรตามที่ทำการศึกษา เช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ขั้น ตอน	การดำเนินการทดลอง	พ.ศ.2552								
		มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1	เริ่มเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ เพื่อปรับให้คุ้นเคยกับน้ำเสีย	←————→								
2	ช่วงการทดลองที่ 1 - ศึกษาผลของแหล่งคาร์บอน 3 แหล่งที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ต่างๆ	←————→								
3	ช่วงการทดลองที่ 2 - ศึกษาผลการบำบัดซัลเฟตที่อัตรา ภาวะบรรทุกซัลเฟตต่างๆ	←————→								

3.2 การเตรียมน้ำเสีย

3.2.1 วิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ กำหนดความเข้มข้นไนเตรทและซัลเฟตให้ได้เท่ากับ 60 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ, ความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นจาก 600, 1,200, 1,800 และ 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และกำหนดแหล่งคาร์บอนที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองให้แตกต่างกัน ได้แก่ ถึงปฏิกิริยาที่ 1 น้ำตาลทราย ถึงปฏิกิริยาที่ 2 แป้งมัน ถึงปฏิกิริยาที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะทำการเตรียมสัปดาห์ละ 2 ครั้ง โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจะถูกเก็บไว้ในถังเตรียมน้ำเสียก่อนที่จะนำไปเติมลงในระบบและเมื่อน้ำเสียในถังพัก ก่อนเข้าระบบหมดก็จะนำถังพักมาล้างทำความสะอาดก่อนแล้วจึงเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้ลงไป เพื่อป้องกันปัญหาการหมักที่อาจเกิดขึ้นได้ในถังพักน้ำเสียและการอุดตันของอุปกรณ์ในการเดินระบบต่างๆ

นอกจากนี้แล้วน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจำเป็นต้องเติมธาตุอาหารอื่นลงไปลงในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย อีกทั้งยังต้องเติมบัฟเฟอร์ให้กับระบบเพื่อเป็นการรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นซีไอดี 600 มิลลิกรัมต่อลิตร (Speece, 1996; Yu และคณะ, 2001; จันทิมา, 2548)

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
		<u>Trace Components</u>	
1. COD	600	8. ZnCl ₂	0.5
2. (NH ₂) ₂ CO = N	51	9. MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.5
3. KH ₂ PO ₄ = P	13	10. NH ₄ VO ₃	0.5
4. Na ₂ SO ₄ = SO ₄ ²⁻	104	11. Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.5
5. KNO ₃ = NO ₃ ⁻	98	12. AlCl ₃ ·6H ₂ O	0.5
6. NaHCO ₃	300	13. NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.5
7. MgSO ₄ ·7H ₂ O = SO ₄ ²⁻	40	14. CoCl ₂ ·6H ₂ O	10
		15. KI	10

3.2.2 ลักษณะของน้ำเสียตลอดการทดลอง

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบจะต้องทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียเข้าระบบ แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ช่วงการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด
พีเอช	6.59 – 8.10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.3 – 29.0
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	220 – 550
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	20 – 105
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.80 – 108.00
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	504 – 2,624
ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	52.04 – 65.69
ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	82.48 – 98.26
ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.4 - 8.0

ตารางที่ 3.4 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ช่วงการทดลองที่ 2

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด
พีเอช	7.01 – 7.58
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	23.9 – 29.2
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	215 – 335
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	23 – 65
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	187.70 – 284.90
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,511 – 7,392
ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	54.62 – 64.32
ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	172.80 – 368.40
ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.2 – 4.0

3.3 ลักษณะและคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอน

ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอนที่จะนำมาใช้ในระบบสำหรับใช้คำนวณค่าซีไอดีและศึกษาคุณสมบัติในการละลายน้ำเพื่อการเตรียมน้ำเสียเข้าระบบ

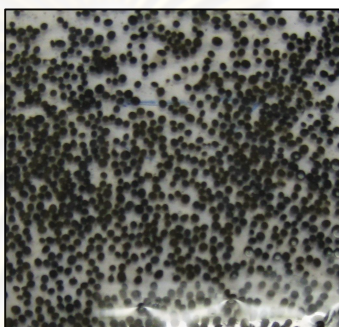
ตารางที่ 3.5 ลักษณะและคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอน	ซีไอดี (กรัมซีไอดี/กรัม)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	คุณสมบัติของแหล่งคาร์บอน
1.น้ำตาลทราย (Sucrose) สูตรโมเลกุล $C_{12}H_{22}O_{11}$	1.10	23.50	มีลักษณะเป็นผลึก ของแข็ง สีขาว ละลายน้ำได้ดี 
2.แป้งมัน ลำปะหลัง (Tapioca Flour) สูตรโมเลกุล $(C_6H_{10}O_5)_n$	0.83	14	มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว เนื้อลื่นเป็นมัน ละลายน้ำได้ดี 
3.กากแป้งข้าว เจ้า (Waste Rice- Flour) สูตรโมเลกุล $(C_6H_{10}O_5)_n$	1.25	เป็นเศษเหลือจาก กระบวนการผลิต โรงงานแป้ง	มีลักษณะเป็นผง สีเหลือง เนื้อค่อนข้างหยาบ ละลายน้ำได้ ปานกลาง 

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การเริ่มต้นการทดลองจะใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมือนกันจำนวน 3 ชุดและทำการทดลองภายในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

3.4.1 ตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) ที่ใช้ในการทดลองเป็น Anaerobic Sludge จากระบบยูเอเอสพีของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นหมี่ขอเฮง ลักษณะเป็นเม็ดสีดำ ขนาดประมาณ 0.5 - 1 มิลลิเมตร คัดเม็ดตะกอนที่มีขนาดใกล้เคียงกันและสามารถตกตะกอนได้ดี เพื่อใช้เริ่มต้นการทดลอง



ภาพที่ 3.1 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

3.4.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ได้แก่ ลักษณะตะกอน ขนาดและโครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ค่าอัตราเร็วการจมตัวของเม็ดตะกอนโดยใช้กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร จับเวลาการจมตัว พบว่าได้ค่าอัตราเร็วการจมตัวเท่ากับ 3.57 มิลลิลิตรต่อวินาที



ภาพที่ 3.2 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

3.4.3 การเริ่มต้นระบบ (Start up) ทำโดยปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำเสียก่อน จากนั้นเติมตะกอนจุลินทรีย์ที่คัดได้ลงในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีทั้ง 3 ชุด หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหย (MLVSS) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 66.16 กรัมเอ็มแอลวีเอสเอสต่อลิตร

3.4.4 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมแหล่งคาร์บอน (ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า) ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (COD:N:P เท่ากับ 100:2:0.5) เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มป้อนจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีต่ำๆ ก่อน แล้วจึงค่อยเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีอัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

3.4.5 ทำการปรับสภาพเม็ดตะกอนให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีซัลเฟต และไนเตรท โดยค่อยๆเพิ่มความเข้มข้นให้มีความเข้มข้นซัลเฟตและไนเตรทเท่ากับ 90 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนซัลเฟตต่อไนเตรท เท่ากับ 1.5:1 การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง

ช่วงการทดลองที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบ เป็นระยะเวลา 105 วัน

ช่วงการทดลองที่ 2 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบ เป็นระยะเวลา 30 วัน

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

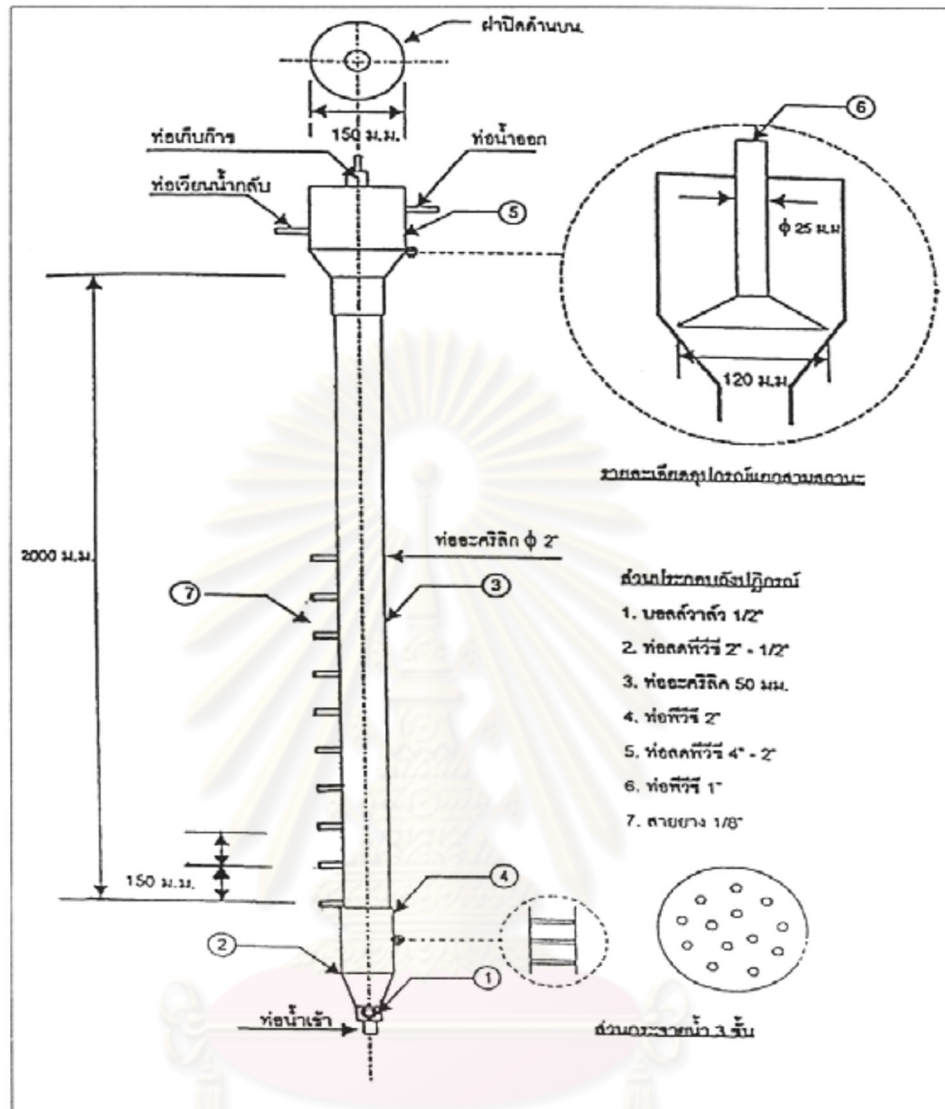
3.5.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

ใช้แบบจำลองระบบยูเอเอสบีในระดับห้องปฏิบัติการ ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 1 ชุด ประกอบด้วย

3.5.1.1 ส่วนย่อยสลาย ทำจากท่ออะคริลิกใส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ปริมาตร 4 ลิตร

3.5.1.2 ส่วนตกตะกอน ทำจากท่อพีวีซี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 0.20 เมตร

3.5.1.3 ส่วนอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator; GSS) อยู่ในส่วนตกตะกอนทำจากกรวยพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลางของปากกรวยเท่ากับ 8 เซนติเมตร และมีวาล์วเก็บตัวอย่างตะกอนด้านข้างถังปฏิกรณ์ตามความสูงของถัง จำนวน 10 ตำแหน่ง รายละเอียดแบบจำลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีในห้องปฏิบัติการ

3.5.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ

ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 1 ชุด ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำ 1 ตัว สำหรับสูบน้ำเสียเข้าระบบ เครื่องสูบน้ำที่ใช้เป็นแบบ Solenoid Pump ยี่ห้อ Prominent Solenoid Metering Pumps รุ่น 987057 ทำการสูบน้ำเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง

3.5.3 ถังพักน้ำเสีย

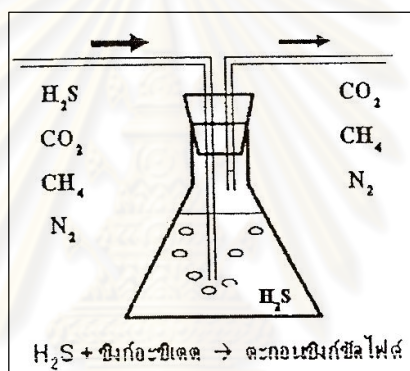
ถังเตรียมน้ำเสียเข้าระบบจะใช้ถังพลาสติก ขนาดความจุ 50 ลิตร จำนวน 3 ถัง

ถังพักน้ำทิ้งออกจากระบบใช้ถังพลาสติก ขนาดความจุ 50 ลิตร จำนวน 3 ถัง

การเตรียมน้ำเสียเข้าระบบจะใช้ถังพลาสติก ขนาดความจุ 50 ลิตร จำนวน 3 ถัง

3.5.4 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสปี 1 ชุด ประกอบด้วยชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวน 1 ชุด การดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อาศัยสารละลายซิงก์อะซิเตตจับกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยชุดดักก๊าซประกอบด้วย ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร บรรจุด้วยสารละลายซิงก์อะซิเตตที่มีพีเอชต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปากขวดปิดด้วยจุกยางสีดำเจาะรูสองรู สอดท่อแก้วนำก๊าซ 2 ท่อเป็นท่อเข้าและท่อออก ปลายท่อเข้าต่อกับส่วนดักก๊าซของถังปฏิกรณ์และจุ่มอยู่ใต้สารละลายซิงก์อะซิเตต ก๊าซจากถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านเข้าสู่ส่วนของชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซิงก์อะซิเตตเกิดเป็นตะกอนของซิงก์ซัลไฟด์ ก๊าซที่เหลือผ่านสารละลายซิงก์อะซิเตตมาได้จะไหลผ่านท่อแก้วนำก๊าซออกไปเก็บไว้ในอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองหลักการดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

3.5.5 อุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพ

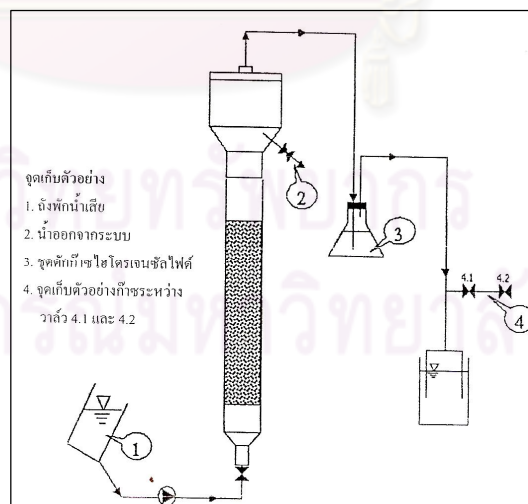
ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสปี 1 ชุด ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดก๊าซจำนวน 1 ชุด ทำงานโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ โดยมีระบบกแทนที่น้ำบรรจุน้ำเต็มหลอด ทำการปรับพีเอชของน้ำให้ต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งระบบกแทนที่น้ำจะต่อกับสายยางนำก๊าซที่ออกมาจากชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยก๊าซที่เกิดขึ้นจะไปแทนที่น้ำที่บรรจุอยู่ในระบบกแทนที่น้ำ



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพแบบแทนทีน้ำ

3.6 หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

1. น้ำเสียที่เตรียมขึ้นใหม่ในแต่ละวันออกจากถังพักน้ำเสียโดยถูกสูบเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow)
2. น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี จะไหลออกทางตอนบนของถังปฏิกรณ์เพื่อต่อไปยังถังพักน้ำทิ้ง
3. ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี จะไหลผ่านอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator, GSS) ซึ่งอยู่ทางด้านไปยังชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนทีน้ำ



ภาพที่ 3.6 หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบี



ภาพที่ 3.7 ลักษณะการติดตั้งระบบยูเอเอสบี

3.7 การเดินและการควบคุมระบบ

3.7.1 การเดินระบบ

ระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในงานวิจัย จะมีการป้อนน้ำเสียเข้าระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยตรง ซึ่งการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างโดยตรงนั้นมีข้อเสียที่สำคัญ คือ ในกรณีที่น้ำเสียในถังพักน้ำเสียหมดจะทำให้มีการสูบอากาศเข้าสู่ระบบได้ซึ่งเป็นการนำออกซิเจนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบและอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ดังนั้น จึงต้องหาวิธีป้องกันปัญหาดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นโดยเตรียมน้ำเสียให้มีปริมาณเพียงพอต่อการทำงานของระบบในแต่ละวัน ด้วยการเติมน้ำเสียใหม่ทุกวันให้เพียงพอเพื่อป้องกันน้ำเสียหมดถัง และควรทำการเผื่อระวังไม่ให้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำเสียจนแห้งหมดถังพักน้ำเสีย นอกจากนั้นยังเป็นการป้องกันปัญหาฟิเอซของน้ำเสียเข้าระบบต่ำจนเกินไปซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่ำลงไปด้วย

3.7.2 การควบคุมระบบ

การควบคุมระบบสำหรับงานวิจัย จะทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เป็นไปตามที่กำหนดเอาไว้ในขอบเขตการทดลอง โดยจะทำการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ

อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์, ระยะเวลาเก็บกักน้ำ และระยะเวลาการเก็บกักแบคทีเรีย ซึ่งระบบบำบัดที่ดีควรมีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์, เวลาเก็บกักน้ำ และเวลาเก็บกักแบคทีเรียที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางและแบคทีเรียอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้แบคทีเรียหลุดออกจากถังมากเกินไป ถ้าหากระบบมีอัตราการไหลของน้ำที่มากเกินไป จะทำให้เวลาเก็บกักน้ำสั้นลง แบคทีเรียที่แขวนลอยในถังจะถูกพัดพาออกไปพร้อมกับน้ำออกมากขึ้น ส่งผลให้เวลาการเก็บกักตะกอนลดลง

สำหรับการงานวิจัยนี้กำหนดอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบอยู่ที่ 24 ลิตรต่อวันเท่ากันทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เมื่อเริ่มต้นระบบจะต้องทำการวัดอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำ (Flow Rate) ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ควรสังเกตปริมาณน้ำในถังพักน้ำเสียเข้าระบบทั้งหมดในแต่ละวัน เพื่อช่วยในการประเมินอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำ โดยปกติแล้วเมื่อทำการทดลองไปได้ระยะหนึ่ง อัตราการสูบน้ำเสียของเครื่องสูบน้ำจะลดลง เพราะเกิดเมือกสารอินทรีย์หรือแบคทีเรียเกาะติดด้านในของสายยางที่ใช้

2) สภาพแวดล้อมทางกายภาพ

ปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบ คือ แสงสว่างและอุณหภูมิ เนื่องจากถ้าแสงสว่างสามารถส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้จะทำให้เกิดสาหร่ายสีเขียวขึ้นบริเวณผนังด้านในของถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนลดลง ดังนั้นจึงต้องป้องกันไม่ให้แสงสว่างส่องผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ โดยการใช้อุปกรณ์พลาสติกดำมาคลุมส่วนย่อยสลายของระบบที่ทำจากอะคริลิกใสไว้เพื่อป้องกันแสงส่องผ่านและต้องคลุมในลักษณะที่แกะหรือเปิดออกได้ง่าย เพื่อให้สามารถตรวจลักษณะของแบคทีเรียที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ได้โดยง่าย

การควบคุมอุณหภูมิ จะทำในกรณีที่สภาพอากาศมีอุณหภูมิลดลงกว่าสภาพอากาศปกติทั่วไปซึ่งอุณหภูมิที่ลดต่ำมากจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนแบบมีไซฟิลิค (Mesophilic) โดยมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียสและเนื่องจากสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร โดยทั่วไปแล้วจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนแบบมีไซฟิลิค (Mesophilic) อยู่แล้ว ดังนั้นปัจจัยด้านอุณหภูมิจึงไม่มีผลกระทบมากนัก

3) อุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ

การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบให้ทำงานได้อย่างปกติเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง โดยสิ่งที่จำเป็นต้องทำ ได้แก่ การล้างทำความสะอาดถังพักน้ำเสีย การตรวจสอบไม่ให้เกิดการอุดตันของตะกอนภายในท่อสายยางและหัวปั๊มเครื่องสูบน้ำ การตรวจสอบความเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นกับสายยาง เช่น การเกิดรูรั่ว ซึ่งต้องเปลี่ยนสายยางใหม่ เพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียให้เท่ากับที่กำหนด ตลอดจนตรวจสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ใช้สูบน้ำเสียเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอ

3.8 การเก็บและวิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์วิธีวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่างน้ำ และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่างน้ำและความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ			
		น้ำเข้า	น้ำออก	อุปกรณ์เก็บก๊าซ	วาล์วเก็บตัวอย่างน้ำ
1.พีเอช	pH meter *	A	A	-	-
2.อุณหภูมิ	Thermometer *	A	A	-	-
3.สภาพต่างทั้งหมด	Direct titration Method *	B	B	-	-
4.ซีโอดี	Close reflux *	B	B	-	-
5.ซัลเฟต	IC (Ion Chromatography) *	B	B	-	-
6.ไนเตรท	IC (Ion Chromatography) *	B	B	-	-
7.กรดไขมันระเหย	Direct titration Method *	C	C		
8.ซัลไฟด์	Iodometric Method *	C	C	-	-
9.ของแข็งแขวนลอย	กรองด้วยกระดาษ GF/C *	C	C	-	-
10.ปริมาณก๊าซทั้งหมด	วัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ**	-	-	C	-

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่างน้ำและความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ			
		น้ำ เข้า	น้ำ ออก	อุปกรณ์ เก็บก๊าซ	วาล์วเก็บ ตัวอย่าง น้ำ
11.ความสามารถ จำเพาะของแบคทีเรีย สร้างมีเทน	SMA ** (Specific Methanogenic Activity)	-	-	-	D
12.สัดส่วนของก๊าซ	GC (Gas Chromatography) *	-	-	E	-
13.ขนาดและ โครงสร้างของเม็ด ตะกอน	SEM** (Scanning Electron Microscope)	-	-	-	D
14.การกระจายขนาด ของเม็ดตะกอน	Particle Size **	-	-	-	D

หมายเหตุ : A คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
 B คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
 C คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 1 ครั้ง
 D คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง
 E คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

* คือ APHA (American Public Health Association) (1998) และ ** คือ จันทิมา (2548)

3.9 รายละเอียดการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

พีเอชและอุณหภูมิ ใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ mettler Toledo รุ่น sevenEasy โดยสามารถอ่านค่าได้จากเครื่องโดยตรง

สภาพต่างทั้งหมด ใช้วิธี Direct titration Method โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนและเมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์

ซีโอดี ใช้วิธี Close reflux และ Titration โดยอบในตู้อบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำการไตเตรทโดยใช้เฟอโรซีนเป็นอินดิเคเตอร์

ซัลเฟตและไนเตรท ใช้เครื่องวิเคราะห์ Ion Chromatography ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 830 IC Liquid Handling Unit

กรดไขมันระเหย ใช้วิธี Direct titration Method

ซัลไฟด์ ใช้วิธี Iodometric Method

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ใช้ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ของแข็งแขวนลอย ใช้วิธี Gravimetric โดยกรองด้วยกระดาษ GF/C (Glass-Fiber Filter) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

ปริมาณก๊าซทั้งหมดและสัดส่วนก๊าซ วัดปริมาณก๊าซโดยใช้หลักการแทนที่น้ำและเก็บตัวอย่างก๊าซไปทำการวิเคราะห์สัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Gas Chromatography (GC)

ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (SMA) เพื่อศึกษาความสามารถของแบคทีเรียสร้างมีเทนในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน (รายละเอียดในภาคผนวก ง)

ขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอน ใช้วิธี Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษาโครงสร้างภายนอกและภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การกระจายขนาดของเม็ดตะกอน ใช้วิธี Particle Size Analyzer เพื่อศึกษาขนาดและปริมาณในแต่ละช่วงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง

4.1.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการเติมแหล่งคาร์บอน ได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ในเตรท และซัลเฟตและการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างซีไอดีต่อซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1 กำหนดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 กำหนดการทดลองช่วงที่ 1

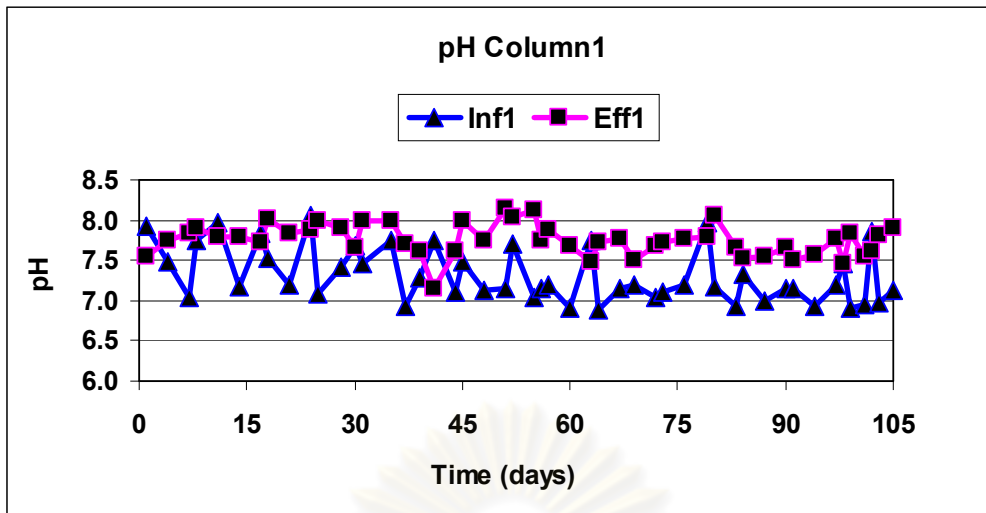
ถังปฏิกรณ์ (Column)	แหล่งคาร์บอน	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ช่วงที่ 4
				6.7:1	13.3:1	20.0:1	26.7:1
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
1	น้ำตาลทราย	60	90	600	1,200	1,800	2,400
2	แป้งมัน	60	90	600	1,200	1,800	2,400
3	กากแป้งข้าวเจ้า	60	90	600	1,200	1,800	2,400

ทำการทดลองทั้งหมด 105 วัน จนระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถจำแนกพารามิเตอร์ต่างๆที่ทำการวิเคราะห์ ดังนี้

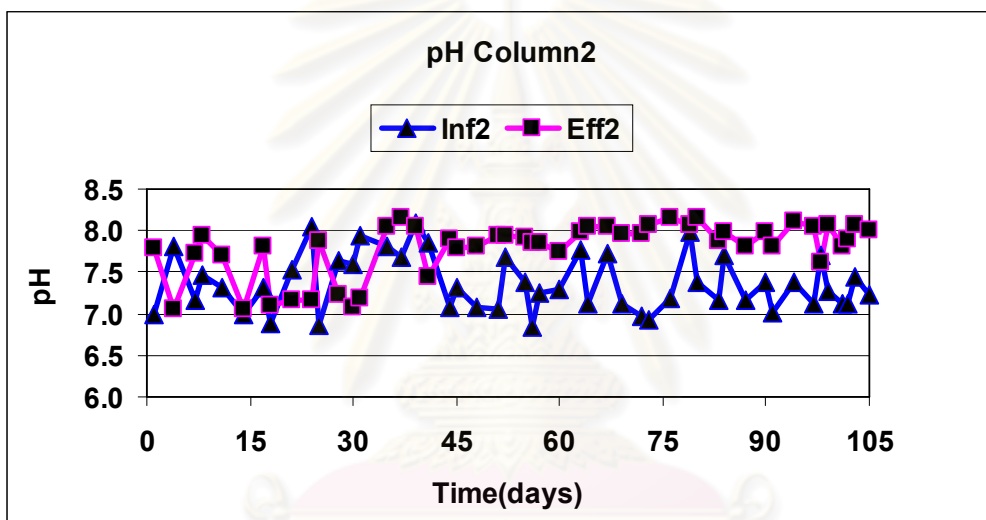
1) พารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของระบบ ได้แก่ พีเอช (pH) อุณหภูมิ (Temperature) สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity) กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) ซัลไฟด์ (Sulfide)

4.1.1.1 พีเอช (pH)

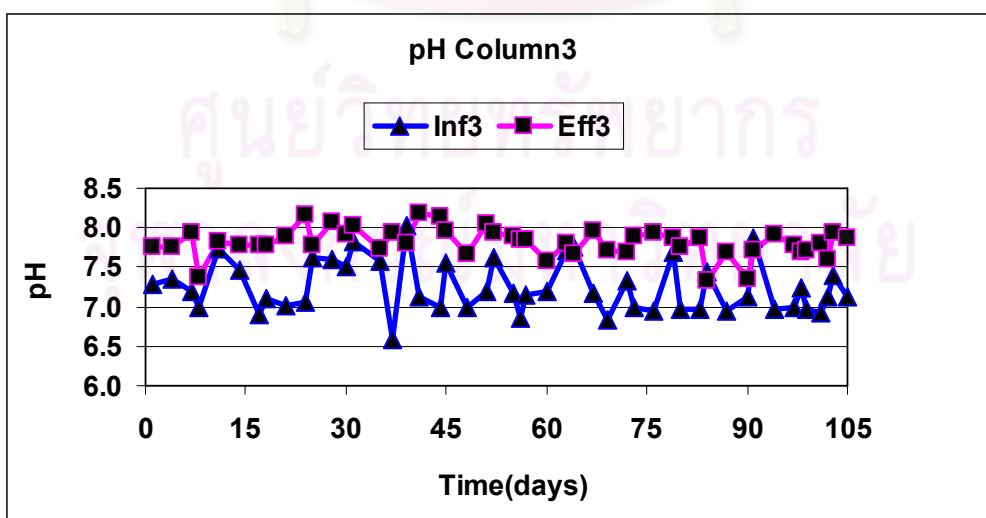
พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอน ได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ มีค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.32, 7.37 และ 7.25 ตามลำดับ ส่วนพีเอชของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.75, 7.79 และ 7.82 ตามลำดับ ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.1



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

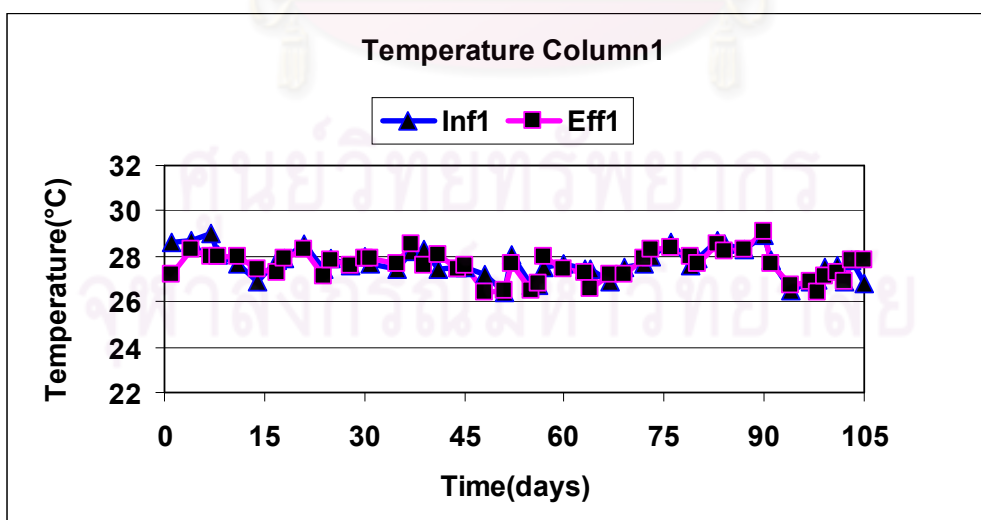
ภาพที่ 4.1 ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 1

พีเอชเป็นปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบ จากภาพที่ 4.1 พีเอชเฉลี่ยของน้ำออกระบบทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบ เนื่องจากการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) จะมีการนำไฮโดรเจนไอออน (H^+) ไปใช้ และการเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะทำให้ระบบมีสภาพความเป็นกรดลดลง จึงทำให้พีเอชในระบบสูงขึ้นได้ โดยพีเอชที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 6.8 - 8.2 ถ้าพีเอชลดต่ำลงอย่างรวดเร็วจะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) จะสามารถปรับตัวได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ

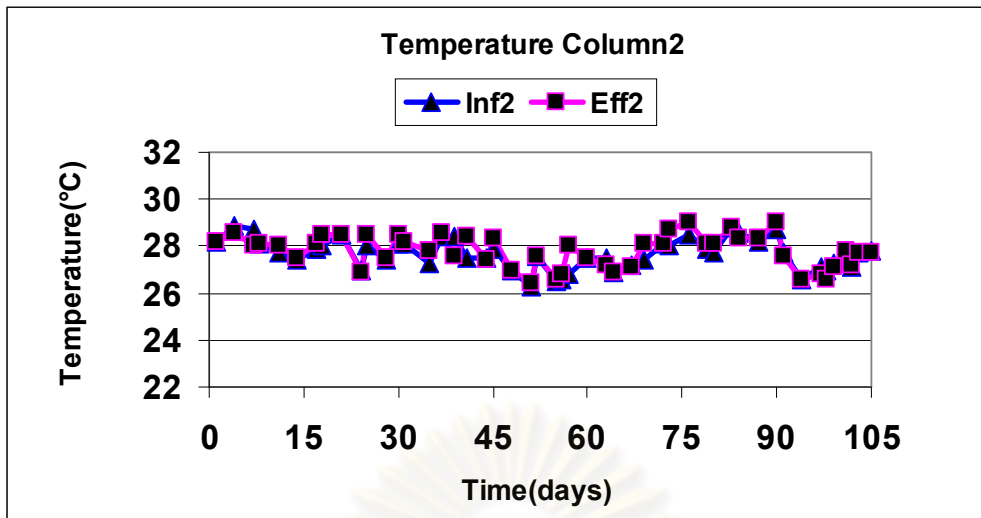
การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะขึ้นอยู่กับปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ถ้าในระบบมีบัฟเฟอร์เพียงพอจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดลองนี้จึงเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีและให้คาร์บอเนตต่อระบบโดยตรงเพื่อช่วยในการปรับพีเอชในน้ำเสียและเป็นการเติมบัฟเฟอร์ให้เหมาะกับการทำงาน ถ้าค่าพีเอชต่ำจนเกินไปจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตและเกิดการตายของจุลินทรีย์

4.1.1.2 อุณหภูมิ (Temperature)

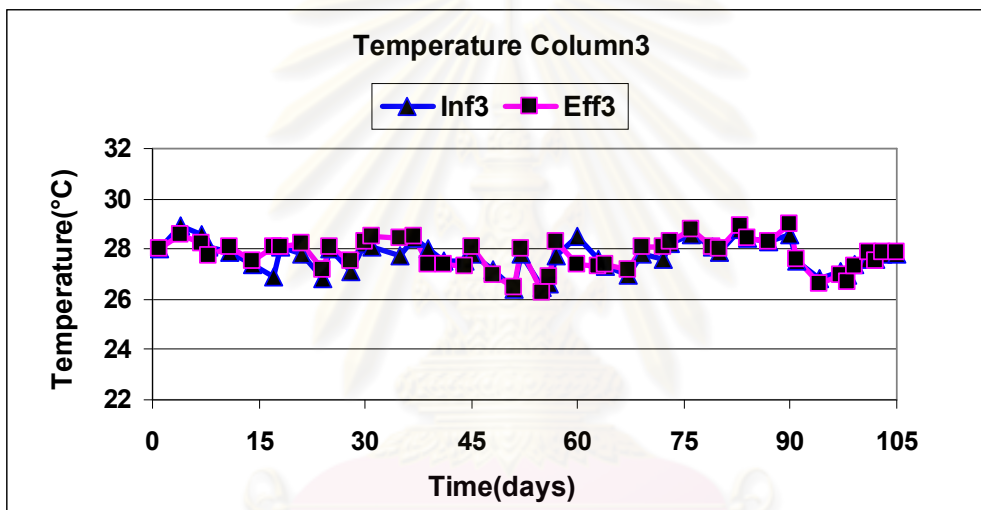
อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอน ได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 27.9, 27.7 และ 27.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 27.6, 27.8 และ 27.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.2



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

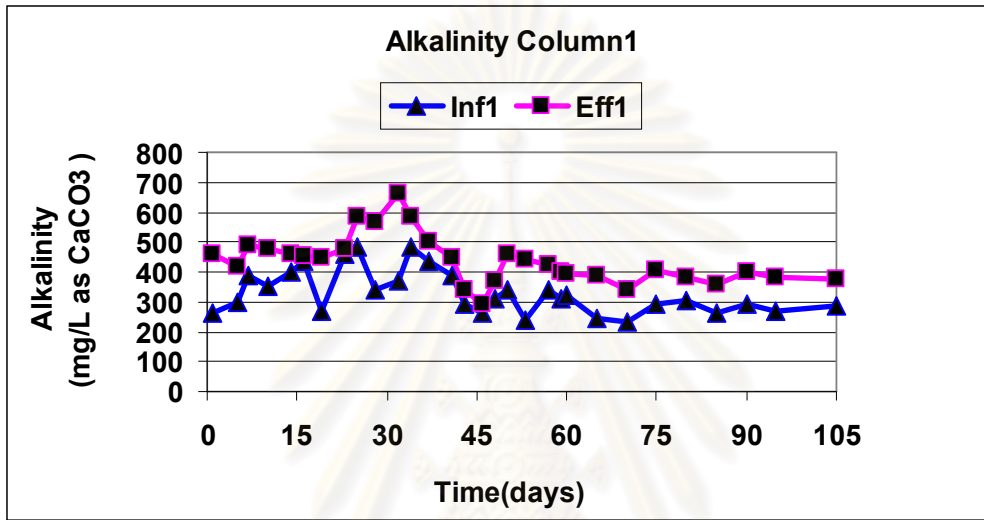
ภาพที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 1

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าและออกจากระบบทั้งสามถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส ถ้าจำแนกการทำงานของแบคทีเรียตามอุณหภูมิจะจัดอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (mesophilic) คืออุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมินี้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์เนื่องจากแบคทีเรียไม่ต้องใช้พลังงานสูงทำให้สามารถเจริญเติบโตได้ดี

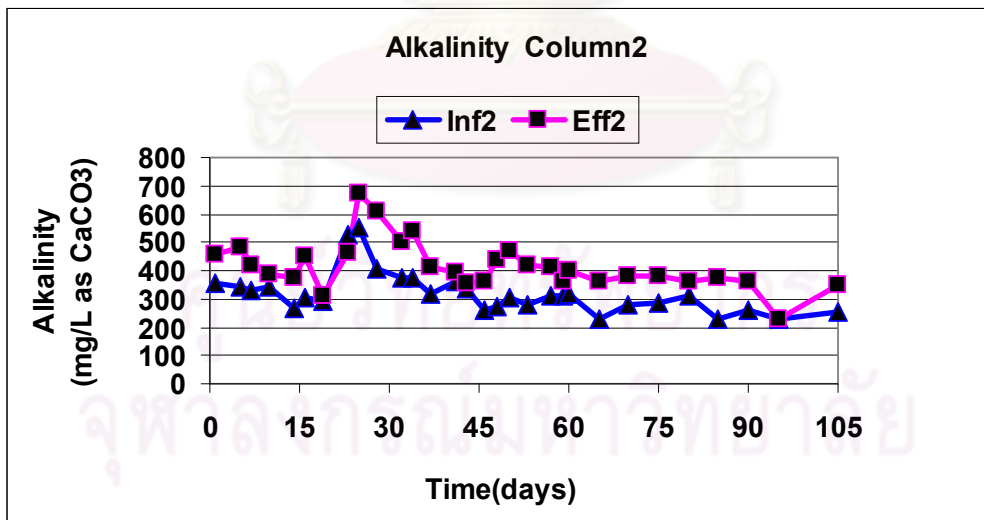
การรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพราะจะส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของแบคทีเรียตามปกติแล้วอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์จะทำงานได้ตามปกติ จะส่งผลต่อโปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะทำให้ถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้

4.1.1.3 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity)

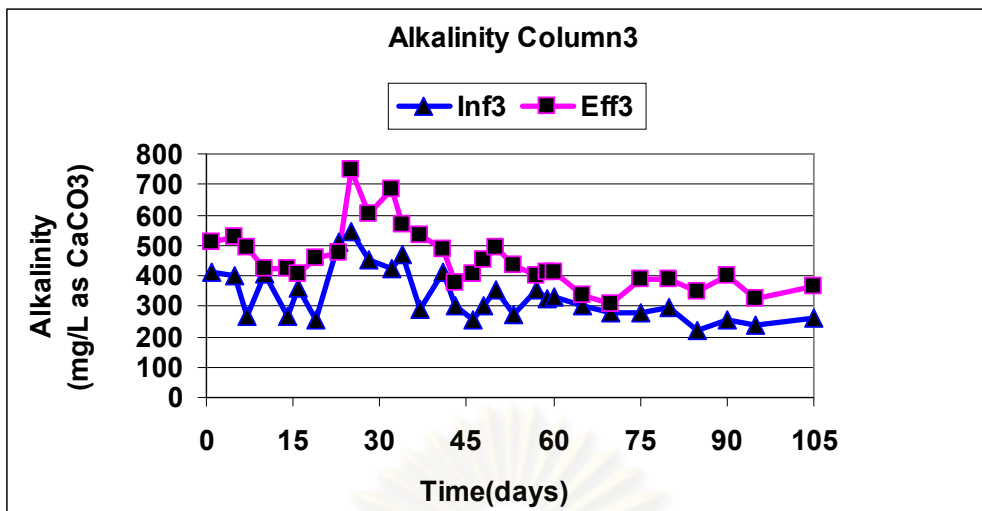
สภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 332, 320 และ 337 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนสภาพต่างทั้งหมดของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 440, 417 และ 453 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.3



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



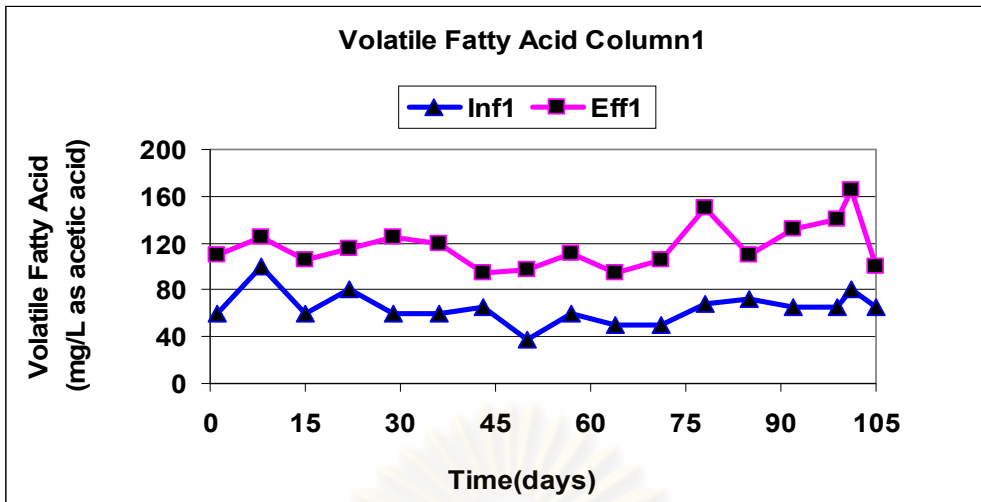
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

ภาพที่ 4.3 ค่าสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองช่วงที่ 1

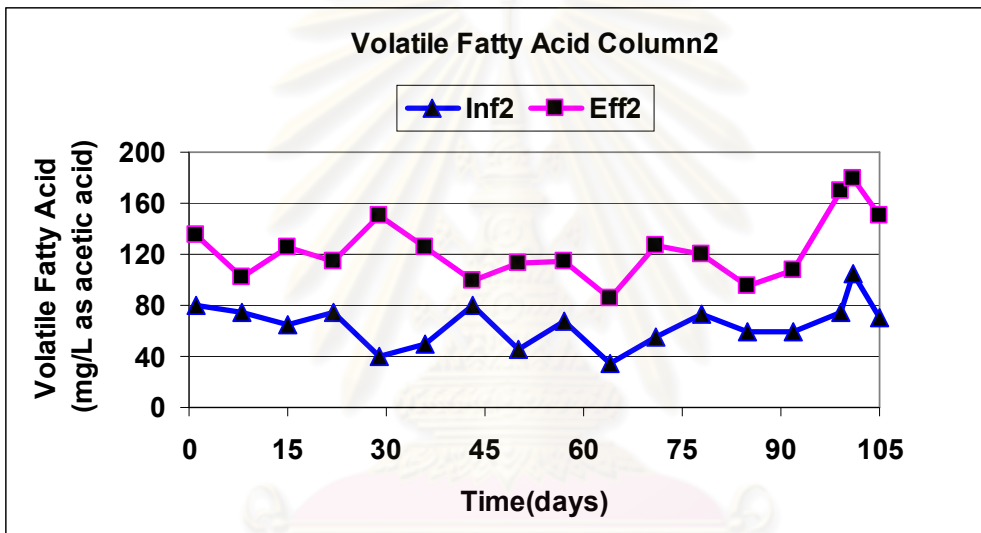
ค่าสภาพต่างทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช การปรับพีเอชและเพิ่มสภาพต่างให้กับระบบจึงมีความจำเป็นต้องเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) ซึ่งเป็นสารที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอช เพราะสามารถละลายน้ำได้ดี และให้ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนตแก่ระบบโดยตรง แต่จะมีราคาแพงกว่าสารเคมีชนิดอื่น ๆ จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าทั้งสามถังปฏิกรณ์ค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำออกระบบมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบ เนื่องจากการทดลองนี้มีการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ในน้ำเสีย และช่วยการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรดเนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดจะสร้างกรดไขมันระเหยจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ เพราะถ้าหากกำลังบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอจะทำให้พีเอชในระบบลดลงจนเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้

4.1.1.4 กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid)

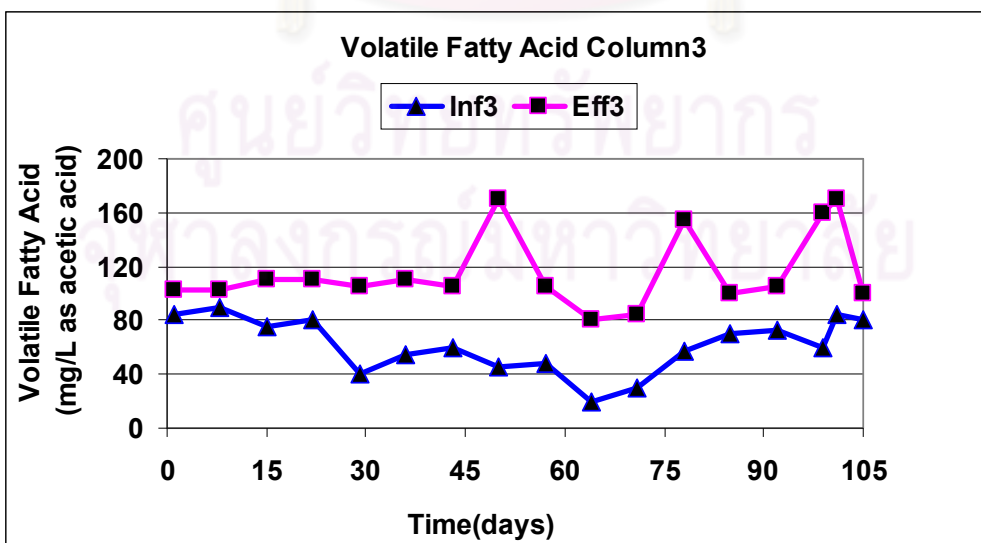
กรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 65, 65 และ 62 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติติก ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 118, 124 และ 116 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติติก ตามลำดับ ค่ากรดไขมันระเหย แสดงดังภาพที่ 4.4



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



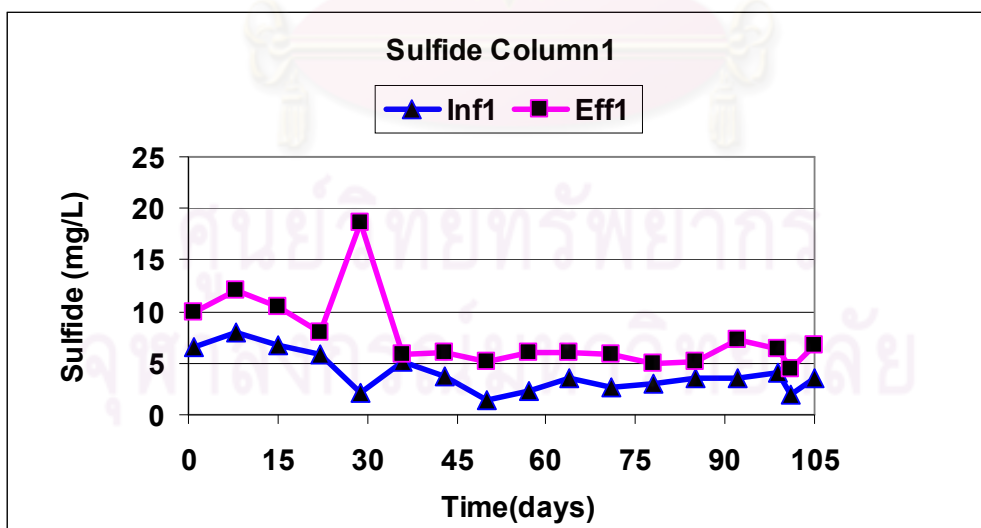
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

ภาพที่ 4.4 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 1

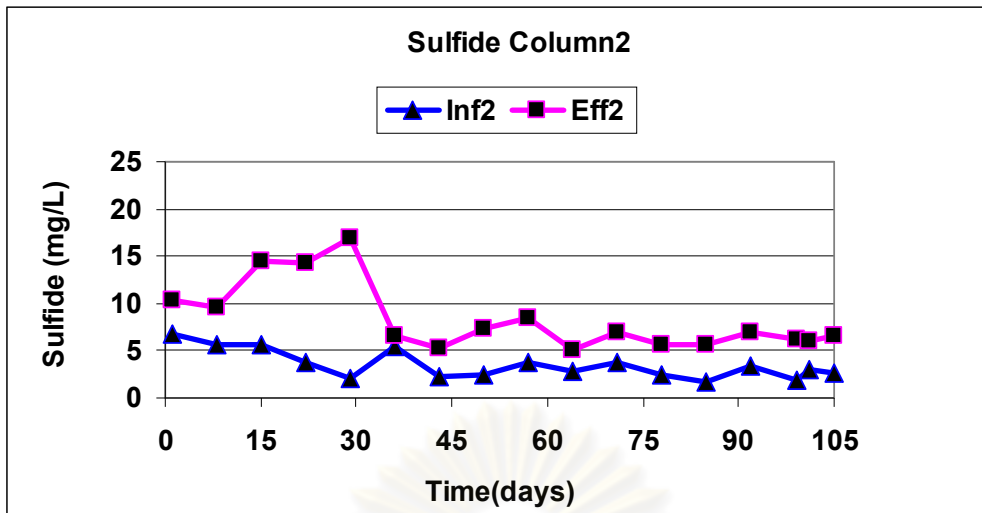
จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำออกระบบมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดในระบบจะเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) ซึ่งจะถูกใช้ต่อไปโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน การควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของระบบ นอกจากการพิจารณาสภาพต่างทั้งหมดแล้ว ยังต้องพิจารณาค่ากรดไขมันระเหยประกอบด้วย ถ้าค่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง ทำให้ระบบทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างสูงกว่า 0.8 แล้วแสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำกว่าปกติ อาจมีแนวโน้มให้ระบบล้มเหลวได้ เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดจากการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิบัติการที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27, 0.30 และ 0.26 ตามลำดับ พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอและทำให้ระบบทำงานได้เป็นปกติ

4.1.1.5 ซัลไฟด์ (Sulfide)

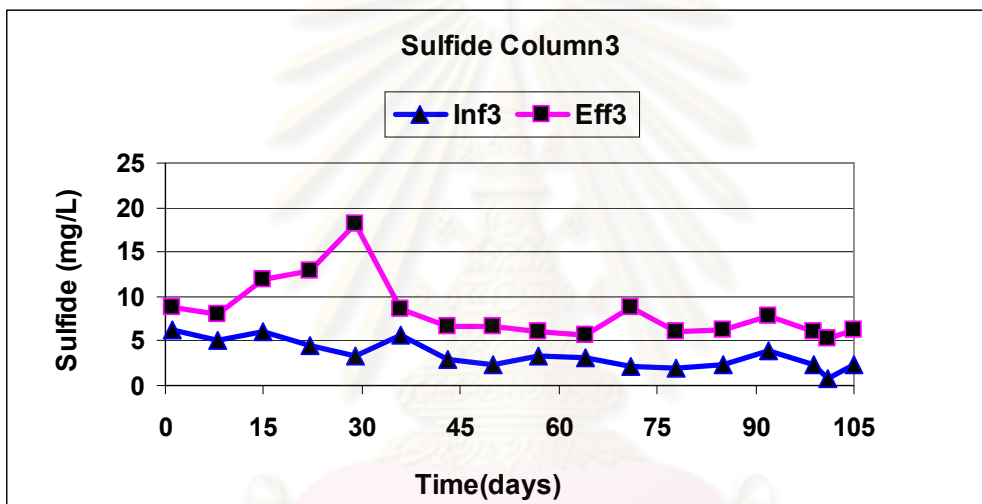
ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิบัติการที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 4.0, 3.5 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.6, 8.4 และ 8.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.5



(ก) ถังปฏิบัติการที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน

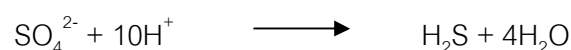


(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

ภาพที่ 4.5 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 1

จากภาพที่ 4.5 ปริมาณซัลไฟด์เฉลี่ยในน้ำออกระบบของทั้งสามถังปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าปริมาณซัลไฟด์เฉลี่ยในน้ำเข้าระบบ และปริมาณซัลไฟด์ของน้ำออกระบบทุกถังปฏิกรณ์มีปริมาณต่ำกว่าที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

การที่ปริมาณซัลไฟด์เฉลี่ยของน้ำออกระบบมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเปลี่ยนซัลเฟตในระบบให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ สมการการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงได้ดังนี้



จากงานวิจัยของ Kroiss และ Plahl-Wabnegg (1983) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลให้อะซิโตคลาสติกเมทาโนเจนลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ (ยับยั้งการผลิตมีเทน) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบที่มีระยะเวลาเก็บตะกอน (Sludge Retention Time) ต่ำ และนอกจากนี้ Speece (1983) ยังชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของ

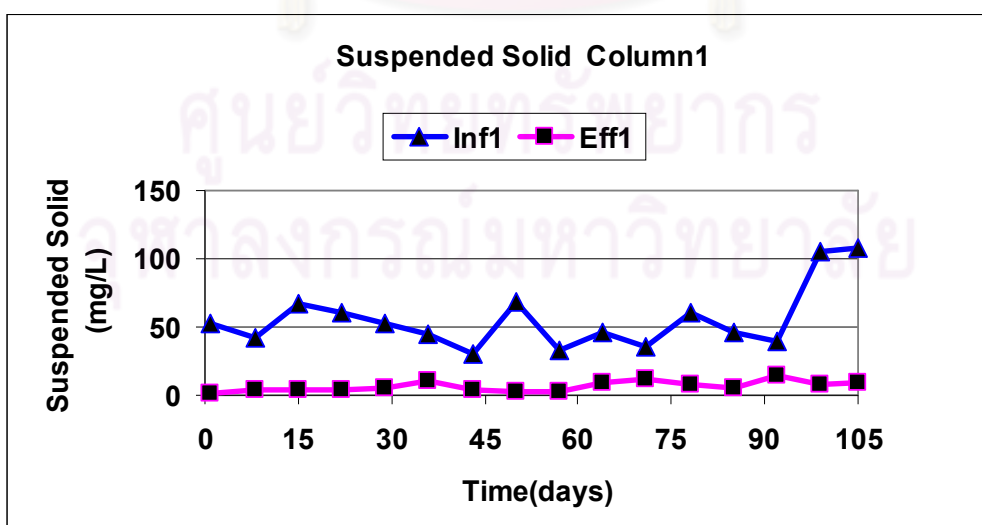
ไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่แบคทีเรียที่เรียวทนได้จะอยู่ที่ 145 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อมา Koster และคณะ (1986) พบว่า ในช่วงพีเอช 6.4-7.2 การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะถูกยับยั้งที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และในช่วงพีเอช 7.8-8.0 จะถูกยับยั้งที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร Reis และคณะ(1992) พบว่าปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 547 มิลลิกรัมต่อลิตร

การพิจารณาพารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สภาพต่างทั้งหมด กรดไขมันระเหยและซัลไฟด์ ตลอดจนการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.8-8.2 อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพต่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 0.4 และปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในน้ำออกจากระบบทั้งสามถึงปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าน้ำเข้าระบบแต่ยังต่ำกว่าปริมาณที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบ ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าระบบทำงานเป็นปกติ

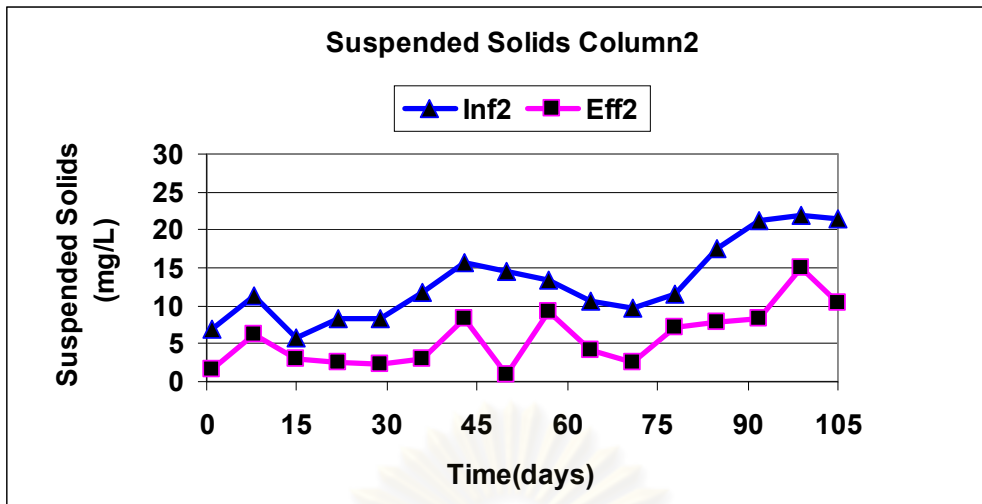
2. พารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ซีไอดี (Chemical Oxygen Demand) ไนเตรท (Nitrate) และซัลเฟต (Sulfate)

4.1.1.6 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัด

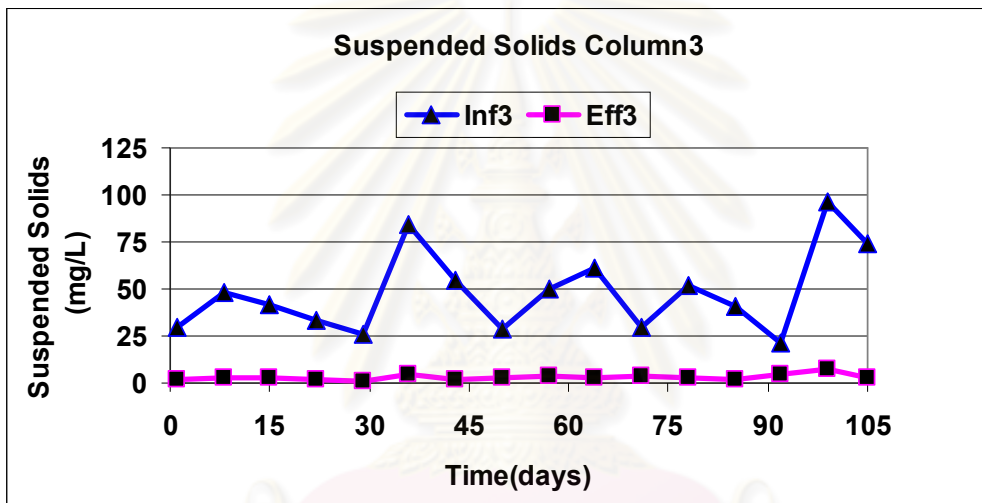
ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 55.6, 13.1 และ 48.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในน้ำออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 6.4, 5.8 และ 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.6



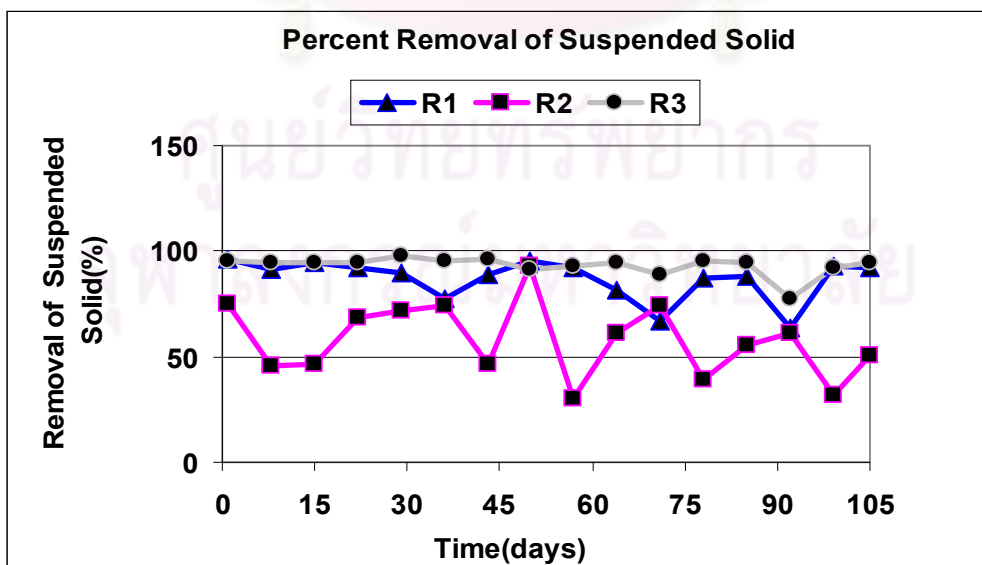
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองช่วงที่ 1

ภาพที่ 4.6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 1

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบเตรียมมาจากน้ำประปาและการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าไม่สูงนัก แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย จากภาพที่ 4.6 พบว่าได้ค่าที่แตกต่างกันสาเหตุอาจเนื่องมาจากการเติมแหล่งคาร์บอนที่มีลักษณะและคุณสมบัติในการละลายน้ำที่แตกต่างส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยในระบบ โดยถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงและมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 88.52 และ 93.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุด คือ 55.76 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุมาจากแป้งมันที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนถังปฏิกรณ์ที่ 2 นี้จะตกตะกอนได้เร็วกว่าแหล่งคาร์บอนอื่น ส่งผลเสียต่อระบบได้มากกว่าสารที่ตกตะกอนได้น้อยเนื่องจากจะลงไปถังปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายและหลุดออกนอกกระบะบ่ได้ นอกจากนี้แป้งมันยังมีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ยากโดยอาจไปรวมตัวหรือเคลือบอยู่บนผิวของแบคทีเรียส่งผลให้แบคทีเรียเกิดเป็นเม็ดได้ช้า ลดความแข็งแรงของตะกอนและทำให้ตะกอนหลุดออกนอกกระบะเป็นจำนวนมาก แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1

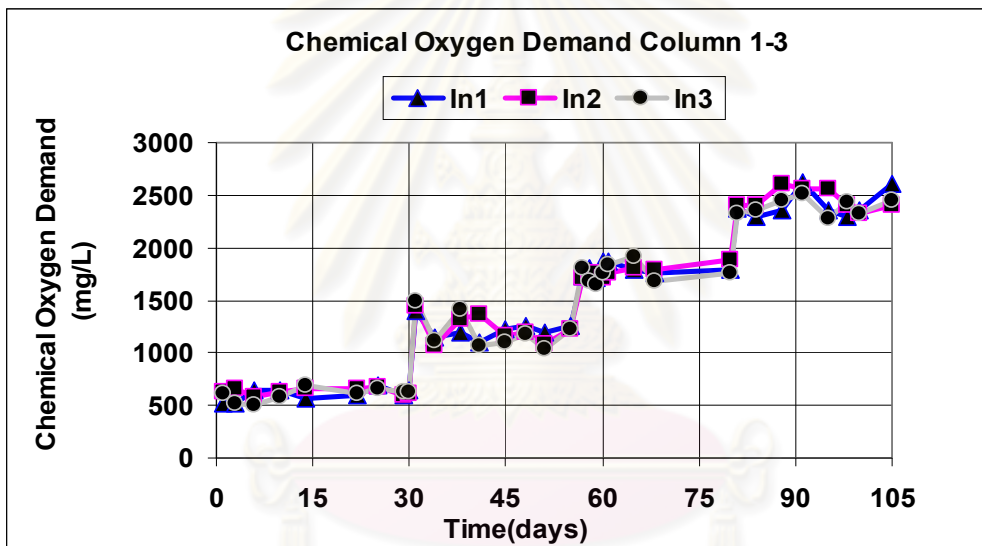
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	30.4	1.8	5.8	1.0	21.2	0.6
ค่าสูงสุด	108	14.5	22	15	96	7.4
ค่าเฉลี่ย	55.6	6.4	13.1	5.8	48.2	2.9
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	88.49	-	55.73	-	93.98

4.1.1.7 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) และประสิทธิภาพการบำบัด

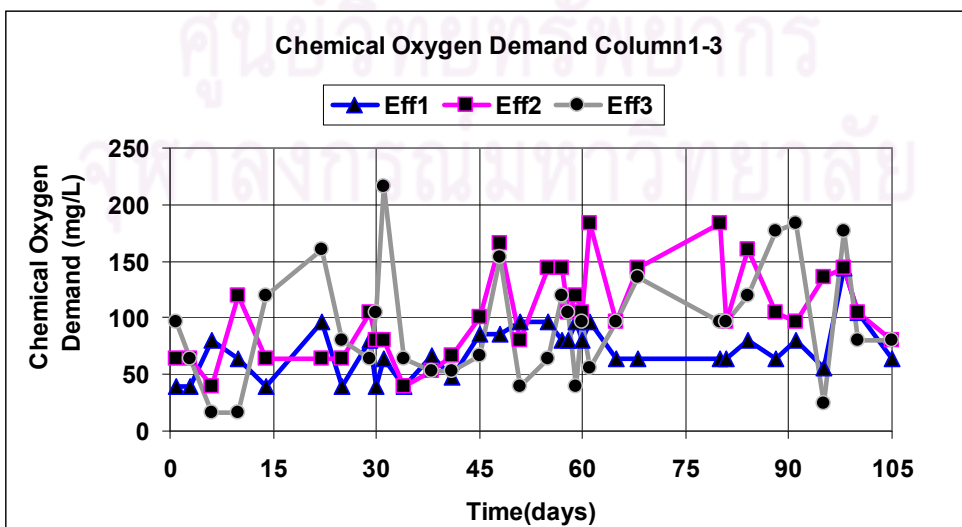
การเตรียมน้ำเสียเข้าระบบใช้น้ำเสียสังเคราะห์ กำหนดความเข้มข้นซีโอดีเข้าระบบเริ่มต้นจาก 600, 1,200, 1,800 จนถึง 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นซีโอดีสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยเกิดจากการเตรียมน้ำเสียเข้าระบบในแต่ละวันของผู้ทดลองแต่ในช่วงแรกจะเติมความเข้มข้นซีโอดีที่ 350 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ แล้วจึงค่อยเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีมากขึ้นตามลำดับ ซีโอดีเข้า-ออกจากระบบและประสิทธิภาพการบำบัด แสดงดังตารางและภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ซีโอดีเข้า-ออกระบบ และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองครั้งที่ 1

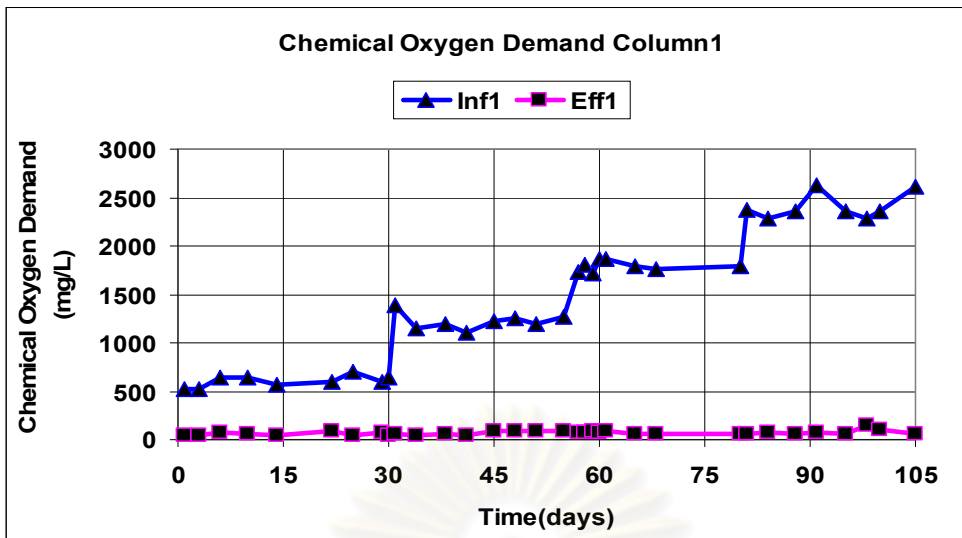
ซีโอดี									
เวลา (วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1			ถังปฏิกรณ์ที่ 2			ถังปฏิกรณ์ที่ 3		
	เข้า	ออก	ประสิทธิภาพ (%)	เข้า	ออก	ประสิทธิภาพ (%)	เข้า	ออก	ประสิทธิภาพ (%)
30	602	58	90.63	635	74	88.32	605	80	87.11
25	1,223	73	94.08	1,234	91	92.54	1,202	89	92.86
25	1,792	78	95.65	1,774	135	92.41	1,762	93	94.71
25	2,404	82	96.56	2,456	115	95.45	2,388	117	95.18



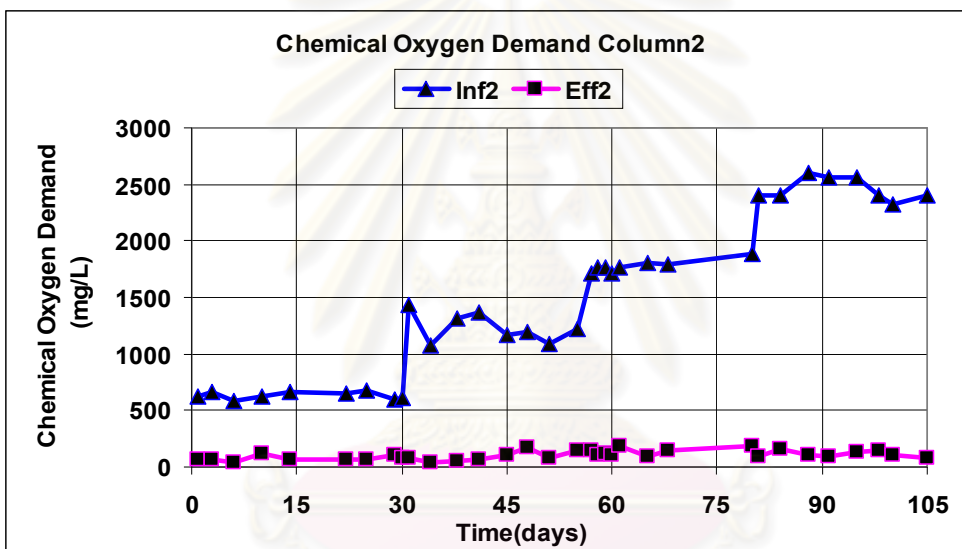
(ก) ซีโอดีน้ำเข้าระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตลอดการทดลองครั้งที่ 1



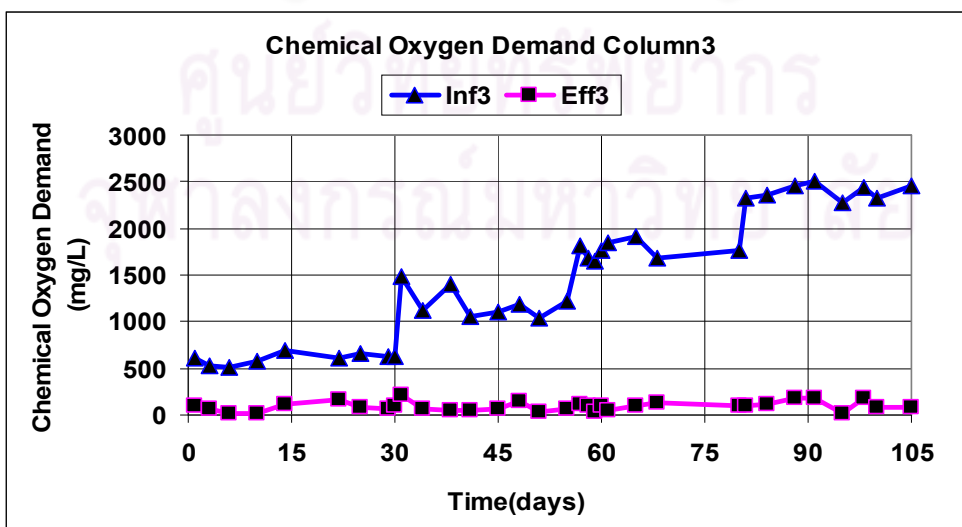
(ข) ซีโอดีน้ำออกระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตลอดการทดลองครั้งที่ 1



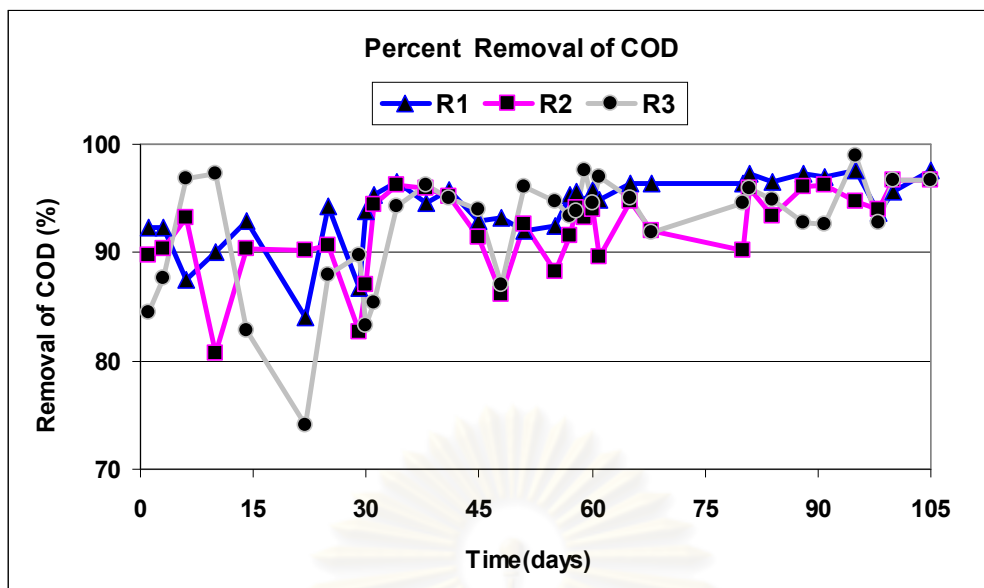
(ค) ซีโอติ้เข้าและออกจากระบบ ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ง) ซีโอติ้เข้าและออกจากระบบ ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



(จ) ซีโอติ้เข้าและออกจากระบบ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



(จ) ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 1

ภาพที่ 4.7 ซีโอดีเข้า - ออกระบบ และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 1

จากภาพที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 94.06, 92.06 และ 92.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันมากและมีค่าค่อนข้างคงที่ จากการศึกษที่ผ่านมาพบว่าแหล่งคาร์บอนที่นิยมใช้สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทในระบบบยูเอเอสบี ได้แก่ น้ำตาลทราย เพราะเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีอัตราการย่อยสลายเร็ว แบคทีเรียนำไปใช้ได้ง่ายและไม่เข้าไปสะสมอยู่ในระบบแต่ในปัจจุบันน้ำตาลทรายมีราคาแพงและราคาเป็นไปตามกลไกของตลาด ดังนั้นการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีขึ้นใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมจึงจะต้องเติมแหล่งคาร์บอนที่มีราคาถูกเพื่อช่วยลดต้นทุนการบำบัด ดังนั้นกากแป้งข้าวเจ้าจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงใกล้เคียงกับน้ำตาลทราย

4.1.1.8 ไนเตรท (Nitrate) และประสิทธิภาพการบำบัด

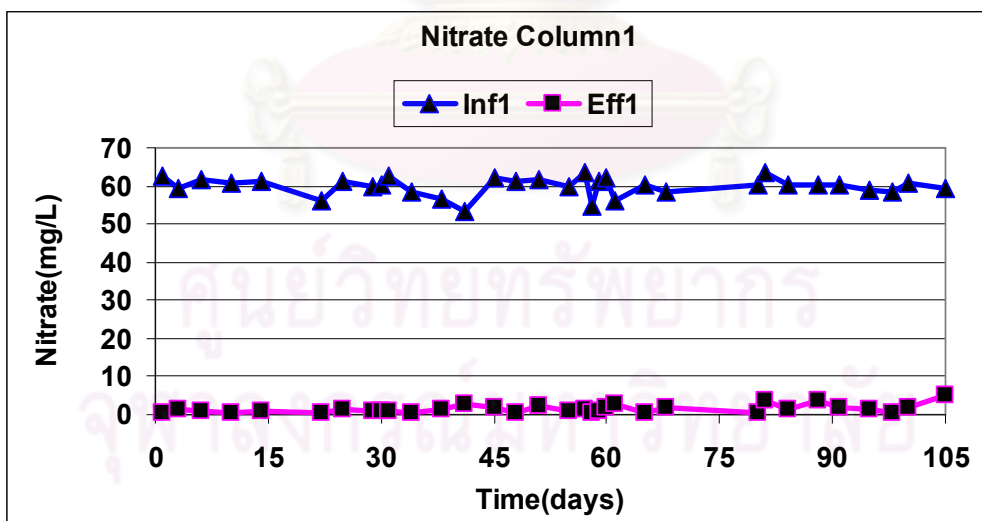
จากงานวิจัยนี้ ไนเตรทและซัลเฟตในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของไอออนลบ ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้เครื่องวิเคราะห์ไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatography) วิเคราะห์ไอออนลบในรูปของ NO_3^- และ SO_4^{2-} โดยอาศัยเทคนิคการแยกสารและหลักการแลกเปลี่ยนประจุภายในคอลัมน์โดยค่าที่ได้จะอยู่ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณไนเตรทของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 59.93, 59.69 และ 60.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 1.46, 1.50 และ 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.8

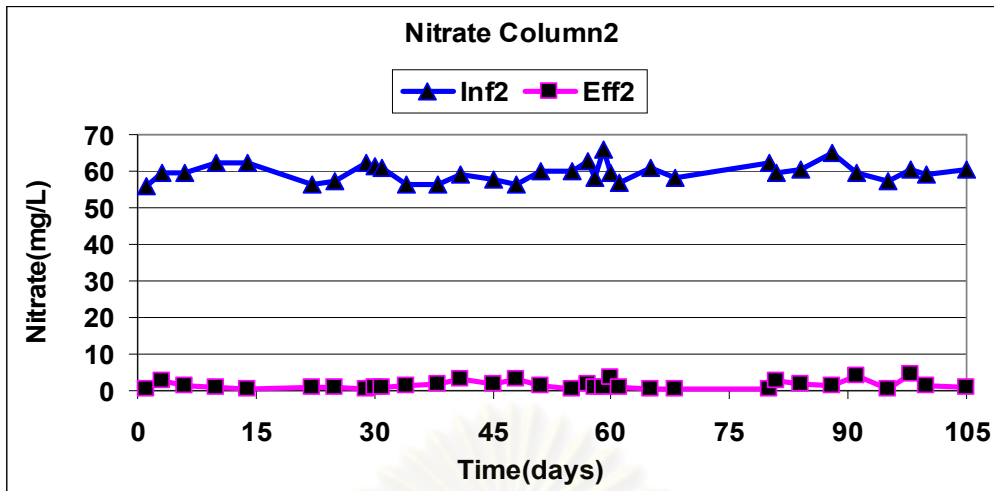
ตารางที่ 4.4 ปริมาณไนเตรทและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1

ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	54.41	0.31	55.79	0.43	52.04	0.10
ค่าสูงสุด	63.48	4.90	65.69	4.38	63.92	4.78
ค่าเฉลี่ย	59.93	1.46	59.69	1.50	60.06	1.72
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	97.80	-	97.83	-	97.31

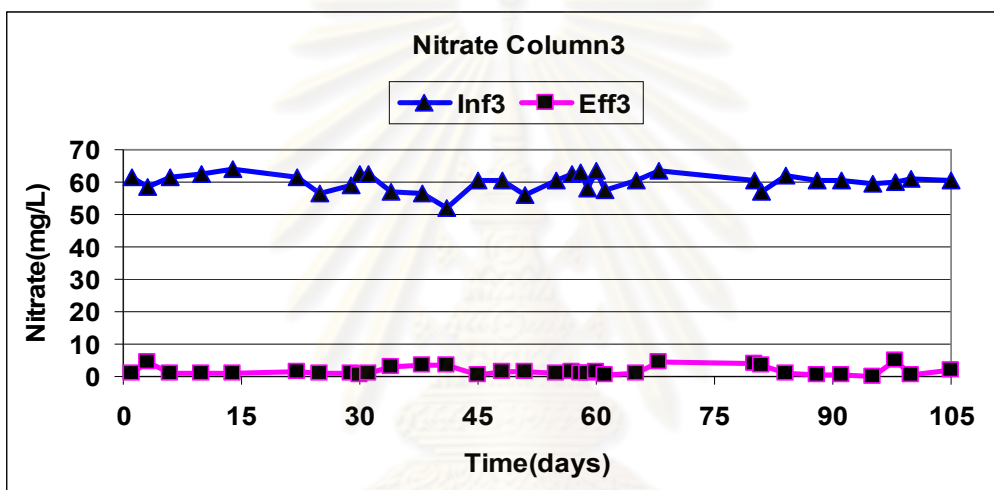
จากตารางที่ 4.4 เนื่องจากน้ำเข้าระบบในช่วงการทดลองที่ 1 เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมไนเตรทลงในน้ำเสียโดยควบคุมให้อยู่ที่ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง แต่ค่าความเข้มข้นไนเตรทเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเตรียมน้ำเสียเข้าระบบของผู้ทำการทดลองและเมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่าจุลินทรีย์ยังไม่คุ้นเคยกับไนเตรททำให้การกำจัดไนเตรทอยู่ในสภาพแปรปรวนในช่วงแรก แต่เมื่อจุลินทรีย์ปรับตัวให้คุ้นเคยและสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียได้แล้ว ประสิทธิภาพการกำจัดจึงค่อนข้างคงที่ แสดงว่าแบคทีเรียดีในทรียาอิงซึ่งเป็นแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนเตรทนั้น สามารถเจริญเติบโตขึ้นมาในน้ำเสียนี้ได้และเปลี่ยนรูปไนเตรทในรูปอื่นๆได้ ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำออกมีค่าลดลงและค่อนข้างคงที่กว่าช่วงเริ่มต้นระบบ



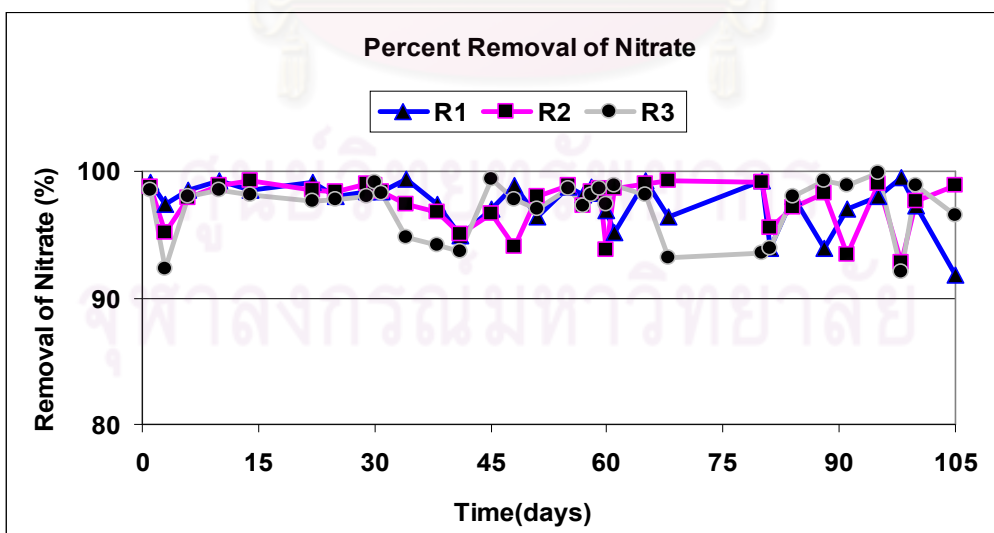
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตตลอดการทดลองช่วงที่ 1

ภาพที่ 4.8 ไนเตรตเข้า - ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตตลอดการทดลองช่วงที่ 1

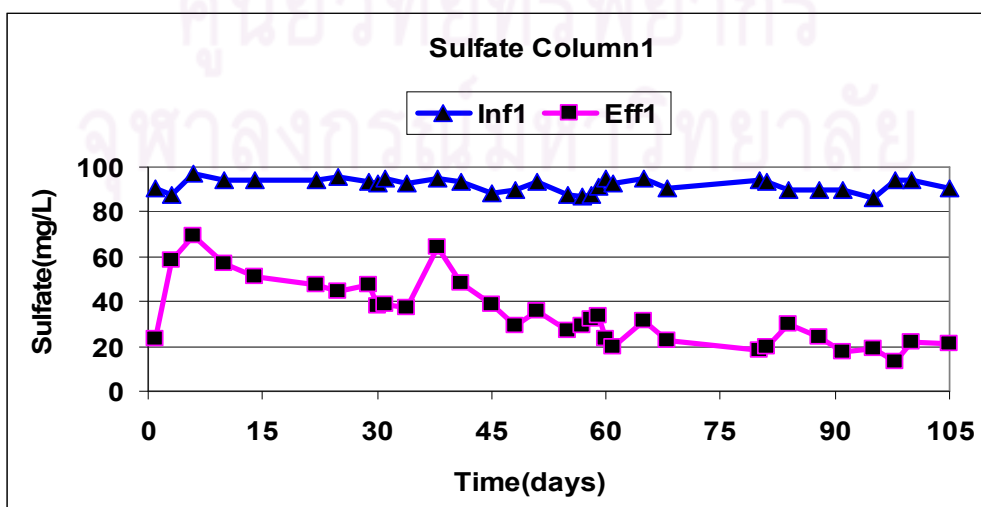
จากภาพที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 97.80, 97.83 และ 97.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงเกินกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ในระยะแรกประสิทธิภาพการบำบัดยังไม่สูงมากนัก เนื่องจากการปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีไนเตรทของแบคทีเรียที่เรี่ยนั้นยังไม่ดีพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดยังคงต่ำอยู่ แต่เมื่อทำการทดลองไประยะเวลาหนึ่งพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นเรื่อยๆ และค่อนข้างคงที่ แสดงว่าการทำงานของดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำจัดไนเตรทนั้น สามารถเจริญเติบโตขึ้นมาในน้ำเสียนี้ได้ และเปลี่ยนรูปไนเตรทไปอยู่ในรูปอื่นๆ ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำออกกระบบลดลงและค่อนข้างคงที่

4.1.1.9 ซัลเฟต (Sulfate) และประสิทธิภาพการบำบัด

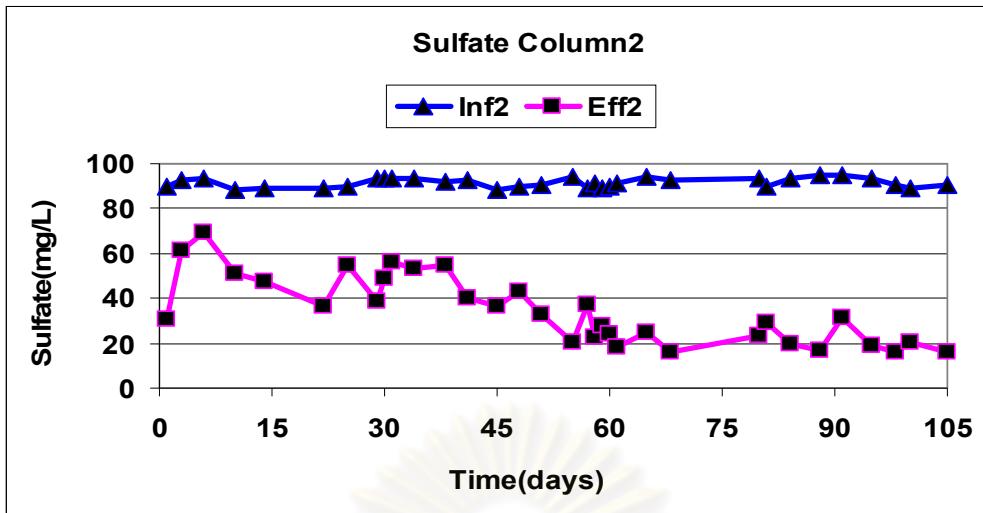
ปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 91.85, 91.43 และ 91.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟตของน้ำออกกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 34.32, 34.54 และ 34.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังตารางและภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณซัลเฟตและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 1

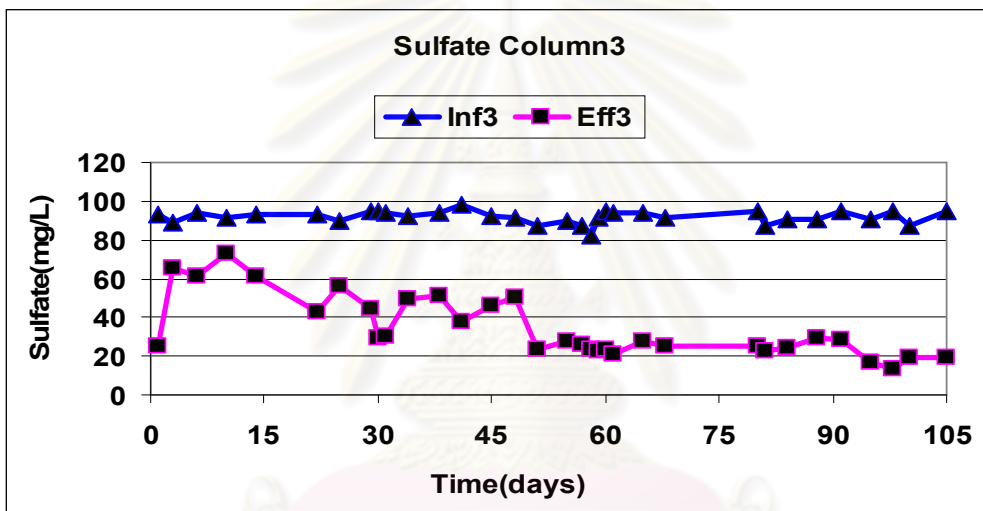
ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	86.19	13.36	88.31	16.17	82.48	13.61
ค่าสูงสุด	96.80	69.21	94.84	69.11	98.26	72.93
ค่าเฉลี่ย	91.85	34.32	91.43	34.54	91.93	34.72
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	62.75	-	62.14	-	62.22



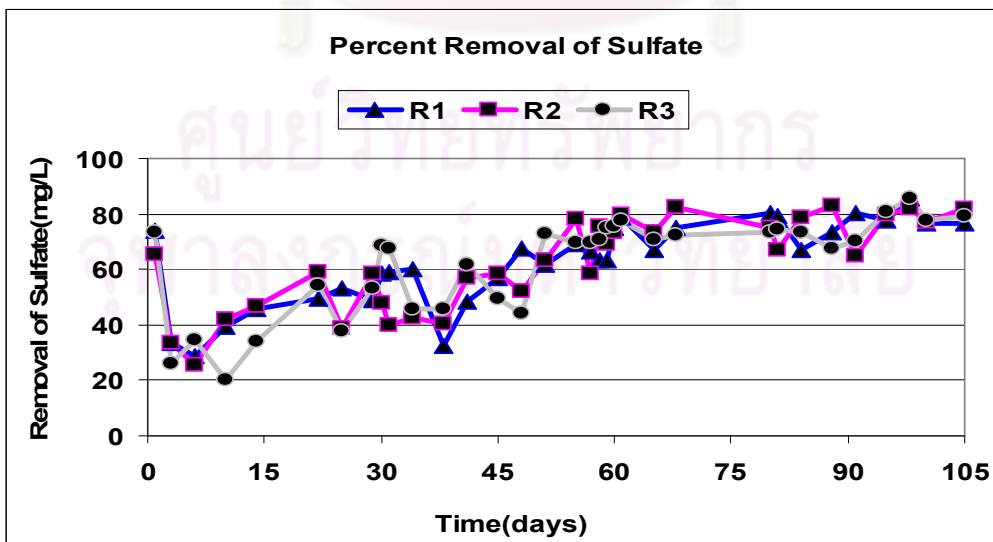
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



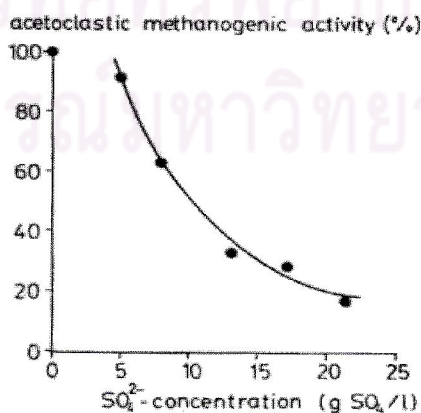
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตตลอดการทดลองช่วงที่ 1

ภาพที่ 4.9 ซัลเฟตเข้า - ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตตลอดการทดลองช่วงที่ 1

จากภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 62.75, 62.14 และ 62.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การทดลองได้กำหนดปริมาณซัลเฟตน้ำเข้าระบบอยู่ที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นของการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันเกิดขึ้นจากการเตรียมน้ำเสียของผู้ทำการทดลอง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดพบว่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกันในทั้งสามถังปฏิกรณ์เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ในน้ำเสียและเปลี่ยนซัลเฟตไปอยู่ในรูปอื่น ๆ ทำให้ความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำออกกระบบมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดนั้นอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากการแข่งขันกันทำงานระหว่างแบคทีเรียดีในไตรฟายอิงและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ผลการศึกษาแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตของ Visser et al. (1994) พบว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความสามารถในการใช้สารอาหารที่มีคาร์บอนอะตอมสูงได้ และภายใต้สภาวะที่อัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตสูง การออกซิไดซ์ไพโรไฟโอเนตโดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างอะซิเตตและแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้ไฮโดรเจนจะเป็นเส้นทางหลักในการย่อยสลายไพโรไฟโอเนต แต่ถ้าอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตต่ำ มีปริมาณซัลเฟตมากเกินไป การออกซิไดซ์ไพโรไฟโอเนตโดยตรงโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเป็นเส้นทางหลักในการย่อยสลายแทน จากเหตุผลดังกล่าวอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดเส้นทางในการย่อยสลายสารอินทรีย์และเป็นตัวกำหนดว่าแบคทีเรียชนิดใดจะมีความสามารถในการแย่งใช้สารอินทรีย์ได้มากกว่ากัน และผลวิจัยของ De Vegt (1985) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของไซเดียมซัลเฟตต่อกิจกรรมของอะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน ซึ่งเป็นการทดลองในระยะเวลา 3 วัน จะเห็นได้ว่าผลกระทบจะเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของไซเดียมซัลเฟตปริมาณมากกว่า 5 กรัมต่อลิตร (เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และในงานวิจัยนี้ปริมาณซัลเฟตที่ใช้น้อยกว่า 5 กรัมต่อลิตร แสดงดังภาพที่ 4.10



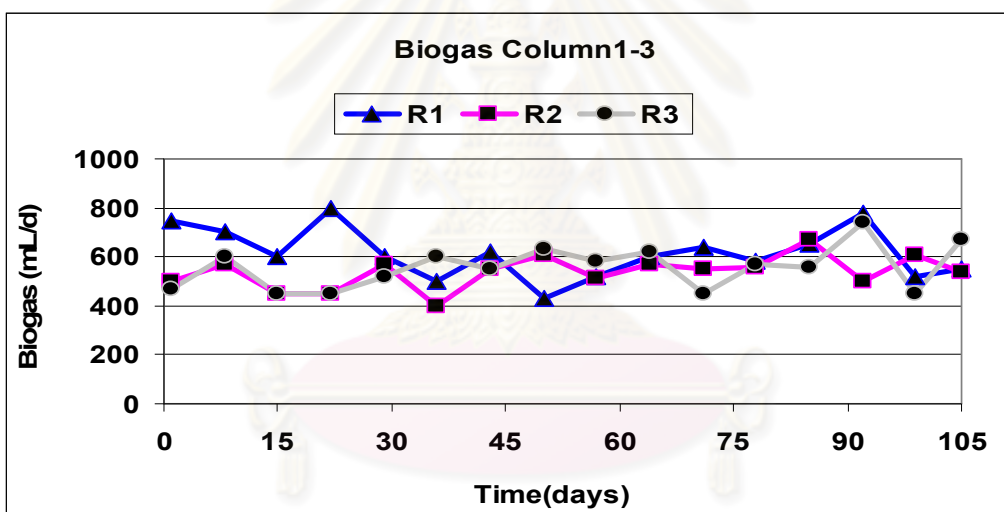
ภาพที่ 4.10 การยับยั้งของอะซิโตคลาสติกเมทาโนเจนโดยไซเดียมซัลเฟต (De Vegt, 1985)

4.1.1.10 ก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 โดยมีแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ เท่ากับ 615, 538 และ 538 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ สามารถวัดปริมาณก๊าซได้จากอุปกรณ์เก็บก๊าซแบบแทนที่น้ำ ซึ่งเป็นการเก็บปริมาณก๊าซรวมที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบ แสดงดังตาราง 4.6 และภาพที่ 4.10

ตารางที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพช่วงการทดลองที่ 1

ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตรต่อวัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
ค่าต่ำสุด	430	400	440
ค่าสูงสุด	800	670	630
ค่าเฉลี่ย	615	538	538



ภาพที่ 4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองช่วงที่ 1

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.11 จากการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในช่วงแรกของการเริ่มต้นเดินระบบปริมาณก๊าซชีวภาพจะไม่มากนัก เนื่องจากเป็นช่วงการปรับตัวของจุลินทรีย์ในระบบ จุลินทรีย์มีการใช้สารอินทรีย์น้อยปริมาณก๊าซจึงน้อยตามไปด้วย และนอกจากนี้ในน้ำเสียยังมีซัลเฟตอยู่ด้วย จึงส่งผลให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายในน้ำมากกว่าในรูปก๊าซ จากการศึกษาของ อนุตร เปียงแก้ว (2542) พบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตลดลง (ความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้น) ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะลดลง และ Harada et al. (1993) พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของซัลเฟต อัตราการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลง เนื่องจากซีโอดีถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองครั้งที่ 1 ศึกษาการเติมแหล่งคาร์บอนได้แก่ น้ำตาลทราย, แป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ไนเตรทและซัลเฟตและการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยอัตราส่วนระหว่างซีไอดีต่อซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1 พบว่าที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 26.7:1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ไนเตรทและซัลเฟตสูงสุดแต่ก็ใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20.0:1 ดังนั้นเพื่อช่วยในการประหยัดแหล่งคาร์บอนจึงทำการเลือกที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 20.0:1 มาใช้ในการทดลองครั้งที่ 2 ต่อไป

ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดและการสร้างเม็ดตะกอนทั้ง 3 ดังปฏิกรณ์พบว่า ดังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ไนเตรท และซัลเฟตสูงสุด เนื่องจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์สามารถปรับตัวได้ดี สอดคล้องกับผลการศึกษาขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในดังปฏิกรณ์ที่ 1 ให้ขนาดเม็ดตะกอนใกล้เคียงกับเมื่อเริ่มต้นการทดลอง ส่วนในดังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ให้ขนาดเม็ดตะกอนใกล้เคียงกันแต่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง

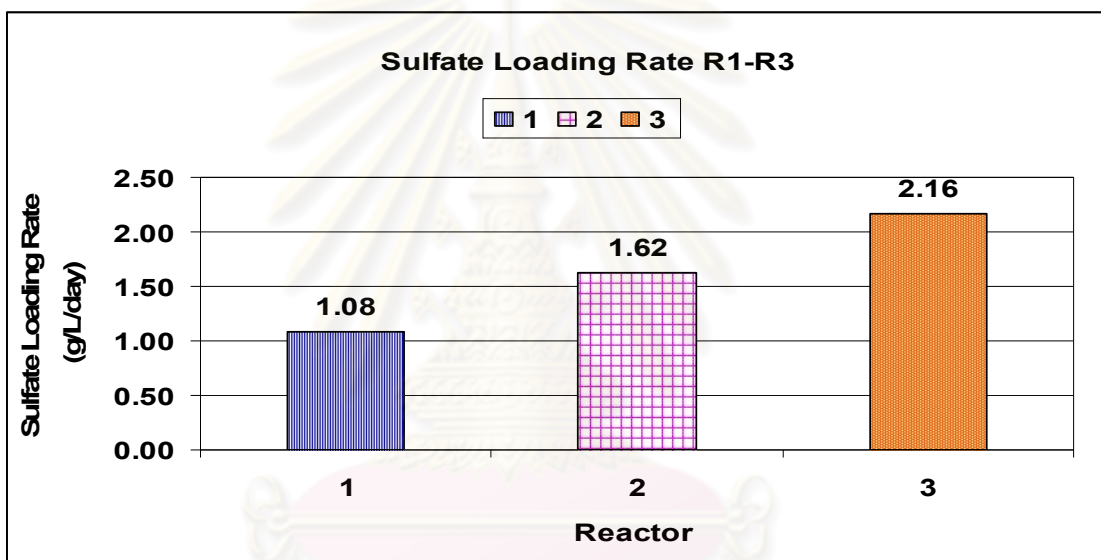


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 วัดประสมค์เพื่อศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกซัลเฟต (Sulfate Loading Rate) ที่มีต่อการบำบัดซีโอดี ไนเตรท และซัลเฟต โดยใช้กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน ศึกษาตัวแปรและพารามิเตอร์ในส่วนผลการทดลองเช่นเดียวกับช่วงที่ 1

ตารางที่ 4.7 กำหนดการทดลองช่วงที่ 2

ถังปฏิกรณ์ (Column)	แหล่งคาร์บอน	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	COD (mg/L)	Sulfate Loading Rate (g/L/day)
1	กากแป้งข้าวเจ้า	60	180	3,600	1.08
2			270	5,400	1.62
3			360	7,200	2.16



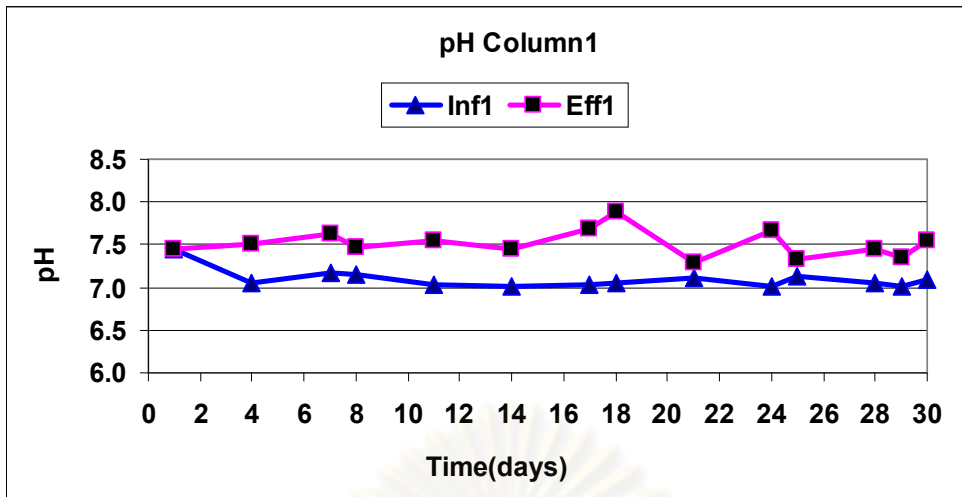
ภาพที่ 4.12 ปริมาณ Sulfate Loading Rate ในแต่ละถังปฏิกรณ์

ทำการทดลองทั้งหมด 30 วัน จนระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถจำแนกพารามิเตอร์ต่างๆที่ทำการวิเคราะห์ ดังนี้

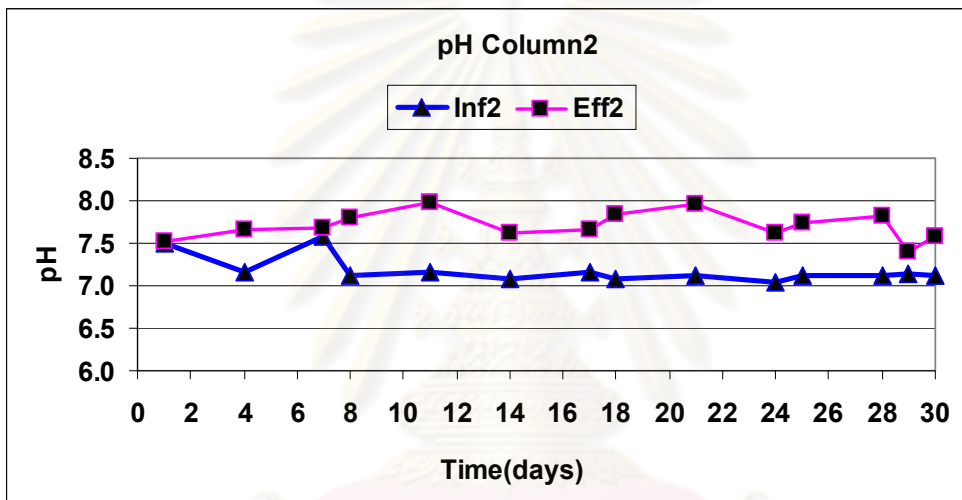
1) พารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของระบบ ได้แก่ พีเอช (pH) อุณหภูมิ (Temperature) สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity) กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) ซัลไฟด์ (Sulfide)

4.1.2.1 พีเอช

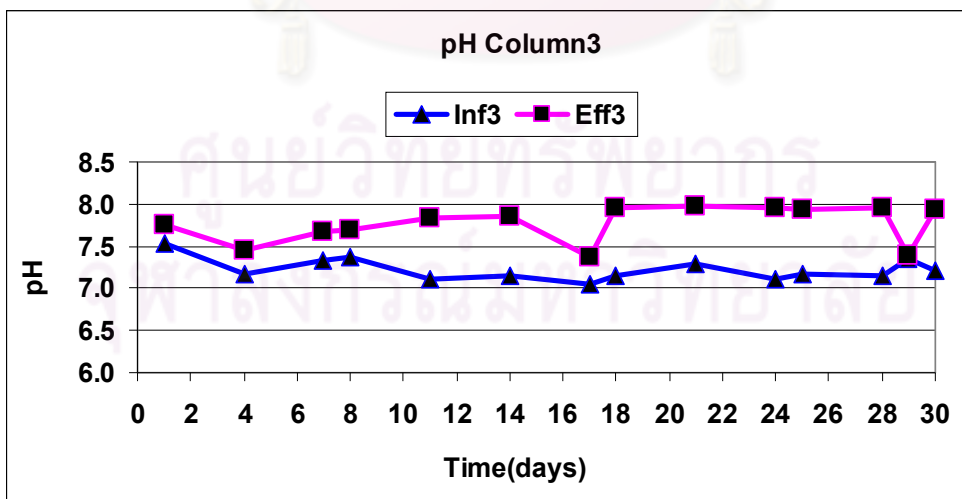
พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ซีโอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.10, 7.18 และ 7.22 ตามลำดับ ส่วนพีเอชของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.52, 7.71 และ 7.77 ตามลำดับ ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.13



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



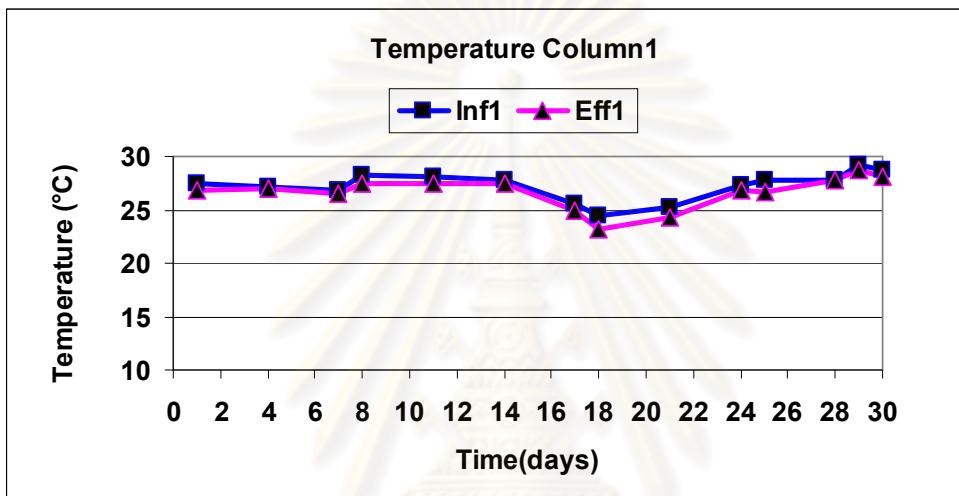
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีโอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.13 พี่เอสทดลองการทดลองครั้งที่ 2

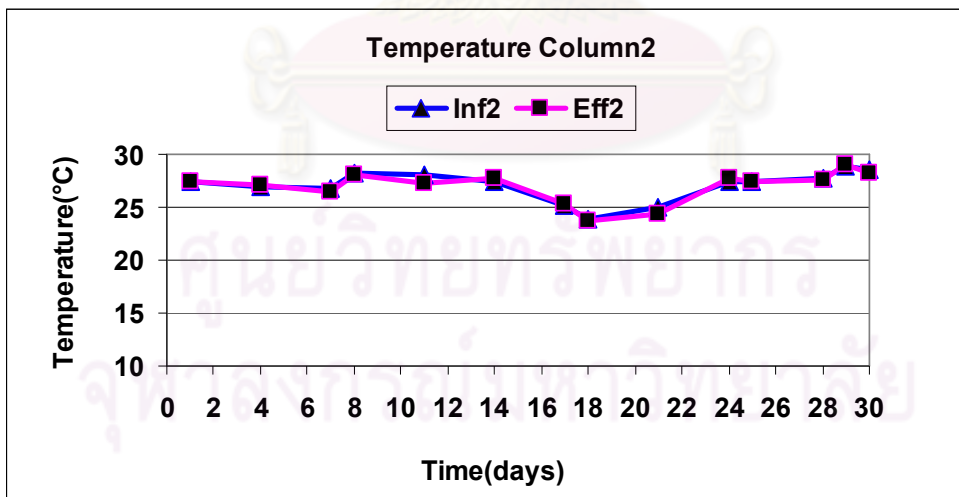
จากภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำออกระบบของทั้งสามถังปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 การที่พีเอชมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1.1

4.1.2.2 อุณหภูมิ

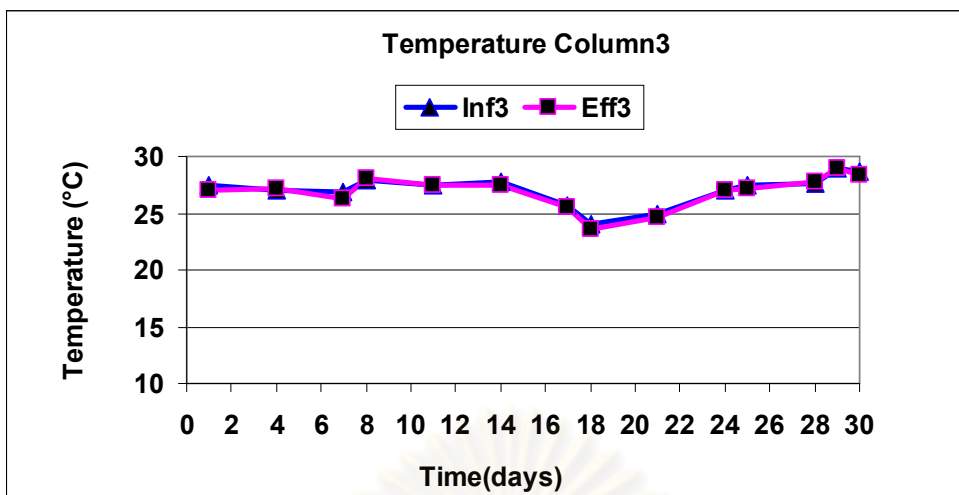
อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ซีโอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 27.3, 27.1 และ 27.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 26.7, 27.0 และ 26.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.14



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



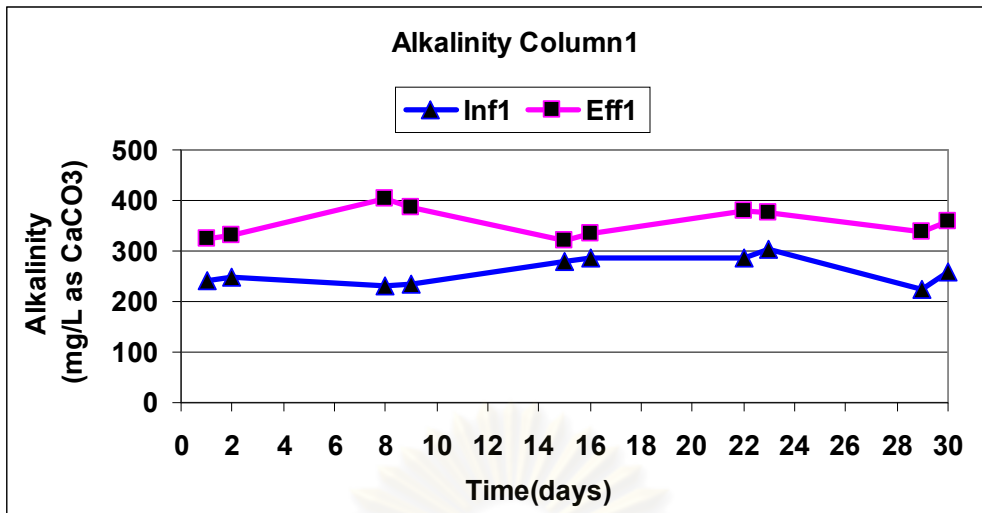
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีไอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.14 อุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 2

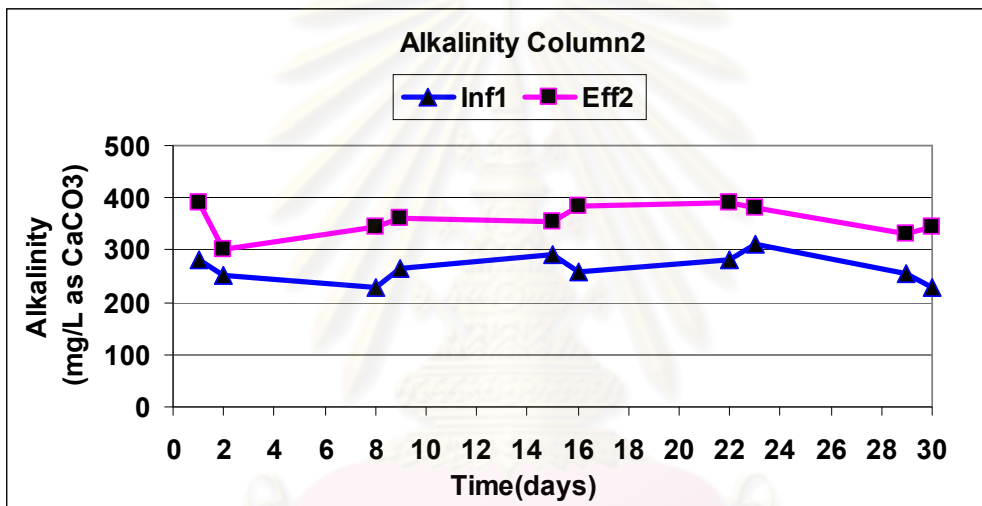
จากภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกระบบทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบแต่ไม่แตกต่างกันมากนักสาเหตุอาจเนื่องมาจากการทดลองทำอยู่บริเวณระเบียงอาคารที่มีความสูงถึง 17 ชั้นทำให้ปัจจัยทางสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิหรือลมมีผลต่อการทดลองได้ และในบางวันระหว่างที่ดำเนินการทดลองอุณหภูมิลดต่ำลงกว่าปกติเนื่องจากสภาพการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลและอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่ลดลงอย่างกะทันหัน ส่งผลต่ออุณหภูมิของน้ำภายในระบบ แต่ทั้งหมดก็คงยังอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.1.2.3 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity)

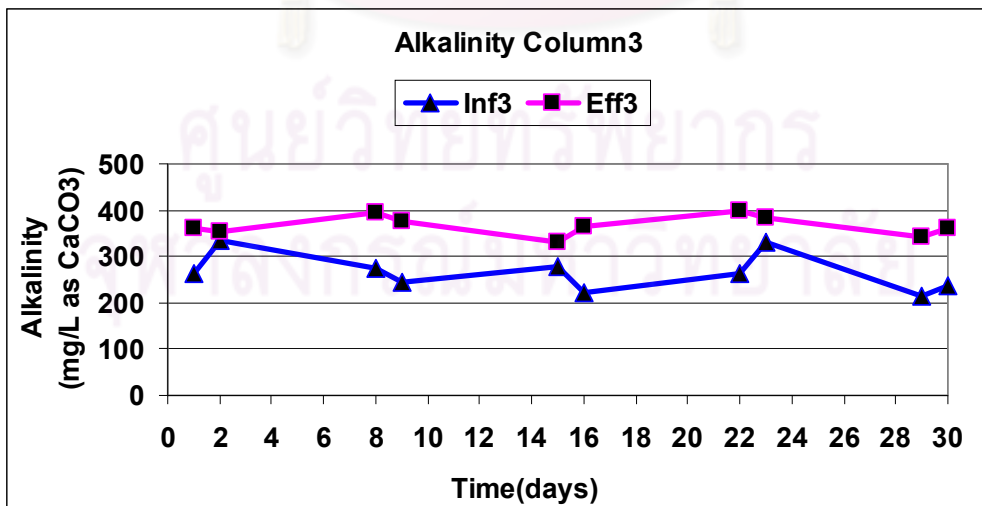
สภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับที่ซีไอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 260, 265 และ 267 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนสภาพต่างทั้งหมดของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 355, 358 และ 367 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.15



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



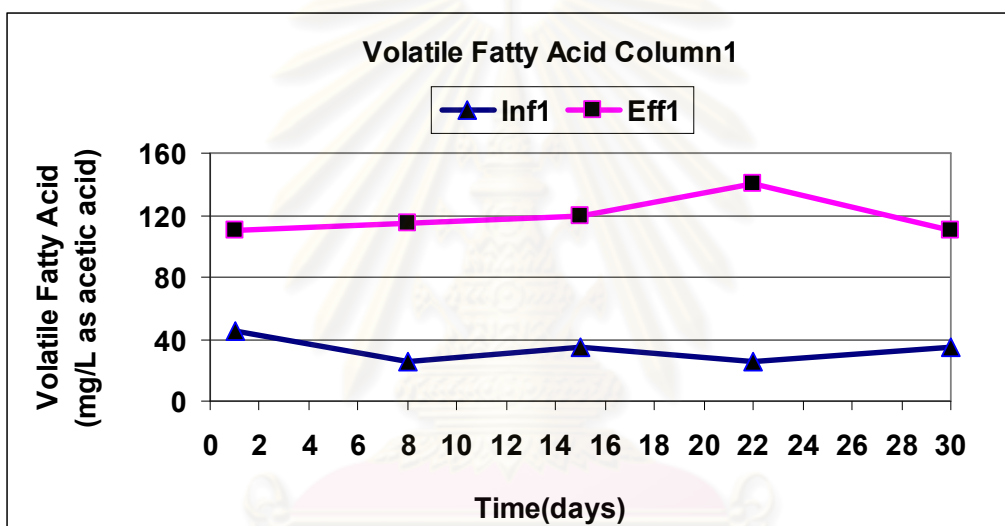
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.15 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองช่วงที่ 2

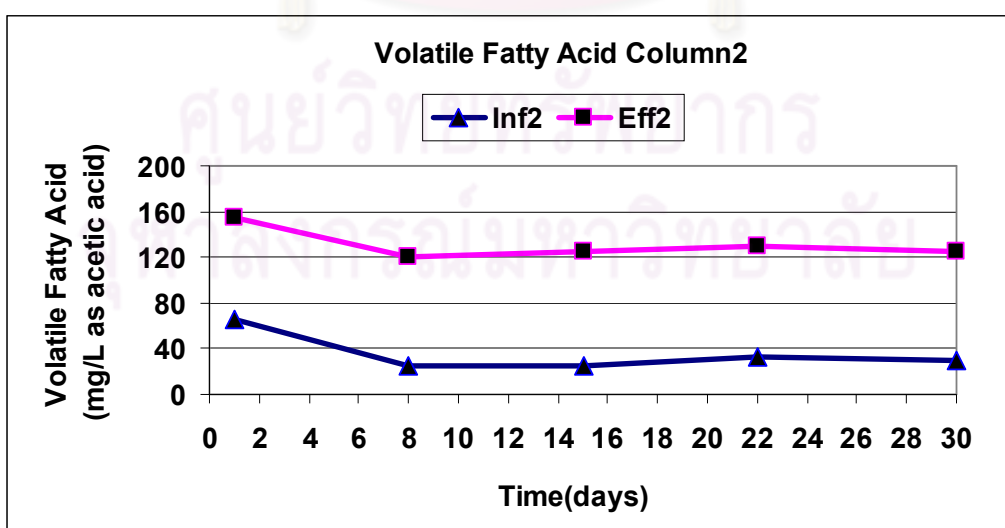
จากภาพที่ 4.15 พบว่าค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำออกระบบมีค่ามากกว่าในน้ำเข้าระบบซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 ส่วนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบมีการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) ลงไปในน้ำที่เตรียมเพื่อเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับระบบเช่นเดียวกัน โดยมีไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ที่เกิดขึ้นเป็นตัวทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นได้

4.1.2.4 กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid)

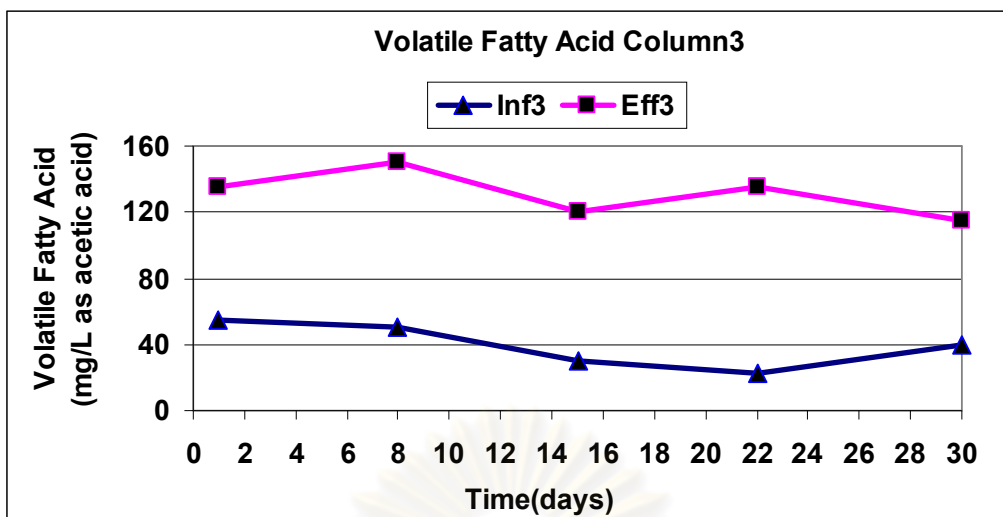
กรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ซีไอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 33, 36 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 119, 131 และ 131 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.16



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีไอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



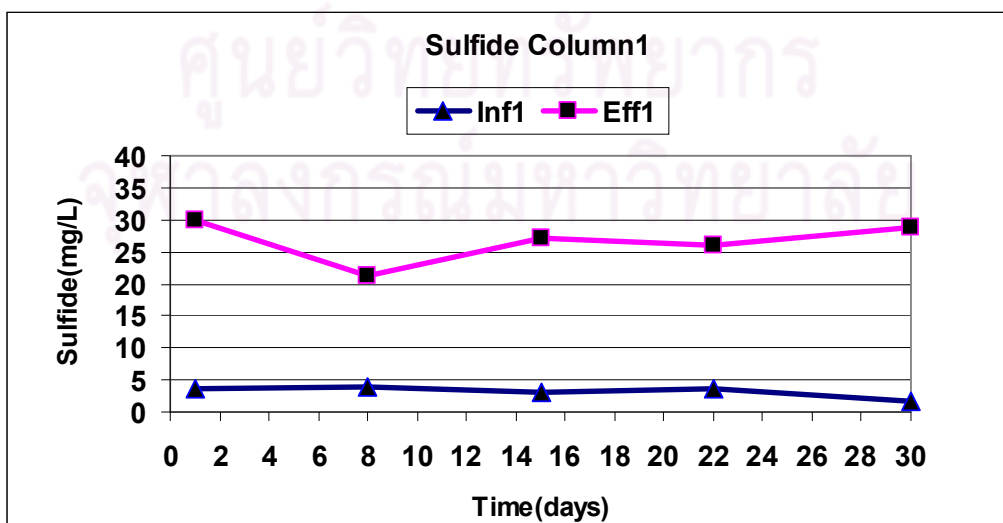
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีไอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.16 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 2

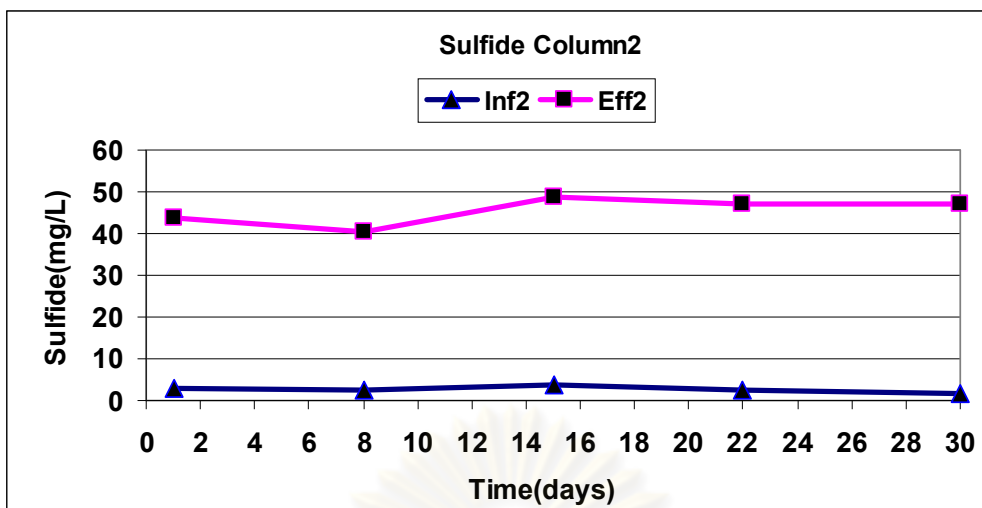
จากภาพที่ 4.16 พบว่าค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำออกทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบ จากการคำนวณอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดช่วงการทดลองที่ 2 ถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.34, 0.37 และ 0.36 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับในการทดลองช่วงที่ 1

4.1.2.5 ซัลไฟด์ (Sulfide)

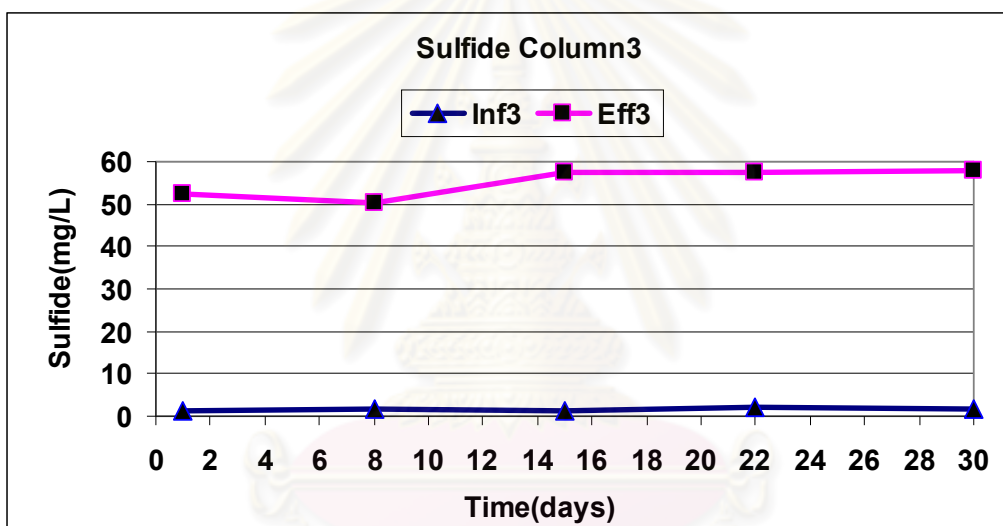
ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ซีไอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 3.2, 2.6 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 26.6, 45.4 และ 55.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.17



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีไอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีโอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

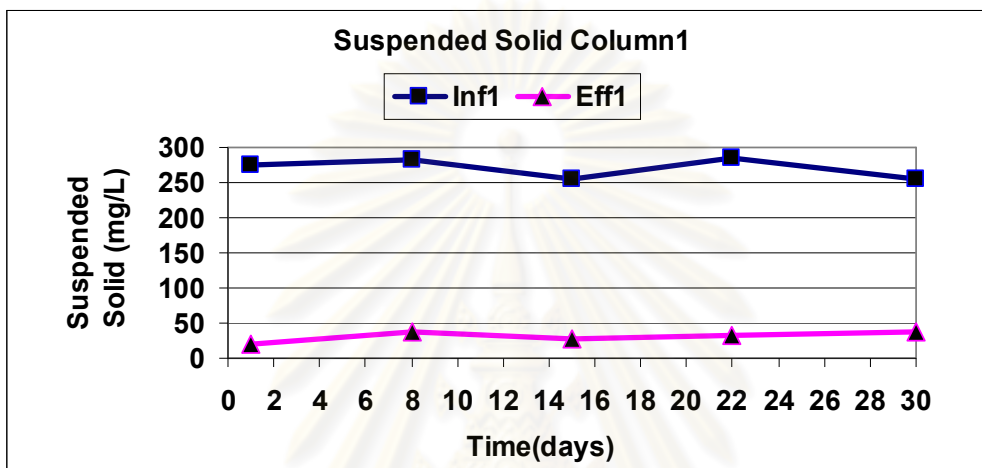
ภาพที่ 4.17 ซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2

จากภาพที่ 4.17 ปริมาณซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 2 ของน้ำออกกระบบมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบแต่มีปริมาณต่ำกว่าความเข้มข้นที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบและไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรีย Conn (1987 อ้างถึงใน McCartney และ Oleszkiewicz, 1993) อธิบายเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มากเกินไปกำหนดไว้ว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่ไซโทพลาสซึมได้ เอนไซม์ภายในเซลล์จะถูก denature โดยการสร้าง sulfide และ disulfide cross-links ระหว่างสายโพลีเปปไทด์ รวมถึงจะเข้าไปรบกวนการทำงานของโคเอ็นไซม์เอ และเอ็ม ทำให้ไม่สามารถใช้สารอาหารได้

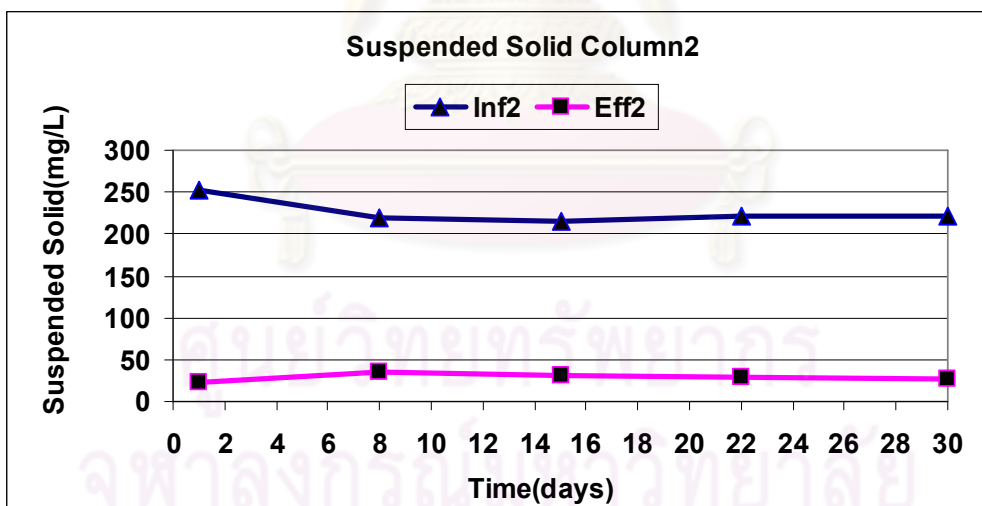
2. พารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไนเตรท (Nitrate) และซัลเฟต (Sulfate)

4.1.2.6 ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

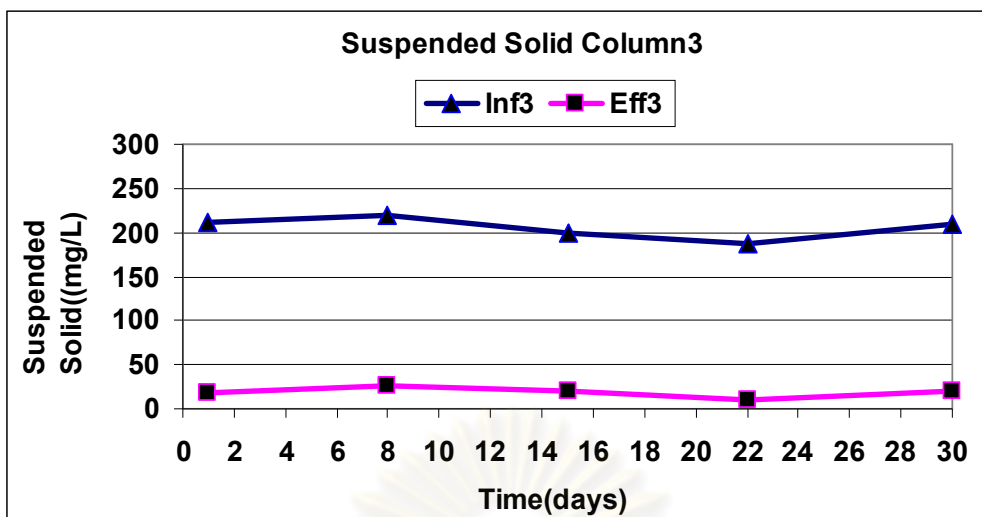
ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ซีไอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 270.1, 226.3 และ 205.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 30.7, 29.0 และ 18.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.17



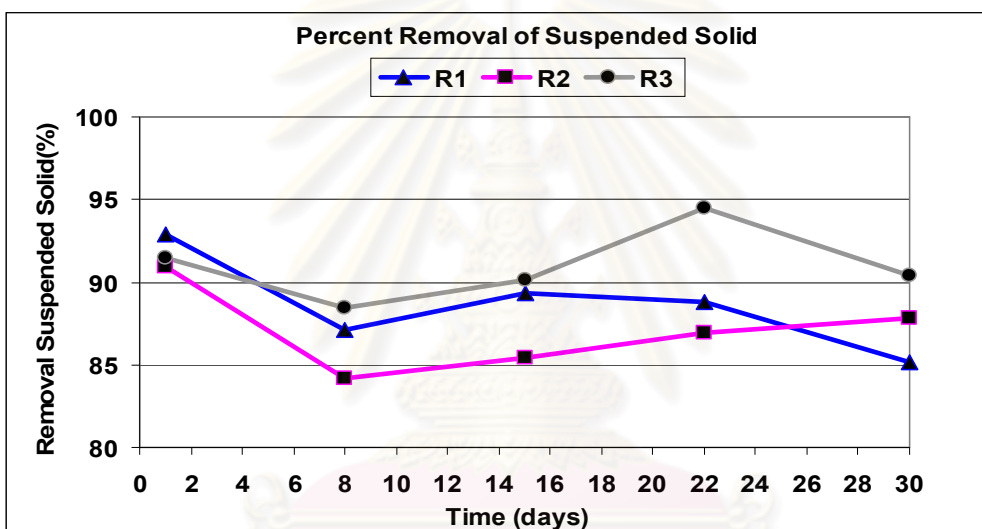
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีไอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีไอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ภาพที่ 4.18 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2

จากภาพที่ 4.18 พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเข้าระบบนั้นมีค่าสูงกว่าในช่วงการทดลองที่ 1 เนื่องจากปริมาณซีไอดีเข้าระบบที่สูงขึ้นกว่าการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อเพิ่มปริมาณซีไอดีให้ระบบจึงส่งผลต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นและเมื่อทำการเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนจากน้ำตาลทรายและแป้งมัน มาเป็นกากแป้งข้าวเจ้าทั้งสามถังปฏิกรณ์จึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบสองคล่องไปในแนวเดียวกัน เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของทั้งสามถังปฏิกรณ์แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2

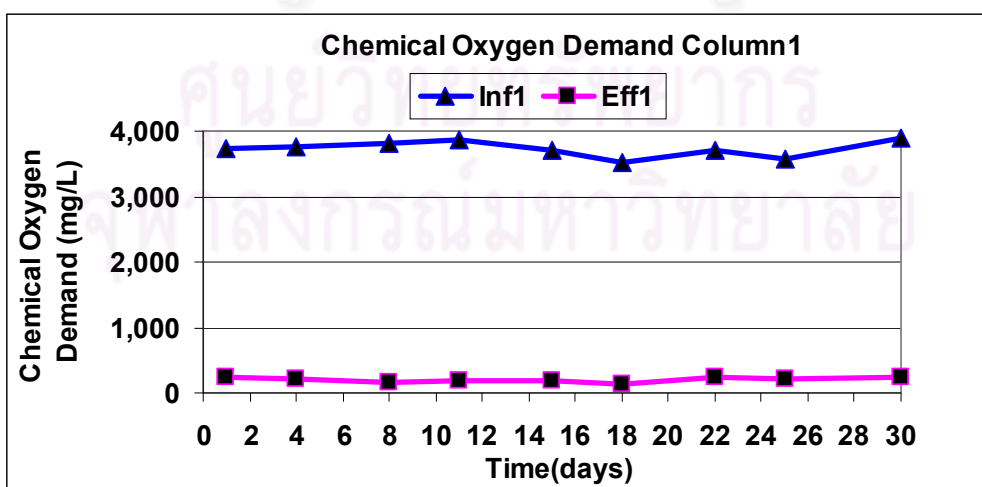
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	254.5	19.5	216.1	23.0	187.7	10.4
ค่าสูงสุด	284.9	37.7	253.4	34.5	218.5	25.2
ค่าเฉลี่ย	270.1	30.7	226.3	29.0	205.3	18.7
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	88.63	-	87.19	-	90.89

4.1.2.7 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) และประสิทธิภาพการบำบัด

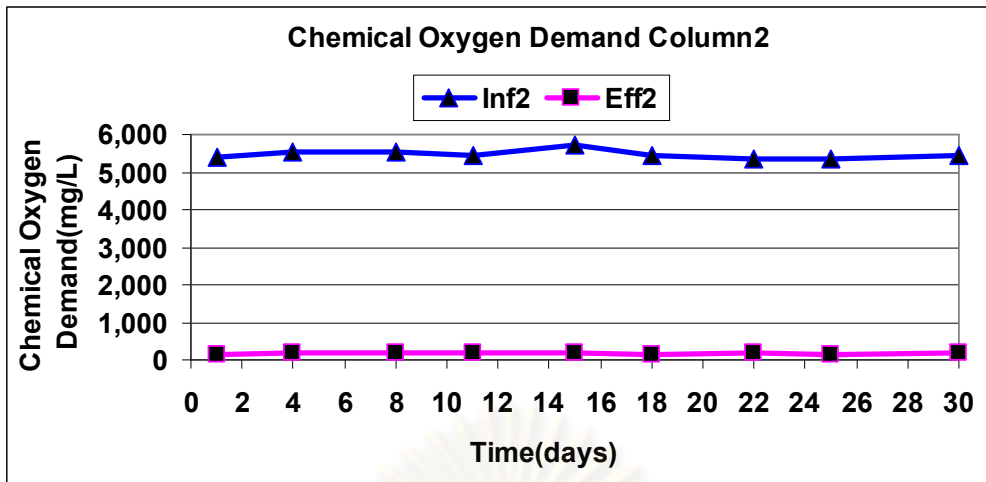
การเตรียมน้ำเสียเข้าระบบในช่วงที่สองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เช่นเดียวกัน แต่มีการกำหนดความเข้มข้นซีโอดีเข้าระบบในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เป็น 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่แหล่งคาร์บอนที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเดียวกัน คือ กากแป้งข้าวเจ้า ซีโอดีเข้า - ออกระบบและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ซีโอดีน้ำเข้า - ออกระบบและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 2

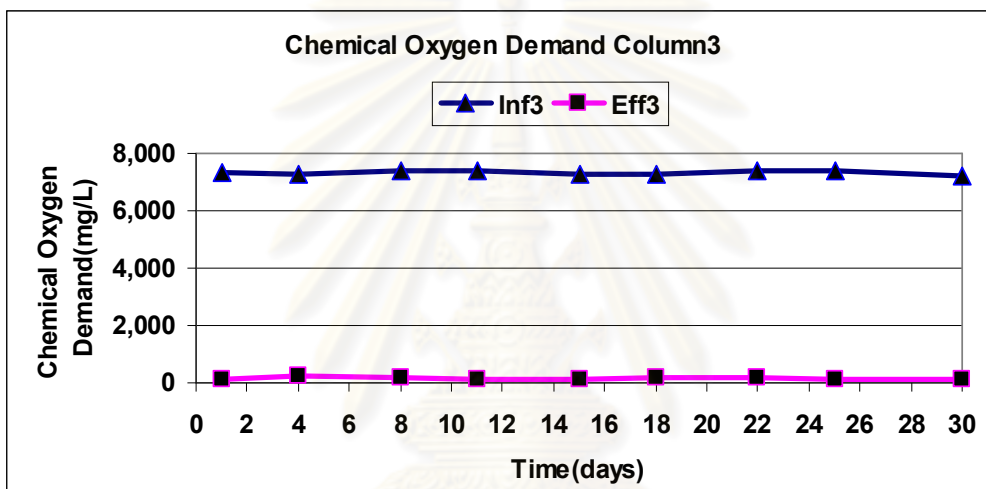
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	3,511	123	5,359	123	7,207	105
ค่าสูงสุด	3,881	249	5,729	192	7,392	249
ค่าเฉลี่ย	3,729	198	5,466	167	7,325	154
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	94.70	-	96.95	-	97.89



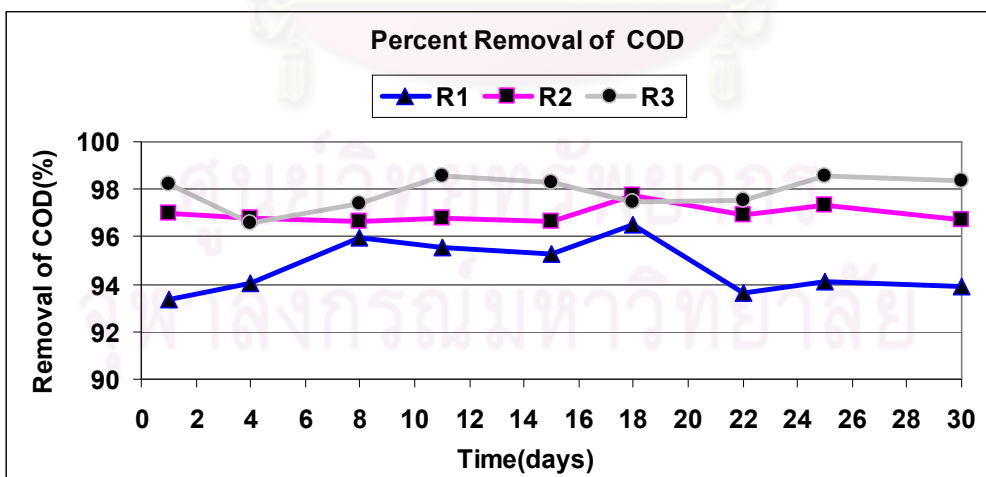
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดของซีไอดีตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ภาพที่ 4.19 ซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณซีไอดีสูงๆนั้น จะต้องทำการปรับลดปริมาตร (dilute) สำหรับการวิเคราะห์ซีไอดี ส่งผลให้ปริมาณซีไอดีเข้าระบบในช่วงแรกๆ มีค่าแปรปรวนสูง แต่เมื่อทำการทดลองไปได้ระยะหนึ่งซีไอดีเข้าระบบจะคงที่มากขึ้น

เนื่องจากผู้วิจัยมีความชำนาญมากขึ้น และเมื่อทดลองไปได้ระยะหนึ่งจุลินทรีย์จะมีการปรับตัวให้เข้ากับน้ำเสียที่มีซีโอดีสูงและแหล่งคาร์บอนใหม่ทำให้ทำงานอยู่ในระบบได้เป็นปกติยิ่งขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าค่อนข้างคงที่และไม่แปรปรวนมากนัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yamaguchi และคณะ (1999) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียในระบบยูเอเอสพีสำหรับน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง ใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพี 2 ถัง โดยถังแรกกำหนดความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตเท่ากับ 2,000 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ถังที่ 2 กำหนดความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตเท่ากับ 2,000 และ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงนั้นเกี่ยวข้องกับการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นหลัก และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีคือ ปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในถังปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงควรรักษาระดับซัลไฟด์ละลายน้ำให้มีค่าต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ในระดับสูง

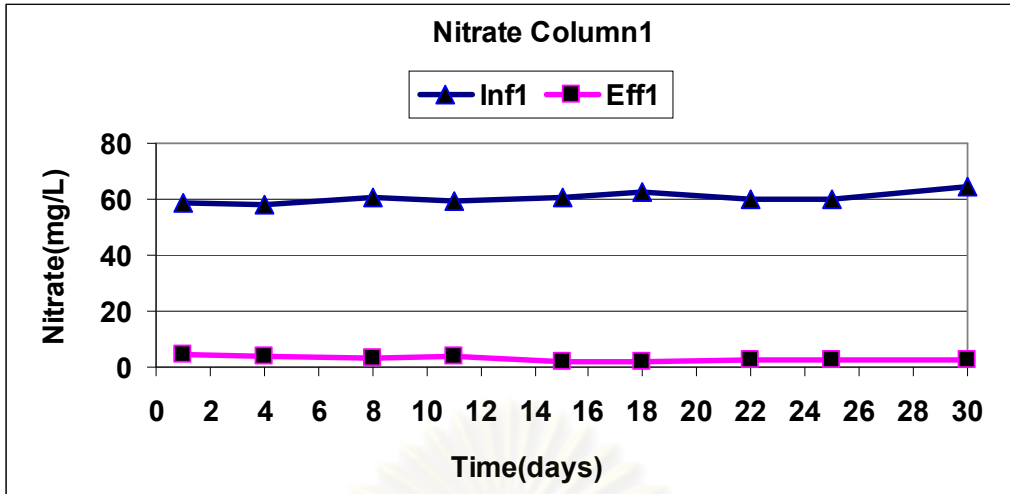
4.1.2.8 ไนเตรท (Nitrate) และประสิทธิภาพการบำบัด

ปริมาณไนเตรทในการทดลองช่วงที่ 2 กำหนดให้คงที่เท่ากับการทดลองในช่วงที่ 1 คือ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนเตรทของน้ำเสี้ยงเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ซีโอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 60.48, 60.44 และ 60.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณไนเตรทของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 2.99, 3.06 และ 2.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.10

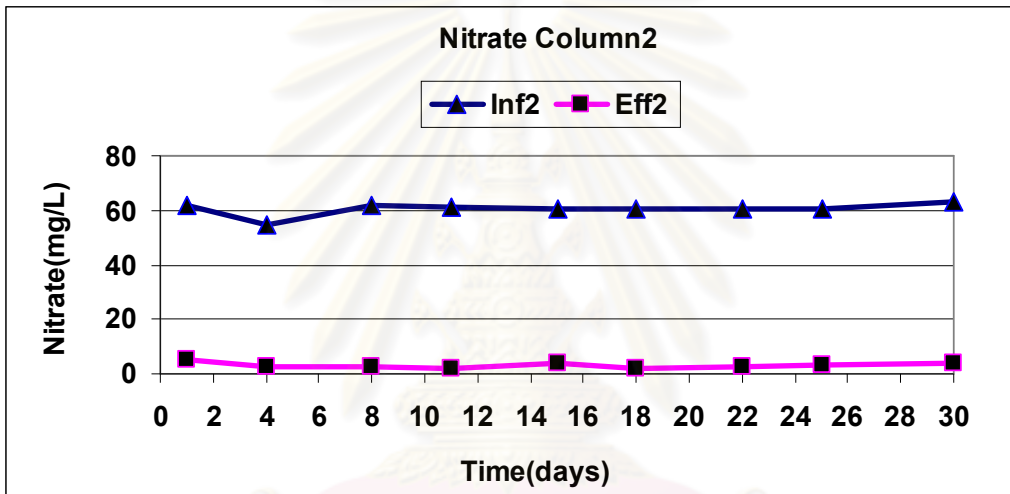
ตารางที่ 4.10 ปริมาณไนเตรทและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2

ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	58.08	2.12	54.62	2.04	58.28	2.16
ค่าสูงสุด	64.32	4.34	63.12	4.90	61.50	4.01
ค่าเฉลี่ย	60.48	2.99	60.44	3.06	60.25	2.77
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	95.03	-	94.94	-	95.40

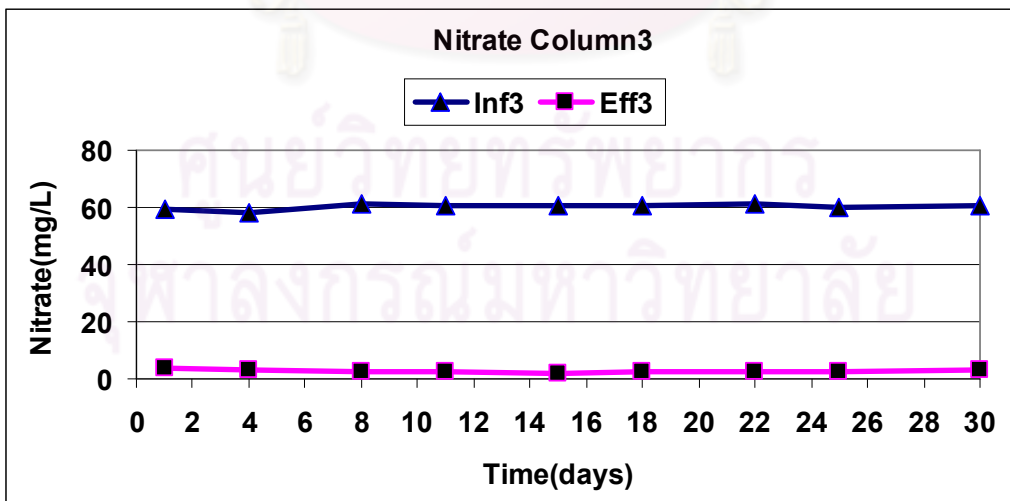
จากการทดลองในช่วงที่ 2 มีการเตรียมน้ำเสียให้ไนเตรทของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากับการทดลองในช่วงที่ 1 ทำให้แบคทีเรียไม่ต้องปรับตัวให้เข้ากับปริมาณไนเตรทมากนักทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทนั้นค่อนข้างคงที่และไม่แปรปรวนมากนัก และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบก็สามารถปรับตัวให้เข้ากับลักษณะและคุณสมบัติของน้ำเสียได้ ทำให้ดำรงชีวิตอยู่และเปลี่ยนรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำเสียได้ ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเสียออกระบบลดลงและระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น



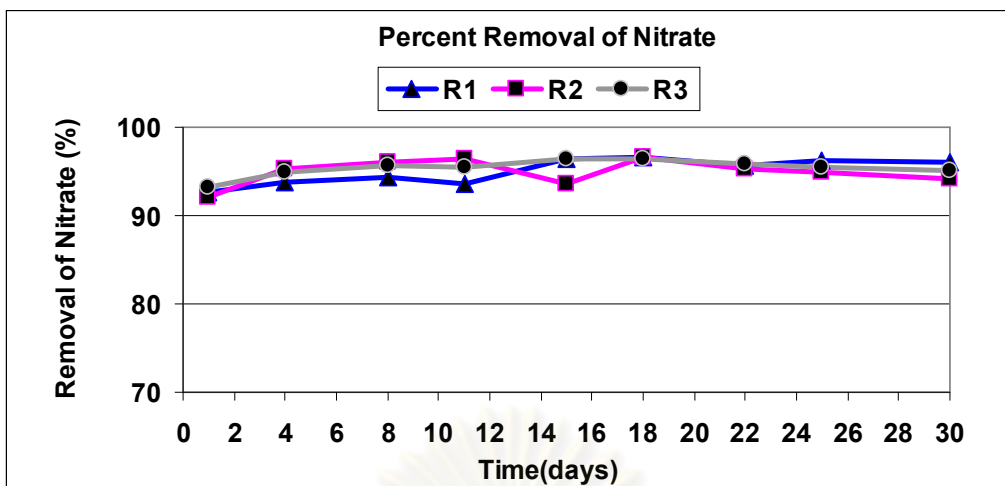
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีโอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดของไนเตรทตลอดการทดลองครั้งที่ 2

ภาพที่ 4.20 ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองครั้งที่ 2

จากภาพที่ 4.20 ปริมาณไนเตรทในระบบในช่วงการทดลองที่ 2 มีค่าเท่ากับในช่วงการทดลองที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทในช่วงการทดลองที่ 1 อยู่ระดับ 97 เปอร์เซ็นต์และในช่วงการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 94 – 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกัน แสดงว่าแบคทีเรียดีในτριฟายอิงสามารถกำจัดไนเตรทที่เติมให้ระบบได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำออกระบบลดลงในระดับใกล้เคียงกัน

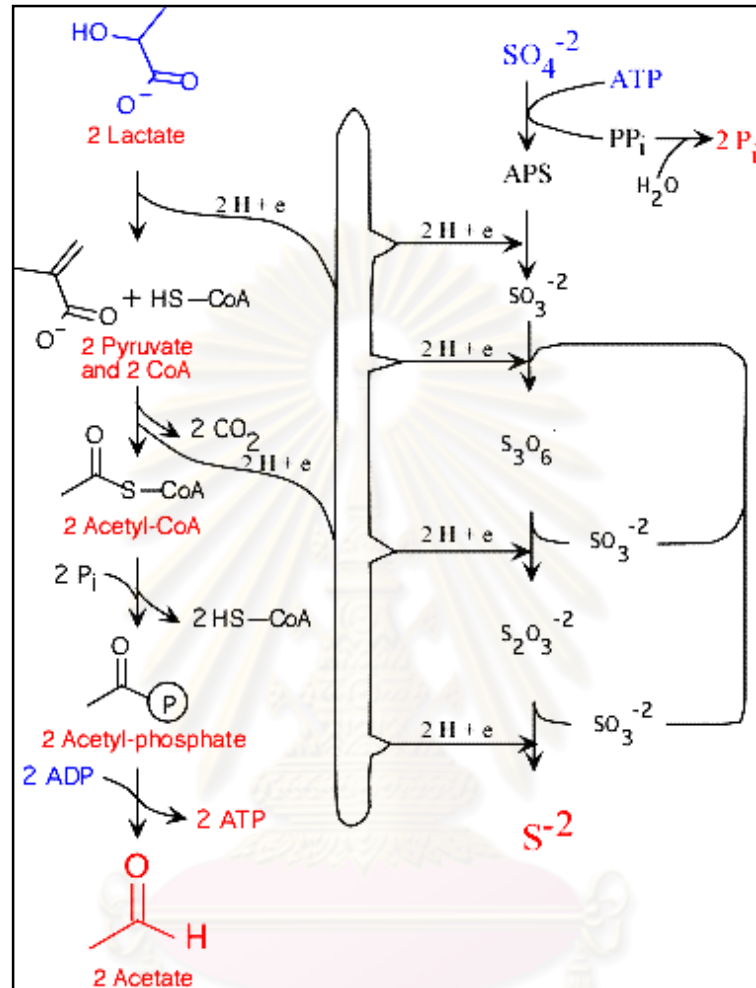
4.1.2.9 ซัลเฟต (Sulfate) และประสิทธิภาพการบำบัด

ปริมาณซัลเฟตในระบบในการทดลองครั้งที่ 2 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 180, 270 และ 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าปริมาณซัลเฟตของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 179.42, 272.97 และ 361.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟตของน้ำออกระบบเฉลี่ยเท่ากับ 45.47, 39.52 และ 51.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.11 ตารางที่ 4.11 ปริมาณซัลเฟตและเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดช่วงการทดลองที่ 2

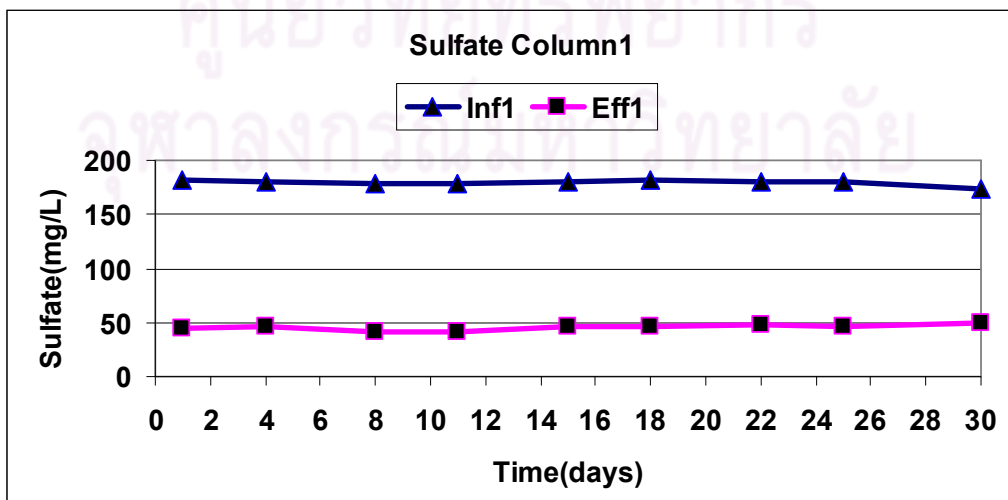
ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2		ถังปฏิกรณ์ที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	172.80	40.80	268.02	32.96	356.00	36.68
ค่าสูงสุด	182.10	49.30	276.54	48.80	368.40	64.08
ค่าเฉลี่ย	179.42	45.47	272.97	39.52	361.08	51.72
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	74.64	-	85.53	-	85.67

จากการทดลองเมื่อมีการเติมซัลเฟตให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซัลเฟตจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Sulfate reduction) โดยกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิด (Genus) ผลจากปฏิกิริยานี้ (Visser, 1994) จะทำให้เกิดการกำจัด

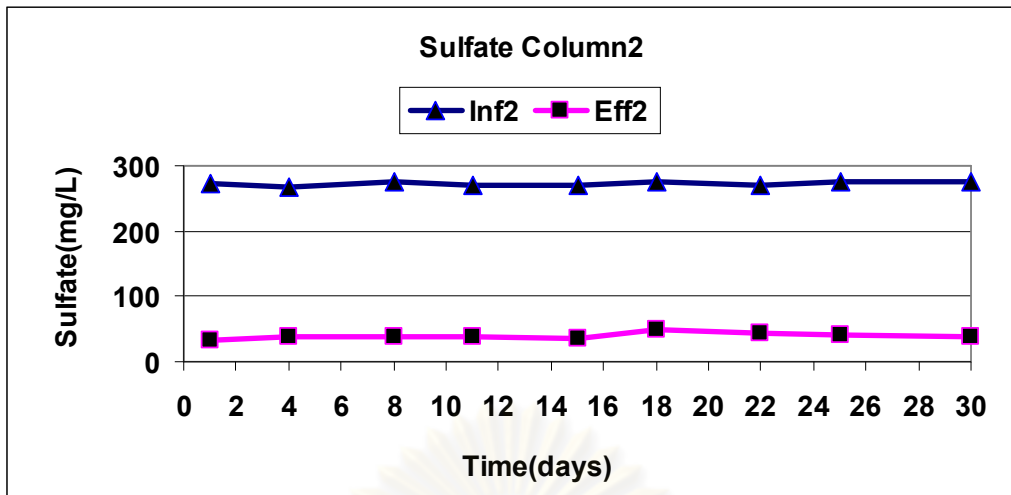
ซีโอดี และมีซัลไฟด์ในน้ำทิ้งทำให้เกิดกลิ่นเหม็น, การสร้างก๊าซมีเทนจะลดลง, ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะตกตะกอนกับโลหะหนัก (Metal Sulfide) ทำให้เกิดการกำจัดโลหะหนักในระบบได้ และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดการกำจัดซัลเฟตและซัลไฟด์ซึ่งเป็นพิษต่อระบบอีกด้วย



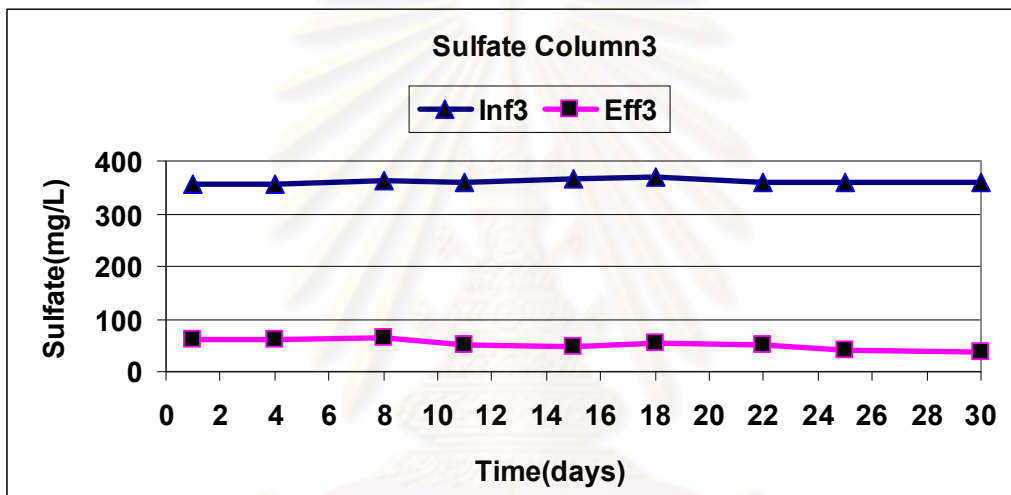
ภาพที่ 4.21 ปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชัน



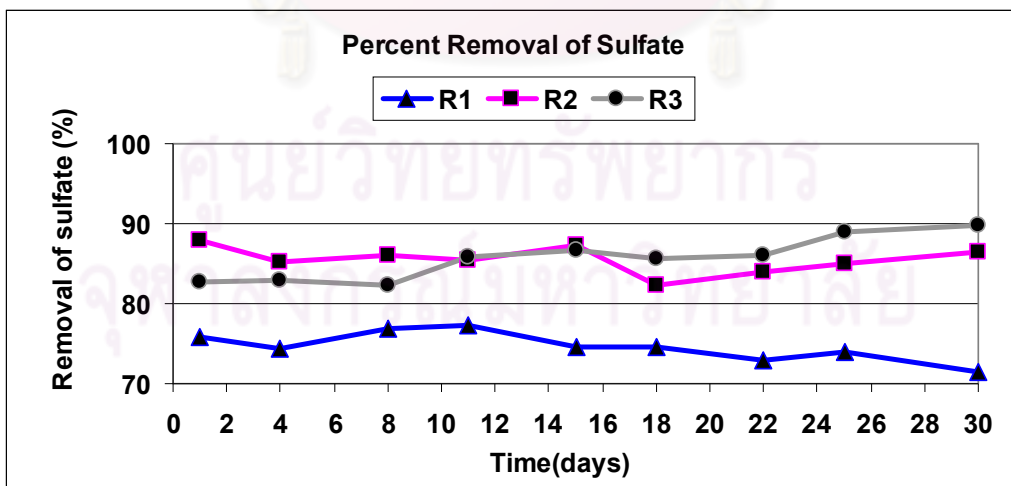
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 5,400 มิลลิลิตรต่อลิตร



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีไอดี 7,200 มิลลิลิตรต่อลิตร



(ง) ประสิทธิภาพการบำบัดของซัลเฟตตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ภาพที่ 4.22 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2

จากภาพที่ 4.22 เห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้าระบบจาก 90 มิลลิลิตรต่อลิตรมาเป็น 180, 270 และ 360 มิลลิลิตรต่อลิตร ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3

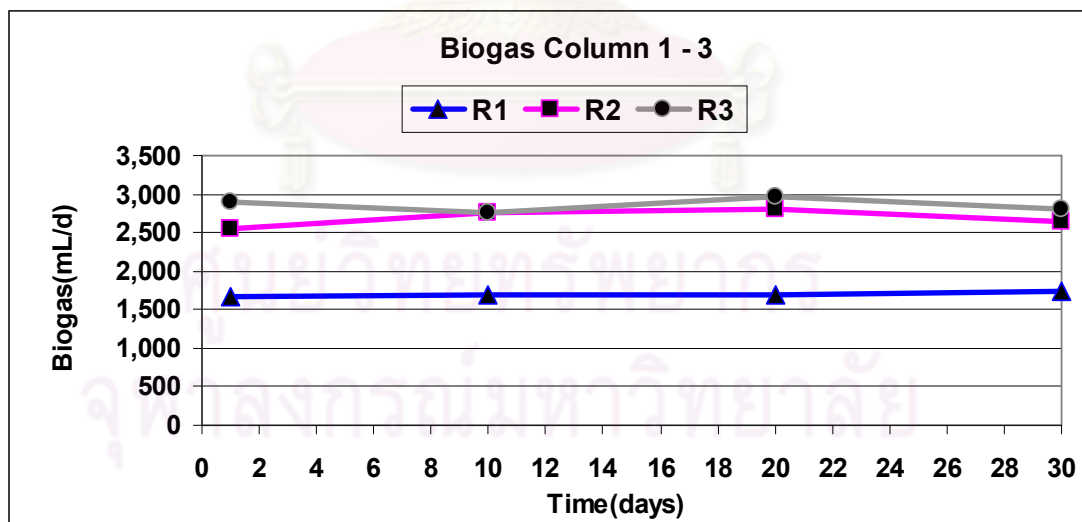
ตามลำดับ ทำให้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากในช่วงที่ 1 เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตสูง (20.0:1) และปริมาณซัลเฟตที่เติมลงไปในระบบมีเพียงพอกับความต้องการของแบคทีเรียที่ทำให้ซัลเฟตในระบบมีอยู่อย่างไม่จำกัด แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแต่ละกลุ่มไม่ต้องแย่งใช้ซัลเฟตกันเอง จึงคาดว่าสารอินทรีย์ในระบบจะถูกย่อยสลายจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ส่วนจะเกิดขึ้นจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโคเนติกของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต แต่พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายไม่สมบูรณ์มีอัตราสูงกว่า

4.1.2.10 ก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพของน้ำเสียสังเคราะห์จากถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ซีโอดีเท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,702, 2,867 และ 2,872 มิลลิตรต่อวัน ตามลำดับ แสดงดังตาราง 4.12 และภาพที่ 4.23

ตารางที่ 4.12 ปริมาณก๊าซชีวภาพช่วงการทดลองที่ 2

ก๊าซชีวภาพ (มิลลิตรต่อวัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
ค่าต่ำสุด	1,660	2,560	2,950
ค่าสูงสุด	1,750	2,800	2,860
ค่าเฉลี่ย	1,702	2,867	2,872



ภาพที่ 4.23 ก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ผลการทดลองช่วงที่ 2 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์ ที่ 3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้นและระบบมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 1 แต่ปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มสูงขึ้นจากน้ำเข้าระบบนั้น มีผลต่อการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนในระบบด้วย

4.2 ศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

4.2.1 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับระบบ

1) แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Producing Bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรฟ ดำรงชีวิตได้โดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบคทีเรียชนิดนี้จะเจริญเติบโตช้าและเลือกชนิดของอาหารมาก

ตารางที่ 4.13 ชนิดของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Madigan และคณะ, 1997)

Genus	Shape
Group I	
<i>Methanobacterium</i>	Long rods
<i>Methanobrevibacter</i>	Short rods
<i>Methanosaera</i>	Cocci
Group II	
<i>Methanothermus</i>	Rods
Group III	
<i>Methanococcus</i>	Irregular cocci
Group IV	
<i>Methanomicrobium</i>	Short rods
<i>Methanogenium</i>	Irregular cocci
<i>Methanospirillum</i>	Spirilla
<i>Methanoplanus</i>	Plate-shaped cell-occurring as thin plates with sharp edges
Group V	
<i>Methanosarcina</i>	Large Irregular cocci in packets
<i>Methanobolus</i>	Irregular cocci in aggregates
<i>Methanoculleus</i>	Irregular cocci
<i>Methanohalobium</i>	Irregular cocci
<i>Methanococcoides</i>	Irregular cocci
<i>Methanohalophilus</i>	Irregular cocci
<i>Methanotherix (Methanosaeta)</i>	Long rods to filaments

ตารางที่ 4.13 (ต่อ) ชนิดของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Madigan และคณะ, 1997)

Genus	Shape
Group VI	
<i>Methanopyrus</i>	Rods in chains
Group VII	
<i>Methanocorpusculum</i>	Irregular cocci

2) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนชนิดดีดขาด จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรทรอป สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ได้

ตารางที่ 4.14 ชนิดของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Gottschalk และคณะ, 1986)

Genus	Shape
Group I: Nonacetate oxidizers	
<i>Desulfovibrio</i>	Vibrio
<i>Desulfomicrobium</i>	Oval/Rod
<i>Desulfobotulus</i>	Vibrio
<i>Desulfotomaculum</i>	Straight or curved rods
<i>Desulfomonile</i>	Rods
<i>Desulfobacula</i>	Oval to coccoids cells
<i>Archaeoglobus</i>	Sphere
<i>Desulfobulbus</i>	Ovoid or lemon-shaped cells
<i>Thermodesulfo bacterium</i>	Small Rods
Group II: Acetate oxidizers	
<i>Desulfobacter</i>	Oval/Vibrio
<i>Desulfobacterium</i>	Oval
<i>Desulfococcus</i>	Spherical cells
<i>Desulfonema</i>	Multicell filaments
<i>Desulfosarcina</i>	Oval (aggregates)
<i>Desulfoarculus</i>	Vibrio
<i>Desulfacinum</i>	Cocci to oval-shaped cells
<i>Desulforhabdus</i>	Rods
<i>Thermodesulforhabdus</i>	Rods

3) แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Denitrifying Bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนชนิดได้ขาด จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรป สามารถรีดิวซ์ไนเตรทให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้

ตารางที่ 4.15 ชนิดของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Wang และคณะ, 2005)

Genus	Shape	Genus	Shape
<i>Achromobacter</i>	Short rods	<i>Lactobacillus</i>	Short rods
<i>Aerobacter</i>	Short rods	<i>Micrococcus</i>	coccoid
<i>Alcaligenes</i>	Short rods	<i>Proteus</i>	coccoid
<i>Bacillus</i>	Short rods	<i>Pseudomonas</i>	Short rods
<i>Brevibacterium</i>	Short rods	<i>Spirillum</i>	Spirilla
<i>Flavobacterium</i>	Short rods	<i>Paracoccus denitrificans</i>	coccoid

ในงานวิจัยนี้ใช้ Anaerobic Sludge จากโรงงานผลิตเส้นไหมโซเอียงเพื่อเริ่มต้นระบบ เม็ดตะกอนลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ขนาดประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร สีน้ำตาลเข้มและสีดำปะปนกัน ทำการตรวจสอบลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยการเลือกตัวอย่างเม็ดตะกอนที่เป็นตัวแทนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลายๆ เม็ดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM)

4.2.2 ขนาดและโครงสร้างภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

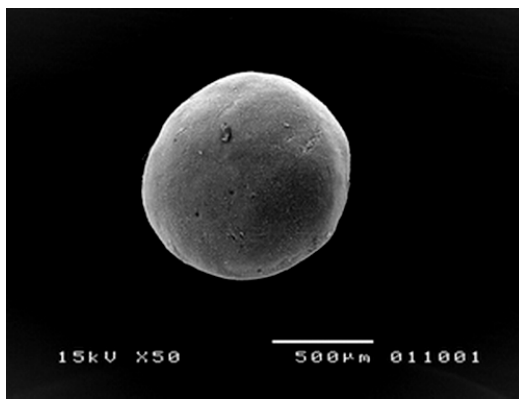
จากการศึกษาขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอนที่กำลังขยายขนาด 50 เท่า พบว่ารูปร่างของเม็ดตะกอนมีทั้งแบบทรงกลมและทรงรี แต่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวเรียบ ขนาดประมาณ 50,000 ไมครอน หลังการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าผิวเม็ดตะกอนมีความขรุขระมากขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรีย นอกจากนี้บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ยังพบรอยแตกที่เกิดจากการฟูก่อนระหว่างการเคลื่อนตัวกระทบและเสียดสีกันของเม็ดตะกอนภายในระบบ

หลังการทดลองช่วงที่ 1 ขนาดเม็ดตะกอนถึงปฏิกรณ์ที่ 1 (น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน) ขนาดเท่ากับเมื่อเริ่มต้นระบบ คือ 50,000 ไมครอน ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน) และถึงปฏิกรณ์ที่ 3 (กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน) ขนาดจะลดลงจากเมื่อเริ่มต้นระบบเหลือเพียง 44,250 และ 48,100 ไมครอน ตามลำดับ สาเหตุที่เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถึงปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 เล็กลงนั้น อาจเกิดจากการปรับตัวของเม็ดตะกอนให้เข้ากับแหล่งคาร์บอนโมเลกุลใหญ่อย่างแป้งมันและกากแป้งข้าวเจ้านั้นทำได้ยากกว่าการปรับตัวให้เข้ากับน้ำตาลทราย เนื่องจากจะต้องใช้เวลาในการย่อยเพื่อเปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กนั้นใช้เวลานานกว่า

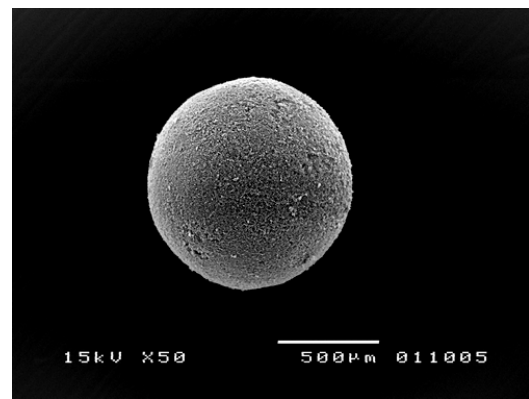
ทำให้จุลินทรีย์นำสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตได้น้อยและช้าลงส่งผลให้ขนาดเม็ดตะกอนเล็กลงได้ แต่เมื่อดำเนินการทดลองต่อเนื่องมาในช่วงที่ 2 โดยเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนในทั้งสามถึงปฏิกรณ์ให้เป็นกากแป้งข้าวเจ้า พบว่าขนาดเม็ดตะกอนถึงปฏิกรณ์ที่ 1 กลับมีขนาดเล็กลงคือเท่ากับ 46,150 ไมครอน ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าช่วงการทดลองที่ 1 คือ 46,150 และ 53,900 ไมครอน ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใหญ่ขึ้นอาจเนื่องมาจากถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ยังคงใช้แหล่งคาร์บอนเป็นสารจำพวกแป้งเช่นเดียวกับในช่วงที่ 1 ทำให้แบคทีเรียไม่ต้องปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียมากนักจึงสามารถนำไปใช้ได้ตามปกติ ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ขนาดเม็ดตะกอนใหญ่ขึ้นกว่าเมื่อเริ่มต้นระบบ สาเหตุอาจเกิดจากการใช้แหล่งคาร์บอนต่อเนื่องมาตลอดการทดลอง ส่งผลให้เม็ดตะกอนเจริญเติบโตได้ดีเพราะไม่ต้องทำการปรับตัวให้ในการนำสารอาหารไปใช้



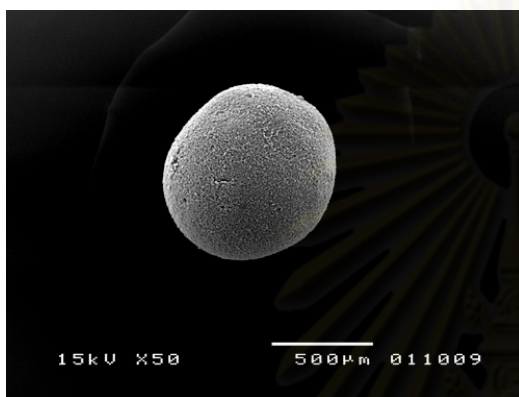
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



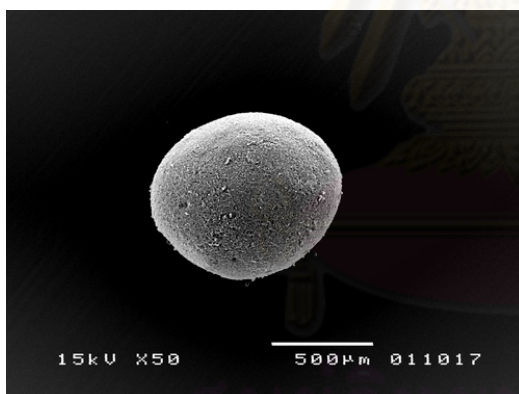
(ข)



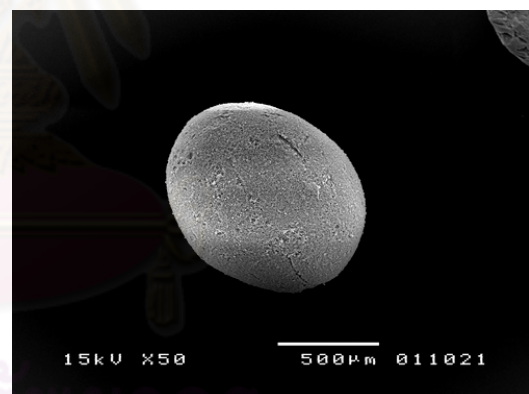
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

ภาพที่ 4.24 ขนาดและโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 50 เท่า)

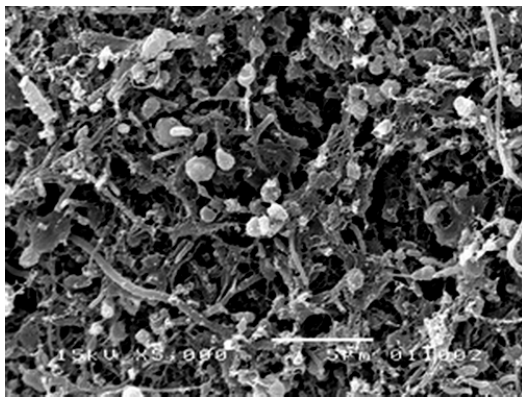
4.2.3 บริเวณผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จากการศึกษาบริเวณผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า เมื่อเริ่มต้นระบบพบว่าบริเวณผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แบคทีเรียที่พบมีความหลากหลายต่ำและลักษณะของแบคทีเรียยังไม่สมบูรณ์มากนัก

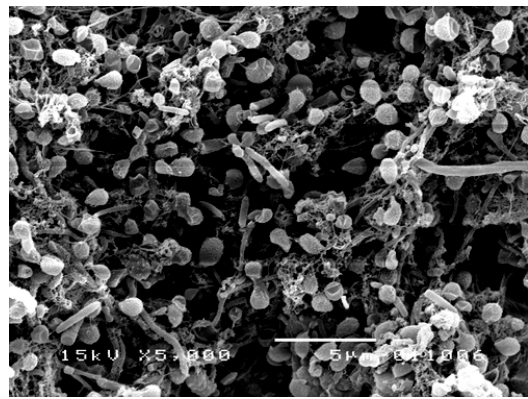
หลังสิ้นสุดการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าโครงสร้างของเม็ดตะกอนมีความชัดเจนยิ่งขึ้น ดังปฏิกรณ์ที่ 1 (น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน) พบแบคทีเรียที่มีรูปร่างกลมเพิ่มจำนวนมากขึ้น ลักษณะของแบคทีเรียสมบูรณ์และมีขนาดใหญ่ โดยอาจเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทน เช่น *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Methanosphaera* และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เช่น *Desulfobulbus* และ *Desulfobacula* เป็นต้น ดังปฏิกรณ์ที่ 2 (แบ่งมันเป็นแหล่งคาร์บอน) พบแบคทีเรียสร้างมีเทนแบบแท่งสั้น เช่น *Methanobrevibacter* และ *Methanomicrobium* แบคทีเรียสร้างมีเทนแบบแท่งยาว เช่น *Methanobacterium*, *Methanotrinx* (*Methanosaeta*) และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เช่น *Desulforhabdus* และ *Achromobacter* เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับในถังปฏิกรณ์อื่นๆ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 3 (กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน) พบแบคทีเรียรูปร่างกลมเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกับในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และนอกจากนี้ยังพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตรูปทรงเกลียวสั้น (*Vibrio*) เช่น *Desulfobotulus* และ *Desulfoarculus* อีกด้วย

หลังสิ้นสุดการทดลองช่วงที่ 2 เปลี่ยนแหล่งคาร์บอนเป็นกากแป้งข้าวเจ้าทั้งสามถังปฏิกรณ์ พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 3 จะพบแบคทีเรียแบบแท่งสั้นและแท่งยาวจำนวนมากขึ้น โดยอาจเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทน เช่น *Methanobrevibacter*, *Methanomicrobium*, *Methanobacterium* และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เช่น *Desulfotomaculum* นอกจากนี้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 พบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตรูปทรงเกลียวสั้น (*Vibrio*) เช่น *Desulfobotulus* และ *Desulfoarculus* อีกด้วย ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 พบแบคทีเรียแบบกลมเป็นส่วนใหญ่อาจเป็นพวก *Methanococcus*, *Methanosaera* เป็นต้น

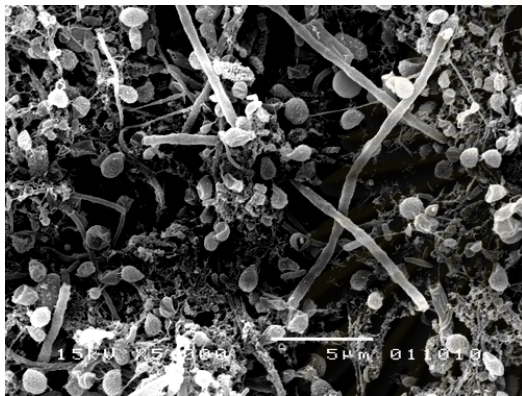
นอกจากนี้ทั้งสามถังปฏิกรณ์ยังพบแบคทีเรียแบบเส้นใยเพิ่มจำนวนมากขึ้นและสานกันแน่นเพื่อช่วยในการยึดเกาะสำหรับการสร้างเม็ดตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกด้วย



(ก)



(ข)



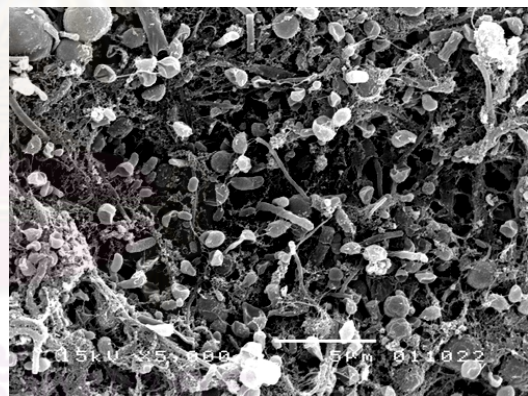
(ค)



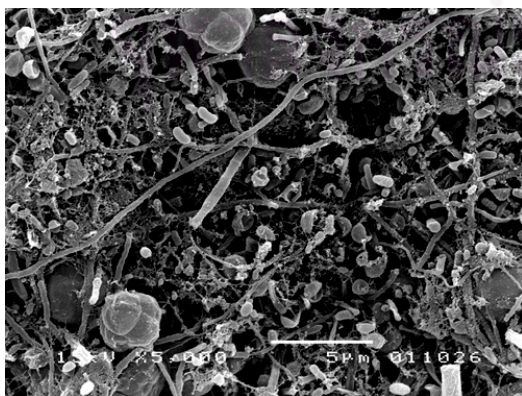
(ง)



(จ)

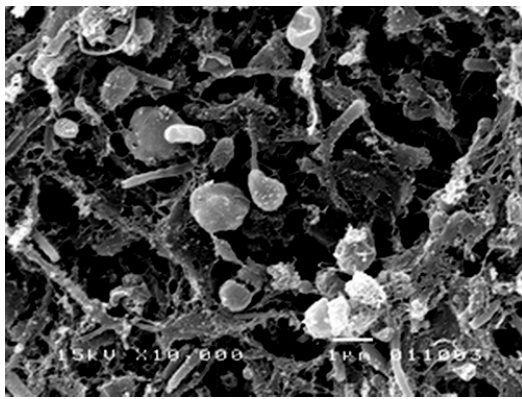


(ฉ)

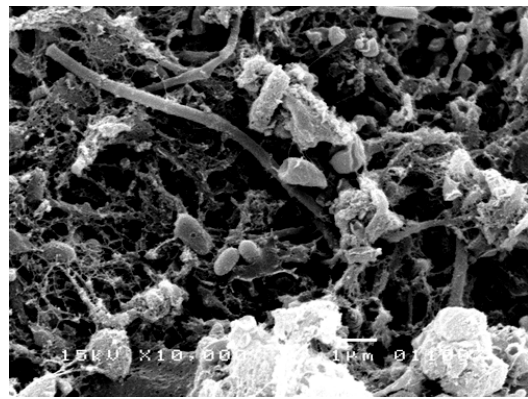


(ช)

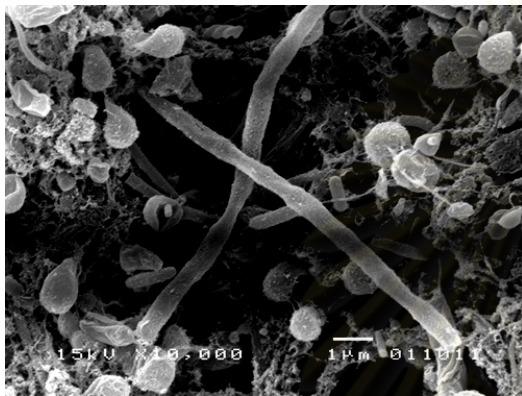
ภาพที่ 4.25 บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 5,000 เท่า)



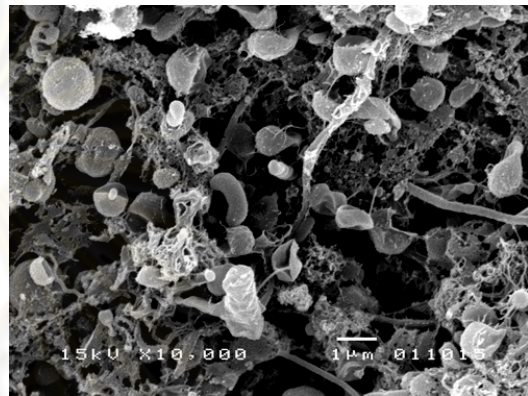
(ก)



(ข)



(ค)



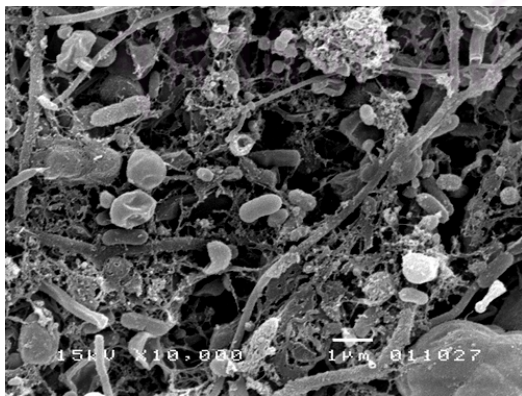
(ง)



(จ)



(ฉ)

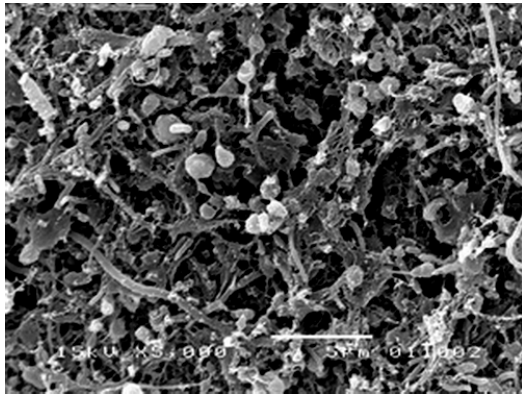


(ช)

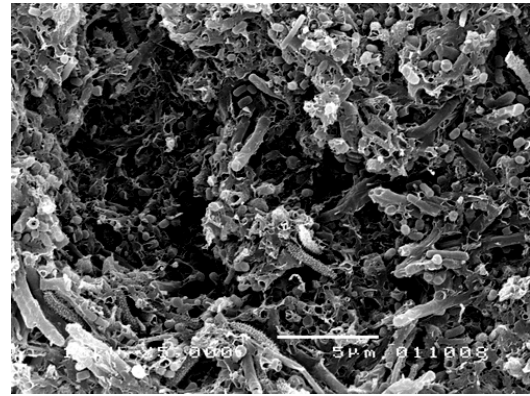
ภาพที่ 4.26 บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

4.2.4 บริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งซีก

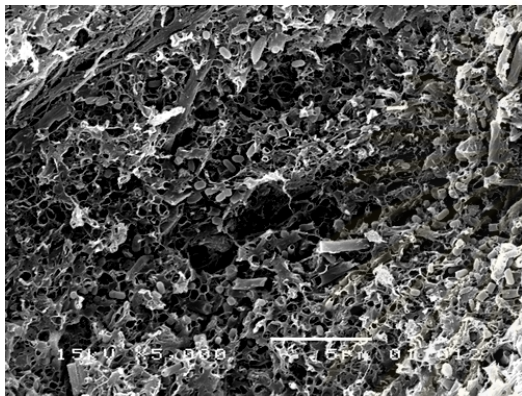
ศึกษาบริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งซีกที่กำลังขยายขนาด 5,000 เท่า เมื่อเริ่มต้นระบบและหลังการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ทุกถึงปฏิกรณ์ พบว่าขนาดของแบคทีเรียที่พบมีขนาดเล็ก ความหลากหลายของแบคทีเรียค่อนข้างต่ำและแบคทีเรียอยู่กันอย่างกระจายตัว แบคทีเรียที่มีน้ำหนักเบาและจมตัวไม่ค่อยดีจะหลุดออกจากระบบได้ง่ายดังนั้นบริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนนี้จะต้องสร้างแบคทีเรียแบบเส้นใยจำพวก *Methanothrix* (*Methanosaeta*) ให้มีจำนวนมากขึ้นเพื่อช่วยในการยึดเกาะกันและสามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นได้ ซึ่งการรวมตัวกันโดยอาศัยการยึดเกาะด้วยแบคทีเรียที่เป็นเส้นใยนี้ทำให้โครงสร้างของแบคทีเรียมีความแข็งแรงขึ้นสามารถทนอยู่ในระบบที่มีแรงเฉือนหรือความปั่นป่วนภายในระบบได้ ยกเว้นในถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ช่วงการทดลองที่ 2 พบแบคทีเรียแบบกลมจำนวนมาก อาจจะเป็นแบคทีเรียจำพวก *Methanosaera* และ *Desulfobulbus* เป็นต้น นอกจากนี้ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งสามถึงปฏิกรณ์ ยังพบโพรทิสต์ขนาดใหญ่จำนวนมากซึ่งเป็นผลจากการหลุดออกของก๊าซที่เม็ดแบคทีเรียผลิตได้



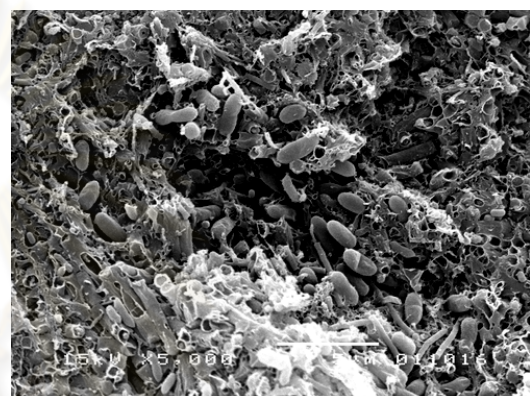
(ก)



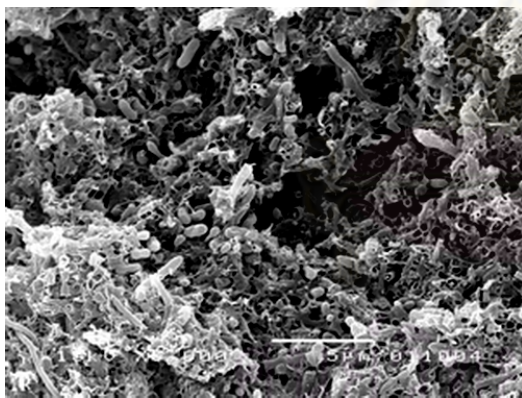
(ข)



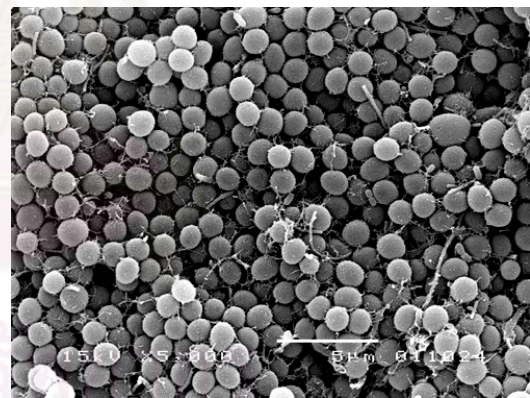
(ค)



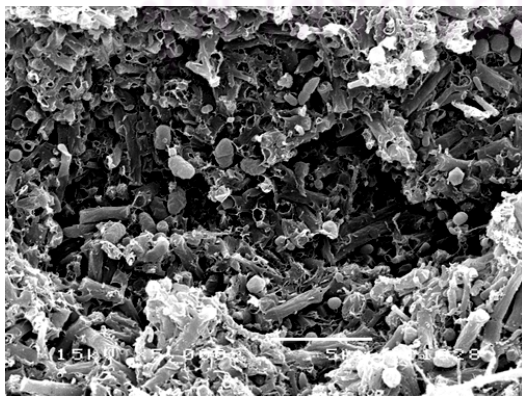
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

ภาพที่ 4.27 บริเวณผิวชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งซีก (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

หมายเหตุ: จากภาพที่ 4.25-4.28

- ก. เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นระบบ
- ข. หลังช่วงการทดลองที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน
- ค. หลังช่วงการทดลองที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน
- ง. หลังช่วงการทดลองที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน
- จ. หลังช่วงการทดลองที่ 2 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฉ. หลังช่วงการทดลองที่ 2 ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ช. หลังช่วงการทดลองที่ 2 ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ซีโอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Particle Size Analyzer)

การทดลองศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำการวิเคราะห์เมื่อเริ่มต้นการทดลองและสิ้นสุดการทดลองโดยทำการเก็บตัวอย่างตะกอนตามระดับความสูงของชั้นตะกอนจากกันถึงที่ระดับความสูง 0, 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วนำมารวมกันก่อนทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer อาศัยหลักการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของเม็ดตะกอนด้วยระบบเซ็นเซอร์ที่ส่องแสงมากระทบกับอนุภาค ขณะที่เม็ดตะกอนถูกสูบลไหลผ่านเลนส์ อนุภาคที่มีรูปร่างกลมหรือค่อนข้างกลมจะถูกวัดเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริง ขณะที่อนุภาคที่เป็นฟลอคซึ่งมีรูปร่างหลากหลายจะถูกตั้งสมมติฐานว่ามีรูปร่างกลมและคำนวณกลับเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้เป็นตัวแทนของฟลอค เมื่อทำการวิเคราะห์มักเกิดปัญหา คือ ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมักจะแตกต่างกันและข้อจำกัดขนาดของเลนส์ที่สามารถวัดได้ทำให้จุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กมากหรือใหญ่มากไม่สามารถอยู่ในช่วงที่เลนส์ที่วัดได้ เม็ดตะกอนเหล่านั้นก็จะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้องมากนัก เครื่องจะสามารถวัดขนาดเม็ดตะกอนที่ขนาดใหญ่ได้มากที่สุดเพียง 0.9 มิลลิเมตร

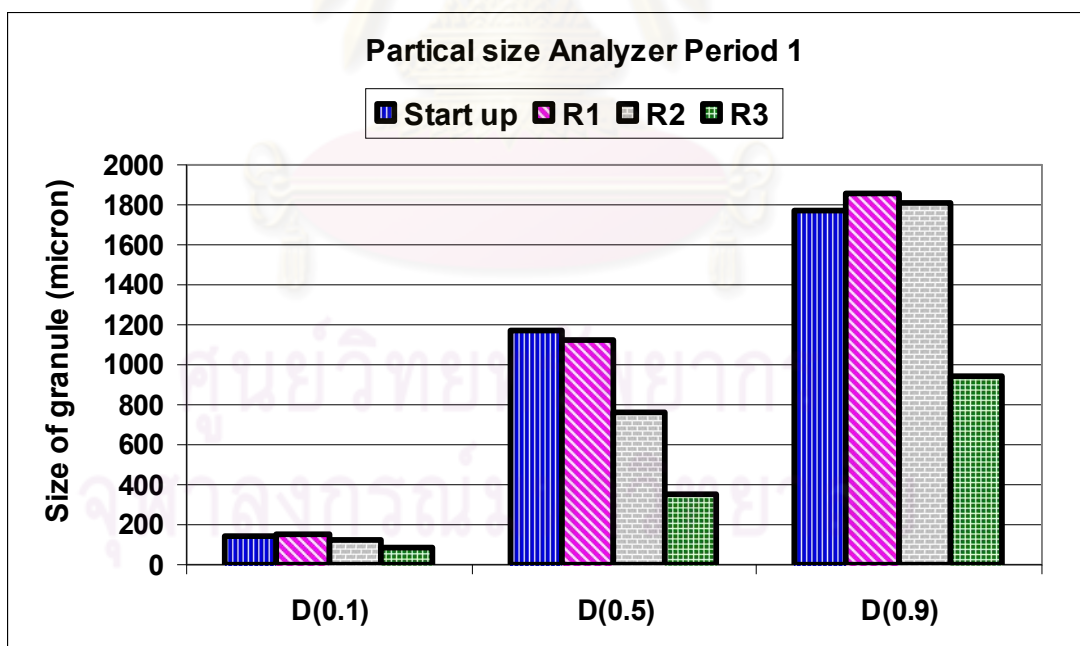
ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองโดยเลือกค่า D(0.1) หรือ D10, D(0.5) หรือ D50 และ D(0.9) หรือ D90 ซึ่งเป็นขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ปริมาณ 10, 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามลำดับ การศึกษาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนนี้ทำให้ได้ช่วงข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียว และสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ช่วงเริ่มต้นระบบแสดงดังตารางที่ 4.16 และขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ช่วงการทดลองที่ 1 และช่วงการทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.17 และการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แสดงดังภาพที่ 4.29 และการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แต่ละถึงปฏิกรณ์แสดงดังภาพที่ 4.30

ตารางที่ 4.16 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นระบบ

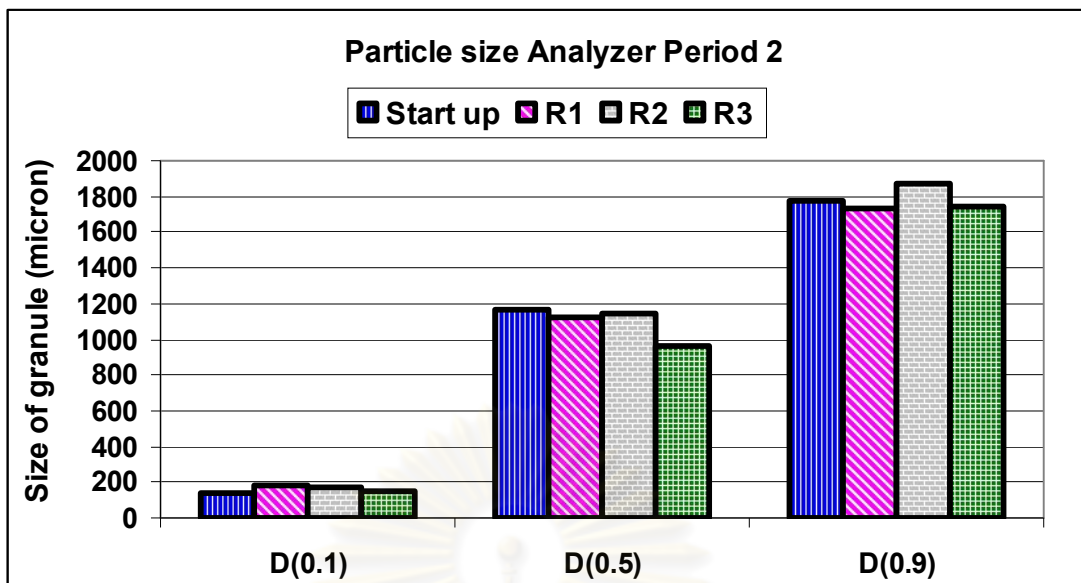
การวิเคราะห์	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ไมครอน)		
	D(0.1)	D(0.5)	D(0.9)
เริ่มต้นระบบ	140.63	1,171.00	1,771.26

ตารางที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ช่วงการทดลองที่ 1 และ 2

ช่วงที่	ถึงปฏิกรณ์ (R)	การวิเคราะห์	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ไมครอน)		
			D(0.1)	D(0.5)	D(0.9)
1	1	น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน	154.62	1,124.06	1,857.14
	2	แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน	123.88	760.27	1,809.49
	3	กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน	83.64	350.20	939.71
2	1	ซีโอดี 3,600 mg/L	182.76	1,123.30	1,737.16
	2	ซีโอดี 5,400 mg/L	172.31	1,142.83	1,873.90
	3	ซีโอดี 7,200 mg/L	147.70	964.24	1,742.66



(ก) หลังการทดลองช่วงที่ 1



(ข) หลังการทดลองครั้งที่ 2

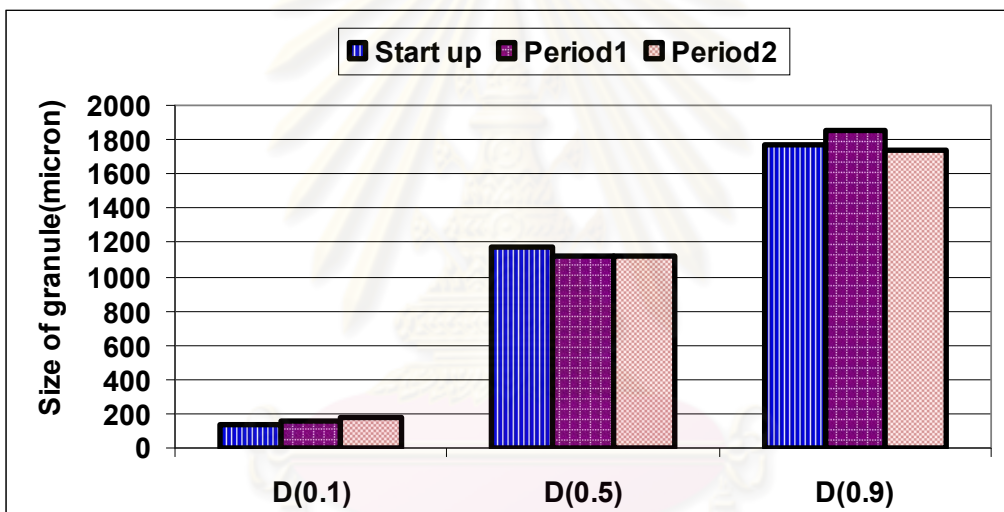
ภาพที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง

จากตารางที่ 4.16 - 4.17 และภาพที่ 4.29 ที่ระดับ D(0.1) การทดลองครั้งที่ 1 พบว่าขนาดของเม็ดตะกอนถึงปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีขนาดเล็กลง สาเหตุอาจมาจากจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอยู่ในช่วงการปรับตัวให้คุ้นเคยกับสิ่งแวดล้อมใหม่ (ระยะ Lag phase) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำตาลทราย แป้งมัน และกากแป้งข้าวเจ้าเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น จุลินทรีย์จะใช้สารที่มีโมเลกุลเล็กอย่างน้ำตาลทรายได้ง่ายกว่าแป้ง โดยปกติแบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์เพื่อเพิ่มพลังงาน ช่วยสร้างส่วนประกอบเซลล์ ช่วยในการเจริญเติบโตและใช้ในกิจกรรมต่างๆ และถ้าสารอินทรีย์มีปริมาณไม่เพียงพอหรือแบคทีเรียไม่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมได้จะทำให้แบคทีเรียไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ส่งผลให้เม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กแตกออก เกิดการฟุ้งกระจายจนไม่สามารถคงอยู่ในระบบได้ แต่การฟุ้งกระจายที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลดีต่อระบบโดยจะทำให้เกิดการคัดเลือกพันธุ์ เม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กจะถูกกำจัดออกจากระบบจนเหลือแต่เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ส่วนในช่วงการทดลองที่ 2 ระดับ D(0.1) นี้พบว่าขนาดของเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการทดลองในช่วงที่ 1 เนื่องจากระบบมีสภาวะความคงตัวมากขึ้น แบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับแหล่งคาร์บอนและความเข้มข้นซีไอดีที่เหมาะสมและทำให้เม็ดตะกอนเจริญเติบโตดีที่สุด และนอกจากนี้ยังเกิดการจัดเรียงตัวกันของเม็ดตะกอนตามความหนาแน่นอีกด้วย โดยเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูง (ขนาดใหญ่) จะเรียงตัวอยู่ทางด้านล่างของถังขึ้นไปหาขนาดเล็ก

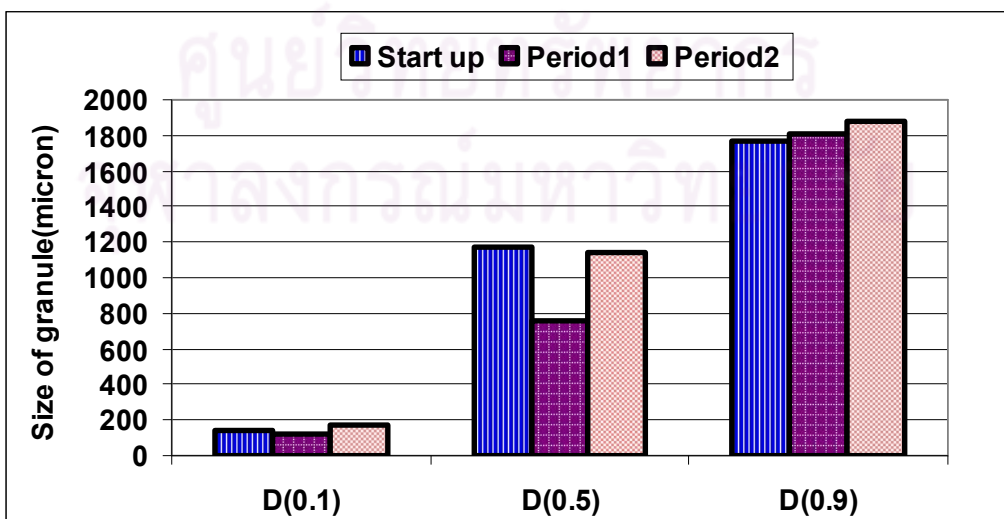
ในระดับที่ D(0.5) ช่วงการทดลองที่ 1 พบว่าเม็ดตะกอนขนาดกลางของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าลดลงจากเมื่อเริ่มต้นระบบ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียในการแย่งสารอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ไม่เพียงพอสำหรับความต้องการในการเจริญเติบโต

และเมื่ออยู่ในระดับที่สูงขึ้นตะกอนจะมีลักษณะเป็นฟlocsมากขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดจากปริมาณก๊าซที่สร้างจากเม็ดตะกอนฟุ้งกระจายเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการชนกันระหว่างเม็ดตะกอนและตกกลับลงมาในระดับต่ำกว่าได้ ส่วนช่วงการทดลองที่ 2 ระดับ D(0.5) นี้ขนาดของเม็ดตะกอนของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับช่วงการทดลองที่ 1 ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ขนาดของเม็ดตะกอนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าช่วงการทดลองที่ 1

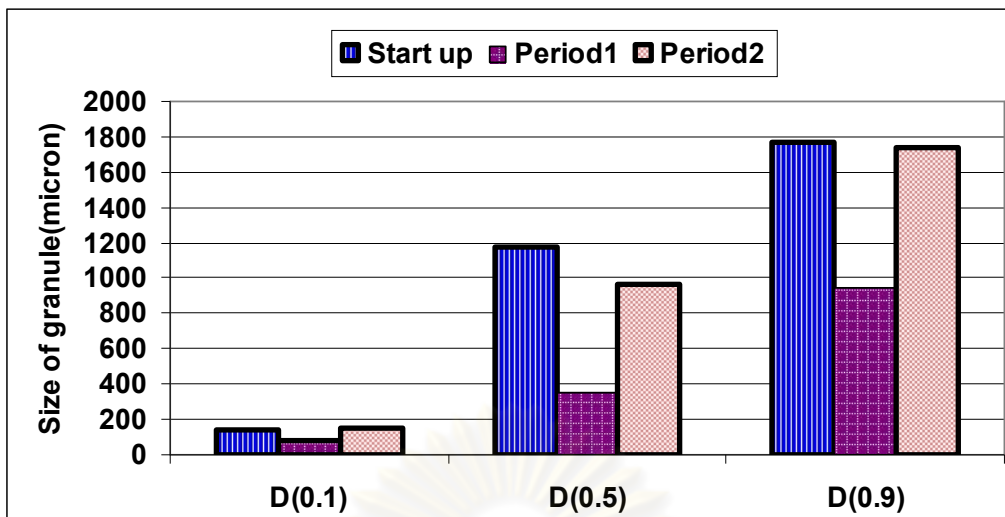
ในระดับที่ D(0.9) ช่วงการทดลองที่ 1 พบว่าขนาดของเม็ดตะกอนในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเริ่มต้นระบบ ยกเว้นในถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีขนาดเล็กลงอาจเนื่องมาจากกากแบ่งข้าวเจ้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนในถังปฏิกรณ์นี้จุลินทรีย์ยังไม่คุ้นเคยและสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ค่อนข้างน้อยทำให้ขนาดเม็ดตะกอนลดลง แต่เมื่อทำการทดลองในช่วงที่ 2 เม็ดตะกอนในทุกถังสามารถปรับตัวให้เข้ากับแหล่งคาร์บอนใหม่ที่เป็นกากแบ่งข้าวเจ้าได้แล้ว ส่งผลให้ขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับนี้มีขนาดใกล้เคียงกับเมื่อเริ่มต้นระบบ



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 3

ภาพที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ

4.3.1 เปอร์เซนต์ของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์

เมื่อทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (% Particle Size) ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง (Particle Size Analyzer) ที่ช่วงขนาดต่างๆ เพื่อดูว่าในแต่ละถังปฏิกรณ์มีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในช่วงขนาดใดมากที่สุด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.18 เปอร์เซนต์ของช่วงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1

ขนาดเม็ดตะกอน (ไมครอน)	% Particle Size			
	Start up	ถังปฏิกรณ์1	ถังปฏิกรณ์2	ถังปฏิกรณ์ 3
น้อยกว่า 301.68	16.93	18.26	27.43	44.04
301.68-477.01	1.00	4.08	10.43	19.10
477.01-754.23	5.53	8.00	11.88	19.36
754.23-1,192.56	28.41	24.21	19.30	13.42
1,192.56-1,885.64	41.36	36.27	22.54	4.08

ตารางที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์ของช่วงขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2

ขนาดเม็ดตะกอน (ไมครอน)	% Particle Size		
	ถึงปฏิกรณ์ 1	ถึงปฏิกรณ์ 2	ถึงปฏิกรณ์ 3
น้อยกว่า 301.68	15.31	15.55	18.08
301.68-477.01	3.48	3.29	6.41
477.01-754.23	8.67	8.76	13.10
754.23-1,192.56	28.05	25.89	27.23
1,192.56-1,885.64	38.63	36.85	28.68

จากตารางที่ 4.18 พบว่า เปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของช่วงก่อนเริ่มต้นระบบมากที่สุดที่ช่วงขนาด 1,192.56-1,885.64 ไมครอนที่ 41.36 และการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาด 1,192.56-1,885.64 ไมครอนอยู่ที่ 36.27 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แบ่งมันเป็นแหล่งคาร์บอน จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาดน้อยกว่า 301.68 ไมครอน อยู่ที่ 27.43 เปอร์เซ็นต์ และถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแบ่งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาดขนาดน้อยกว่า 301.68 ไมครอน เช่นเดียวกัน อยู่ที่ 44.04 เปอร์เซ็นต์

ส่วนในตารางที่ 4.19 การทดลองช่วงที่ 2 พบว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ซีโอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาด 1,192.56-1,885.64 ไมครอน อยู่ที่ 38.63 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ซีโอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาด 1,192.56-1,885.64 ไมครอน อยู่ที่ 36.85 เปอร์เซ็นต์ และในถึงปฏิกรณ์ที่ 3 จะมีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุดที่ช่วงขนาด 1,192.56-1,885.64 ไมครอน อยู่ที่ 28.68 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 จะเป็นถึงที่มีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใหญ่ที่สุดทั้ง 2 ช่วงการทดลอง และก่อนเริ่มต้นระบบ แสดงว่าเกิดการพัฒนาของขนาดเม็ดตะกอนสูง แต่เมื่อพิจารณาในถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งใช้แหล่งคาร์บอนอย่างกากแบ่งข้าวเจ้าซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตแบ่งมาใช้แทนน้ำตาลทรายแล้วก็พบว่ามีการพัฒนาขนาดเม็ดตะกอนจากที่มีขนาดน้อยกว่า 301.68 ไมครอนมาเป็น 1,192.56-1,885.64 ไมครอนได้ แสดงว่าการนำแหล่งคาร์บอนแหล่งใหม่มาใช้ทดแทนแหล่งคาร์บอนราคาแพงอย่างน้ำตาลทรายก็สามารถช่วยให้เกิดการสร้างและพัฒนาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับนำไปใช้ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีในโรงงานอุตสาหกรรมได้

4.3.2 ของแข็งแขวนลอยระเหย (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids: VSS หรือ MLVSS)

ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (VSS หรือ MLVSS) แสดงถึง ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นจึงใช้บอกความเข้มข้นของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ได้ และนอกจากนี้ยังช่วยในการออกแบบค่าอายุตะกอนในระบบได้อีกด้วย สามารถคำนวณได้จาก น้ำหนักเมื่อทำการระเหยแห้งของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นระบบและตลอดระยะเวลาทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.20

สูตรคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยระเหย} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง(มิลลิลิตร)}}$$

หมายเหตุ

หน่วยของแข็งแขวนลอยระเหย กรัมวีเอสเอสต่อลิตร

A = น้ำหนักของแข็งแขวนลอยก่อนเผา + ถ้วยกระเบื้องเคลือบ + กระดาษกรอง

B = น้ำหนักของแข็งแขวนลอยหลังเผา + ถ้วยกระเบื้องเคลือบ + กระดาษกรอง

ตารางที่ 4.20 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยตลอดการทดลอง

ช่วงการทดลอง	ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหย VSS (กรัมวีเอสเอสต่อลิตร)		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 3
เริ่มต้น	-	66.16	66.16	66.16
1	30	39.75	37.09	39.39
	55	47.13	42.87	45.82
	80	53.11	65.06	57.78
	105	64.86	79.16	68.79
2	135	66.25	80.15	69.72

จากตารางที่ 4.20 หลังจากเริ่มต้นระบบ-55 วัน พบว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์ จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เนื่องมาจากการที่จุลินทรีย์อยู่ในช่วงการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในระบบ เช่น ลักษณะของสารในน้ำเสียหรือแหล่งคาร์บอนที่ให้กับระบบ ทำให้จุลินทรีย์บางส่วนที่ไม่สามารถปรับตัวได้เกิดการตายลงและย่อยสลายไป หรือเกิดจากการที่จุลินทรีย์ไม่สามารถรวมตัวกันให้เป็นเม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักมากได้ ทำให้ถูกพัดออกไปกับน้ำออกระบบ ส่งผลให้ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ภายในระบบมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ Particle size ในช่วงการทดลองที่ 1 จากงานวิจัยของ Hulshoff Pol และคณะ (1983) ที่ศึกษาการเกิดเป็น

เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าในช่วงเริ่มต้นระบบตะกอนจุลินทรีย์จะหลุดออกนอกระบบได้ง่าย โดยจะลอยออกมาพร้อมกับน้ำที่ไหลล้น เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะทำให้ชั้นตะกอนล่างขยายตัว ส่งผลให้ตะกอนหลุดออกจากระบบได้ง่าย ถือเป็นอาการคัดเลือกพันธุ์จุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งจะพัฒนาต่อไปให้มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้นและสามารถคงอยู่ในระบบต่อไปได้ แต่เมื่อระยะเวลา 80 – 135 วัน เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพในระบบได้ดีขึ้นพบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ภายในระบบบำบัดมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้นทำให้ภายหลังจากการหาค่าของแข็งแขวนลอยระเหยจึงได้มวลน้ำหนักหลังการเผาเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนและน้ำหนักของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์นั่นเอง



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การวิจารณ์ผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี (การทดลองช่วงที่ 1)

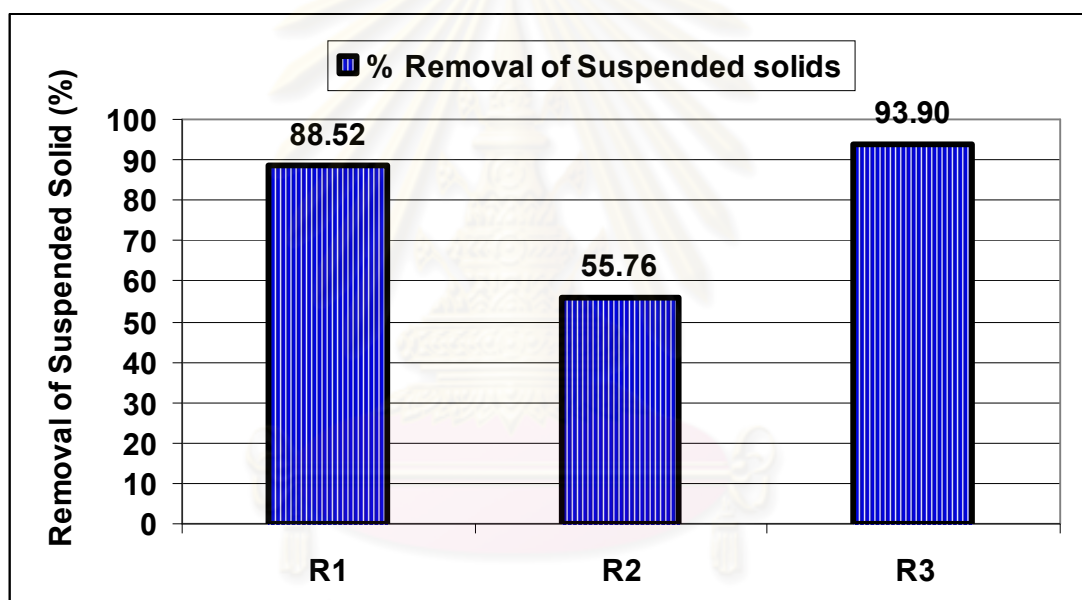
จากการทดลอง กำหนด R1 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน

R2 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน

R3 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน

4.4.1 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัด

จากการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนแตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกรณ์และกำหนดค่าซีไอดีเท่ากับ 600, 1,200, 1,800 และ 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นไนเตรทและซัลเฟตเท่ากับ 60 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 88.52, 55.76 และ 93.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.30 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยช่วงการทดลองที่ 1

ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย คือ ค่าของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำยาก อยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอย และยังใช้ในการบอกความสกปรกของน้ำเสียได้อีกด้วย ของแข็งแขวนลอยก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ปริมาณของแข็งแขวนลอย สัดส่วนของแข็งแขวนลอยที่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ขนาดและพื้นที่ผิว ความหนาแน่นของสารแขวนลอย ความสามารถในการเกาะติดกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ในที่นี้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะหมายถึง แบคทีเรียที่หลุดออกมากับน้ำออกกระบวนเป็นส่วนใหญ่ เห็นได้ว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน และถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยสูงและมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้าง

ต่ำ คือ 55.76 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจมาจากการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นทำได้ยาก เพราะเนื้อของแป้งมันจะเหนียวยึดเกาะกันแน่นและเมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอนได้เร็ว ดังนั้นเมื่อมีการเตรียมน้ำเสียจะส่งผลให้เกิดการคำนวณชีโอดีผิดพลาดได้ง่าย และอาจทำให้ชีโอดีน้ำเข้าระบบสูงเกินกว่าระบบจะรับได้ส่งผลให้เกิดการฟุ้งกระจายของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์น้ำหนักเบา มีลักษณะเป็นฟลอคจะถูกพัดพาหรือหลุดออกมากับน้ำออกระบบส่งผลต่อของแข็งแขวนลอยของระบบในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และนอกจากนี้แป้งมันที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียยังมีคุณสมบัติในการตกตะกอนเร็วกว่าแหล่งคาร์บอนตัวอื่น ทำให้ส่งผลเสียต่อระบบและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ดังนี้

(1) ลดค่าความสามารถของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (Methanogenic Activity; MA) และนอกจากนี้ยังเกิดการสะสมอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ และเกาะกับเม็ดตะกอนทำให้เม็ดตะกอนหลุดออกมากับน้ำออกระบบได้

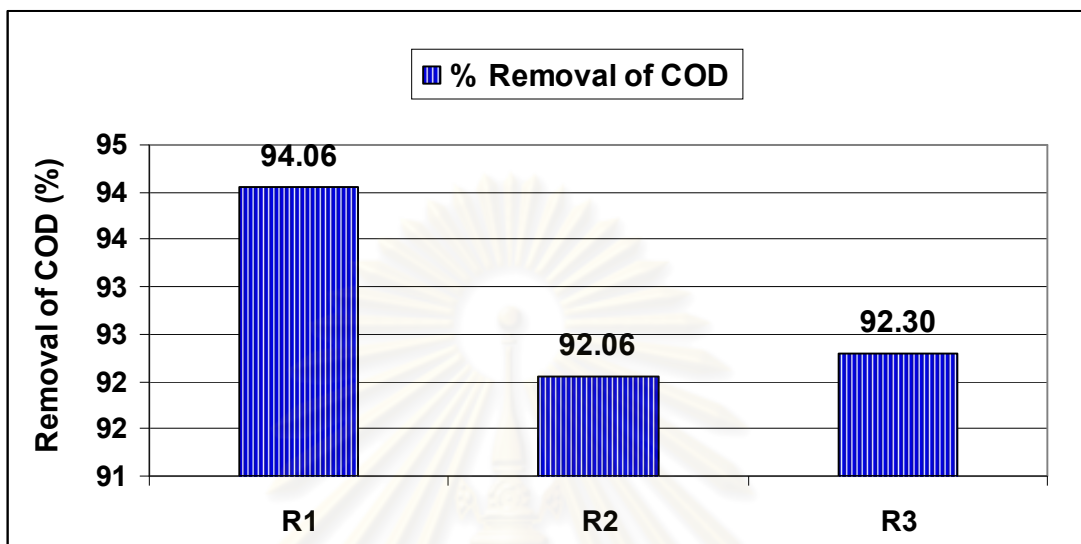
(2) ทำให้เกิดการจับตัวระหว่างแป้งมันและเม็ดตะกอนส่งผลให้การรวมตัวกันของเม็ดตะกอนเป็นไปได้อย่างช้า ๆ และอาจลดความแข็งแรงของเม็ดตะกอนด้วย

จากงานวิจัยของ Guiot และคณะ (1992) พบว่าความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรีย ที่จะสามารถรวมตัวกันกลายเป็นเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ดี สมพงษ์ นิลประยูร (2536) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบยูเอเอสบี โดยเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นระหว่าง 0.13 - 0.69 พบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีความเร็วไหลขึ้นสูงกว่าจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยต่ำกว่า เนื่องจากความเร็วไหลขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนทางสภาพพลศาสตร์ในระบบ และของแข็งแขวนลอยพัดพาออกมากับน้ำออกระบบได้มากกว่า นอกจากนี้ธีระพงษ์ วิมลจิตรานนท์ (2545) ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการบำบัดน้ำเสียจากมูลสุกรแบบไร้ออกซิเจนด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังสัมผัสไร้อากาศแบบไหลขึ้นพบว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำ (HRT) 6, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบ และการพัฒนาระบบระบบยูเอเอสบีร่วมกับถังกรองชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียสะพานปลาที่มีค่าชีโอดีและไนโตรเจนที่สูง (2552) พบว่าประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีจะแปรตามความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์ แต่ถ้าค่าความเร็วไหลขึ้นสูงจะส่งผลต่อการขยายตัวของชั้นตะกอนในถังปฏิกรณ์ทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีโอกาสหลุดออกจากระบบได้ง่าย

ในงานวิจัยที่ได้ศึกษานี้ได้กำหนดระยะเวลาการกักเก็บน้ำให้เท่ากันทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ คือ 24 ชั่วโมง และความเร็วไหลขึ้น 0.5 เมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของแต่ละถังปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันนั้นจึงเป็นผลมาจากการเติมแหล่งคาร์บอนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันที่เติมลงไปในระบบด้วย

4.4.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแหล่งคาร์บอนต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีแตกต่างกัน โดยในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 94.06, 92.06 และ 92.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.32



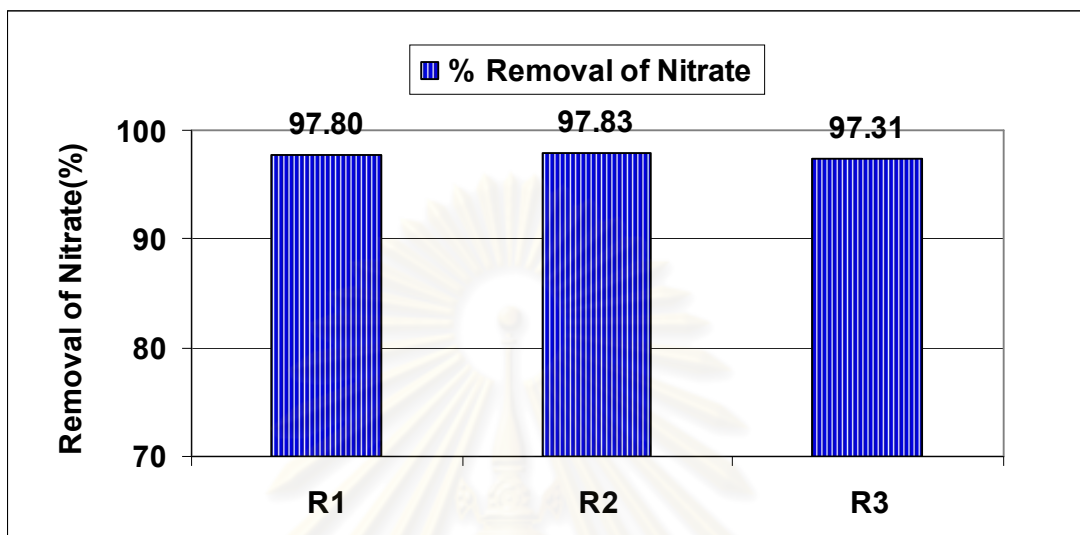
ภาพที่ 4.31 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีช่วงการทดลองที่ 1

จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุด แต่ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 แหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันและถังปฏิกรณ์ที่ 3 เป็น กากแป้งข้าวเจ้า เม็ดตะกอนจุลินทรีย์อาจจะยังไม่คุ้นเคยกับแหล่งคาร์บอนแหล่งใหม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ก็ยังคงอยู่ในระดับสูง ทำให้การนำแหล่งคาร์บอนใหม่ๆ มาใช้จึงเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียในระบบยูเอเอสบีเพื่อช่วยในการลดต้นทุน

จากงานวิจัยของ Yan-Ling et al. (1995) พบว่าการเติมคาร์โบไฮเดรตเป็นสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ในระบบ จะช่วยเร่งอัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และนำไปสู่การบำบัดซีโอดีได้เพิ่มมากขึ้น และสินีนุช ศศิยศชาติ (2544) พบว่าชนิดและส่วนประกอบต่างๆ ในน้ำเสียจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยน้ำเสียประเภทโปรตีนจะทำให้เกิดการลอยตัวของตะกอนสลัดจ์ ทำให้ตะกอนที่มีอยู่ในถังลดลง และส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงและทำให้ระบบล้มเหลวได้ ศตวรรษ ทนารัตน์ (2546) ศึกษาผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อแอมโมเนียไนโตรเจนต่อค่าพีเอช พบว่าการคงไว้ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง ซีโอดีต่อแอมโมเนียไนโตรเจนที่ 100:5 และการรักษาพีเอชไม่ให้ต่ำกว่า 5.98 จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

4.4.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแหล่งคาร์บอนต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทแตกต่างกัน โดยในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 97.80, 97.83 และ 97.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.32 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทช่วงการทดลองที่ 1

จะเห็นได้ว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายและ 2 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอนมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยสูงใกล้เคียงกัน แต่ก็ไม่แตกต่างจากถังปฏิกรณ์ที่ 3 มากนัก แสดงให้เห็นว่าการนำกากแป้งข้าวเจ้าที่เป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิตโรงงานผลิตแป้งมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนนั้น สามารถช่วยในการบำบัดไนเตรทได้ดีใกล้เคียงกับแหล่งคาร์บอนอื่น และประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทนั้นสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี เนื่องจากเมื่อไนเตรทในน้ำลดลงมาก แสดงว่ามีการใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียมาก นั่นคือ การที่ไนเตรทถูกกำจัดได้มากนั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะสูงตามไปด้วย เนื่องจากงานวิจัยนี้ในน้ำเสียจะมีซัลเฟตและไนเตรทอยู่และซัลเฟตและไนเตรทนี้เองจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในระบบ ดังนั้นจะต้องมีการเติมสารให้อิเล็กตรอนลงไปในระบบเพื่อที่ซัลเฟตและไนเตรทจะได้มารับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนไปเป็นซัลไฟด์และไนโตรเจนตามลำดับ โดยสารให้อิเล็กตรอนในระบบ ก็คือสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั่นเอง ซึ่งจะต้องทำการเติมลงไปให้เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ในการนำไปใช้สร้างเซลล์ และนำไปใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนแก่ซัลเฟตและไนเตรทได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นจึงควรเติมให้มากเกินพอ และจากผลการทดลองจะเห็นว่าในน้ำออกระบบยังคงเหลือซีโอดีออกมากับน้ำออกระบบ เนื่องจากเป็นซีโอดีที่เหลือจากการนำไปใช้สร้างเซลล์ และใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชันและกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในระบบ อีกทั้งยังเป็นข้อจำกัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (มันดิน ตันทุลเวศม์, 2542) และสามารถอธิบายได้จาก

สมการโมนด์ (Metcalf และ Eddy, 1991) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในเชิงโคเนติกดังนี้

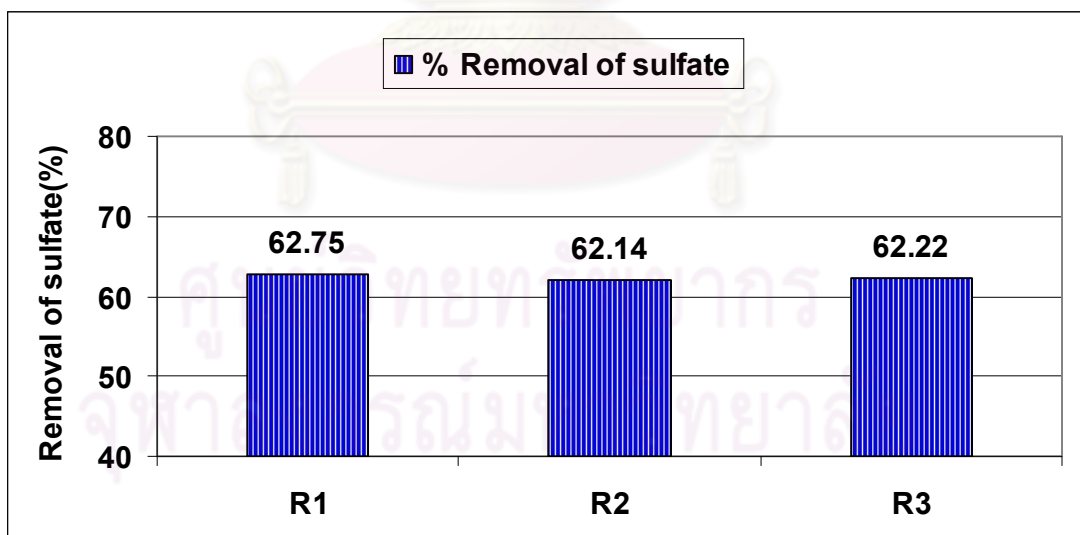
$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{(K_s + S)}$$

เมื่อ μ = อัตราการเจริญเติบโต (เวลา⁻¹)
 μ_{\max} = อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด (เวลา⁻¹)
 S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่พิจารณาในระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 K_s = ความเข้มข้นของสารอาหารที่พิจารณาเมื่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ μ_{\max} (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าการไม่มีสารอาหารหรือสารยับยั้งการเติบโตเหลืออยู่ในตัวกลางที่มีแบคทีเรียอยู่ ($S=0$) จะทำให้แบคทีเรียไม่มีอัตราการเจริญเติบโต ($\mu = 0$) หรือแบคทีเรียตาย แสดงว่าจำเป็นต้องมีสารอาหารในปริมาณหนึ่งที่แบคทีเรียจำเป็นต้องให้เหลืออยู่ในตัวกลางเพื่อให้เกิดการดึงสารอาหารเข้าสู่เซลล์นั่นเอง

4.4.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแหล่งคาร์บอนต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตแตกต่างกัน โดยในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 62.75, 62.14 และ 62.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.33 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตช่วงการทดลองที่ 1

จะเห็นว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน เป็นแหล่งคาร์บอน และถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตไม่สูงมากนักและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

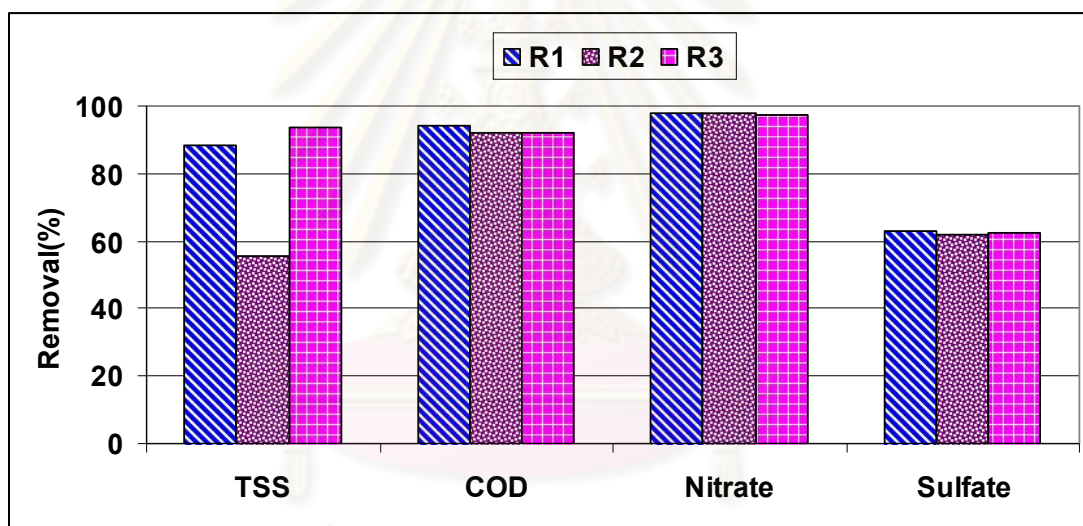
จากงานวิจัยของ Omil และคณะ (1998) ศึกษาชนิดของสารอาหารและอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตมีผลต่อการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบบำบัดยูเอเอสบี พบว่า การให้สารอาหารระหว่างกรดอินทรีย์กับอะซิเตตจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการให้อะซิเตตเพียงอย่างเดียว และเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาไม่นาน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความสามารถในการเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ถ้ามีซัลเฟตอยู่เกินพอ แต่ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะต้องไม่เกินความสามารถในการทนทานของแบคทีเรีย

อนุตร เปียงแก้ว (2542) ศึกษาการควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอน โดยใช้น้ำตาลทรายและอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอน กำหนดความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มิลลิกรัมต่อลิตรและซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตมีค่ามากกว่า 6 การเกิดซัลเฟตรีดักชันเกิดได้เต็มที่เนื่องจากมีซีโอดีอยู่ในระบบมากเกินพอ ขณะที่ซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด ซัลเฟตในระบบจึงถูกรีดิวซ์เกือบทั้งหมด ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ระดับการเกิดซัลเฟต รีดักชันมีค่าลดลงเนื่องจากในระบบมีซัลเฟตอยู่มากเกินพอในขณะที่มีซีโอดีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นความเข้มข้นของซีโอดีจึงเป็นตัวควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการให้อะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าลดลงเมื่อเทียบการใช้น้ำตาลทราย ในปีเดียวกัน อรุชา เศรษฐธีรภิกข (2542) ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตที่มีต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต คือ 4 และ 2 โดยใช้ความเข้มข้นซีโอดี 5 ค่า คือ 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 4 และซีโอดีเท่ากับ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการเกิดซัลเฟตรีดักชันสูงถึง 92.7 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 2 ซีโอดีเท่ากับ 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการเกิดซัลเฟตรีดักชันสูงเท่ากันถึง 95.1 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยสัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต มีค่าเท่ากับ 82.0 เปอร์เซ็นต์ MPB/ 18.0 เปอร์เซ็นต์ SRB และ 62.9 เปอร์เซ็นต์ MPB/37.1 เปอร์เซ็นต์ SRB ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การแปรค่าความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเพิ่มขึ้น

ปริญา รัตนา (2549) ศึกษาเพื่อหาผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีผลต่อปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีจำนวน 3 ถัง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ช่วงแรกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 และความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากันทั้ง 3 ถัง ช่วงที่สองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสแตนเลส กำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10:1, 15:1 และ 20:1 และ

ความเข้มข้นของซัลเฟตและไนเตรท 90 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากการศึกษาทั้งสองช่วง พบว่า อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่ 5:1 และ 15:1 เป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสียได้

สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ไนเตรท และซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงได้ดังภาพที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรทและซัลเฟตสูงสุด แต่ไม่แตกต่างจากถึงปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มากนัก ดังนั้นการใช้แป้งมันหรือกากแบ่งข้าวเจ้าอาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใช้แหล่งคาร์บอนที่มีราคาถูกมาทดแทนแหล่งคาร์บอนมีราคาสูงได้ เพราะน้ำตาลทรายจะเป็นแหล่งคาร์บอนที่ต้องขึ้นอยู่กับกลไกของตลาด ดังนั้นการคิดหาแหล่งคาร์บอนแหล่งใหม่เพื่อชดเชยแหล่งคาร์บอนที่ใช้กันทั่วไปอย่างน้ำตาลทราย อาจเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพและสร้างเม็ดเงินก่อนเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทและซัลเฟตปะปนอยู่ได้



ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ไนเตรทและซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 การวิจารณ์ผลของอัตราภาระบรรทุกซัลเฟต (Sulfate Loading Rate) ที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี (การทดลองช่วงที่ 2)

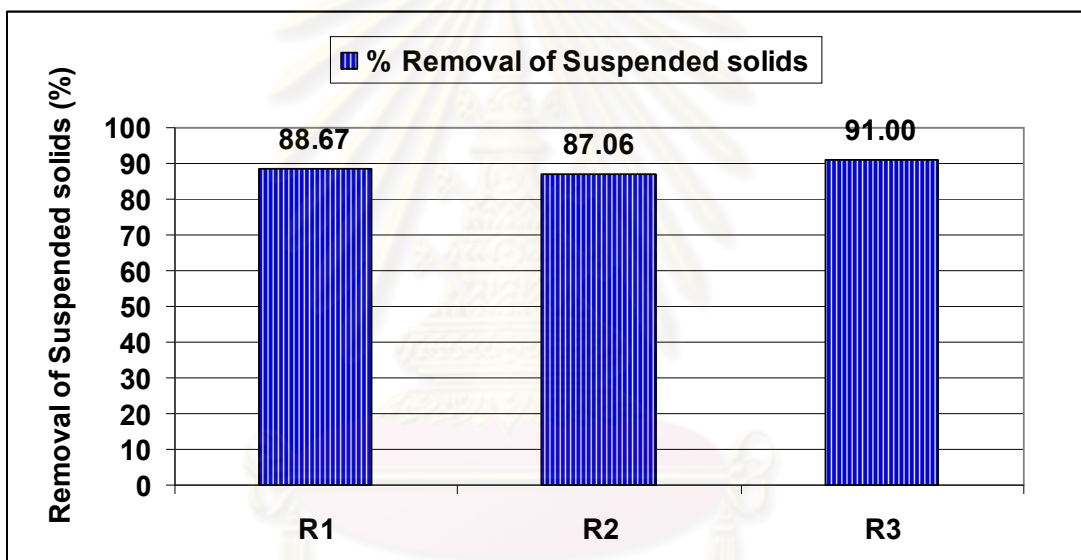
จากการทดลอง กำหนด R1 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 1 Sulfate Loading Rate เท่ากับ 1.08

R2 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 2 Sulfate Loading Rate เท่ากับ 1.62

R3 คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 3 Sulfate Loading Rate เท่ากับ 2.16

4.5.1 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการบำบัด

จากการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนเหมือนกันทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ คือ กากแป้งข้าวเจ้า ปริมาณ Sulfate Loading Rate ถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 88.67, 87.06 และ 91.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.36



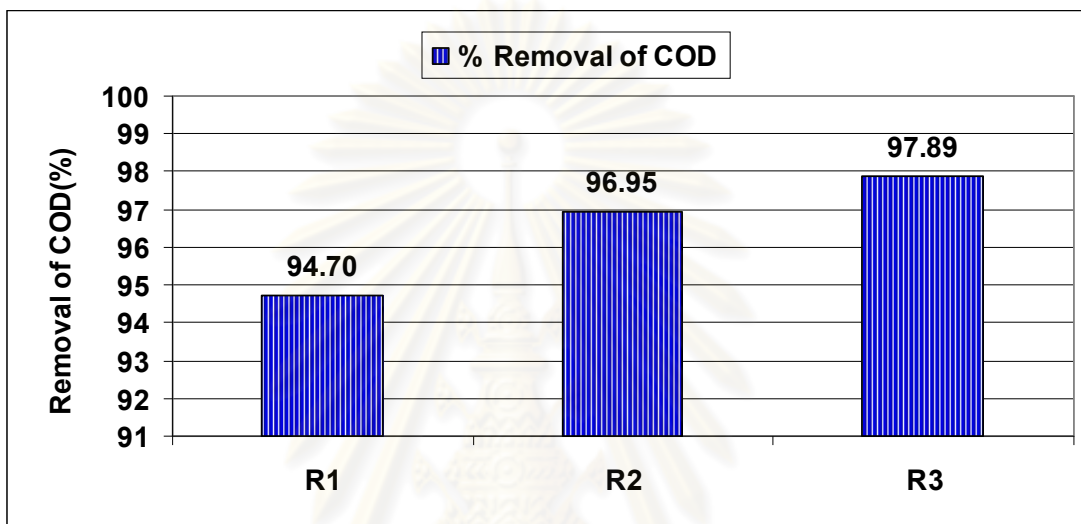
ภาพที่ 4.35 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยช่วงการทดลองที่ 2

ในการพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยดีขึ้นนั้น จะต้องรักษาปริมาณแบคทีเรียในระบบให้สูงขึ้น และมีระยะเวลาเก็บแบคทีเรียที่นานขึ้น จากภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าค่อนข้างสูงและค่าไม่แตกต่างกันมาก อาจเนื่องมาจากระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบสามารถปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียและแหล่งคาร์บอนที่ใช้ได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับการเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 จากน้ำตาลทรายและแป้งมัน มาเป็นกากแป้งข้าวเจ้านั้นยังมีผลกับระบบบ้างแตกต่างจากถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่ยังคงใช้แหล่งคาร์บอนเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของถังปฏิกรณ์ที่ 3 สูงสุด คือ 91.00 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการพัฒนาของเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากพอ ทำให้หลุดออกมากับน้ำออกลดลงแต่ทั้งนี้อาจมี

ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมากับน้ำออกระบบได้บ้าง ซึ่งอาจเป็นตะกอนที่สร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่และไม่สามารถรวมตัวกันให้มีน้ำหนักมากได้

4.5.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัด

จากการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนเหมือนกันทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์ คือ กากแป้งข้าวเจ้า ปริมาณ Sulfate Loading Rate ถึงปฏิกรณ์ที่ 1,2 และ 3 เท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตร ต่อวัน ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 97.08, 97.95 และ 98.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.37

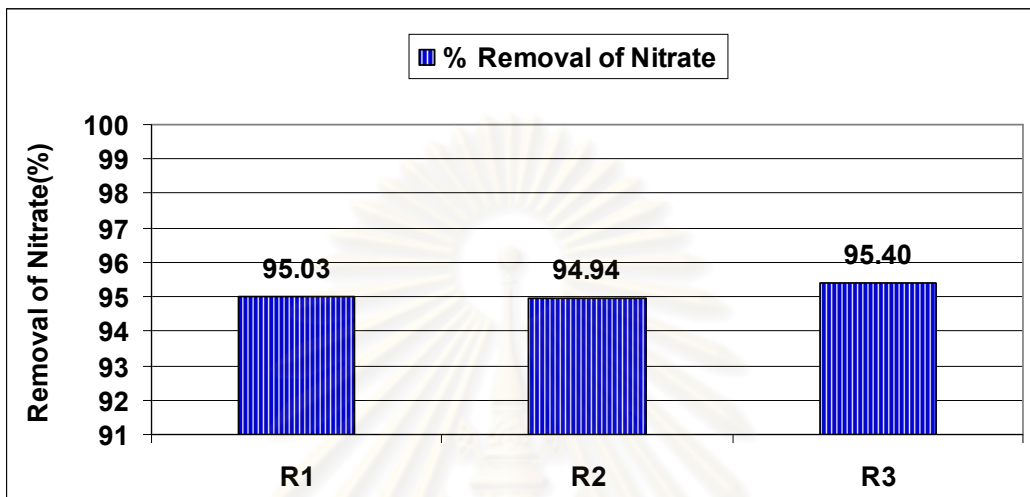


ภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีช่วงการทดลองที่ 2

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าสูงสุด เนื่องจากในถังปฏิกรณ์นี้ในช่วงการทดลองที่ 1 และช่วงการทดลองที่ 2 ใช้กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนต่อเนื่องกัน ส่งผลให้แบคทีเรียในระบบไม่ต้องทำการปรับตัวให้เข้ากับลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียและแหล่งคาร์บอนมากนักเนื่องจากมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีกากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนอยู่แล้วทำให้ Activity ของจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วย จากการศึกษาบทบาทของสารให้อิเล็กตรอนที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสีเอโซรีแอกทีฟ (สีย้อมผ้าที่ละลายน้ำได้ดี) ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนของ อรรถวรุทธิ์ รื่นเรใจ (2541) ทำการศึกษากับสารให้อิเล็กตรอนหรือสารอาหาร 4 ประเภทได้แก่ น้ำตาลทราย เมทานอล ไขมันและโปรตีน โดยกำหนดความเข้มข้นซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ไม่เติมสาร พบว่าการเติมสารให้อิเล็กตรอนหรือสารอาหารให้กับแบคทีเรียจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีเอโซรีแอกทีฟและการกำจัดซีโอดีให้กับระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มสารอาหารให้กับระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเป็นอย่างยิ่ง

4.5.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการบำบัด

จากการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนเหมือนกันทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์ คือ กากแป้งข้าวเจ้า ปริมาณ Sulfate Loading Rate ถึงปฏิกรณ์ที่ 1,2 และ 3 เท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตร ต่อวัน ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 95.03, 94.94 และ 95.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.38



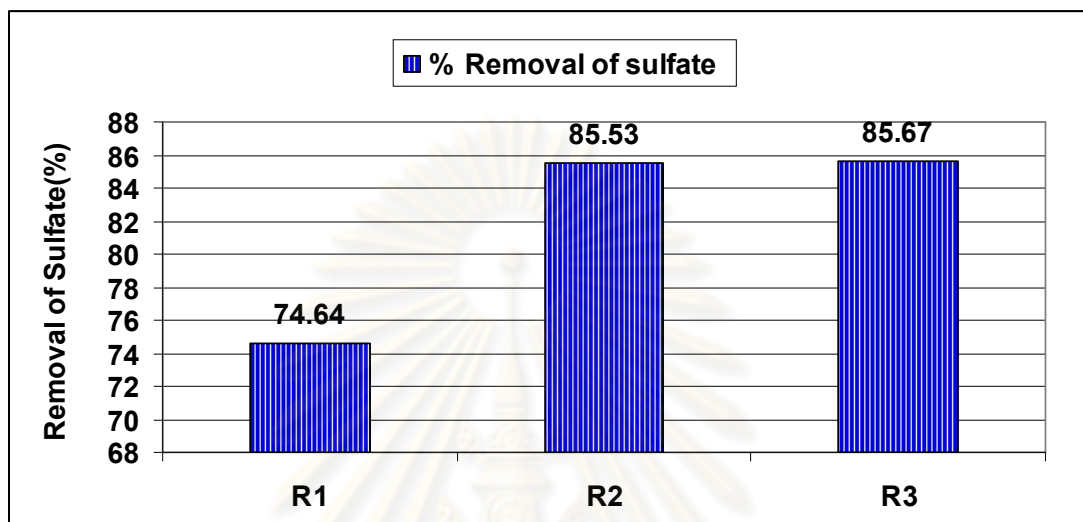
ภาพที่ 4.37 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทช่วงการทดลองที่ 2

จากภาพที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทต่ำสุด ซึ่งแตกต่างจากการทดลองในช่วงที่ 1 ที่ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าสูงสุด สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนของถังปฏิกรณ์ที่ 2 นี้สามารถแย่งสารอินทรีย์ในระบบได้ดีกว่าแบคทีเรียไนโตรฟายอิง ซึ่งดูได้จากประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตสูงกว่าการทดลองช่วงที่ 1 ดังนั้นเมื่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีบทบาทมากขึ้นก็จะลดบทบาทของแบคทีเรียดีไนโตรฟายอิงในระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทจึงลดลง ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่ 3 แบคทีเรียดีไนโตรฟายอิงกลับมีบทบาทในการใช้สารอินทรีย์ได้มากขึ้น ทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนไนเตรทไปเป็นไนโตรเจนได้มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทสูงกว่าถังปฏิกรณ์อื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัด

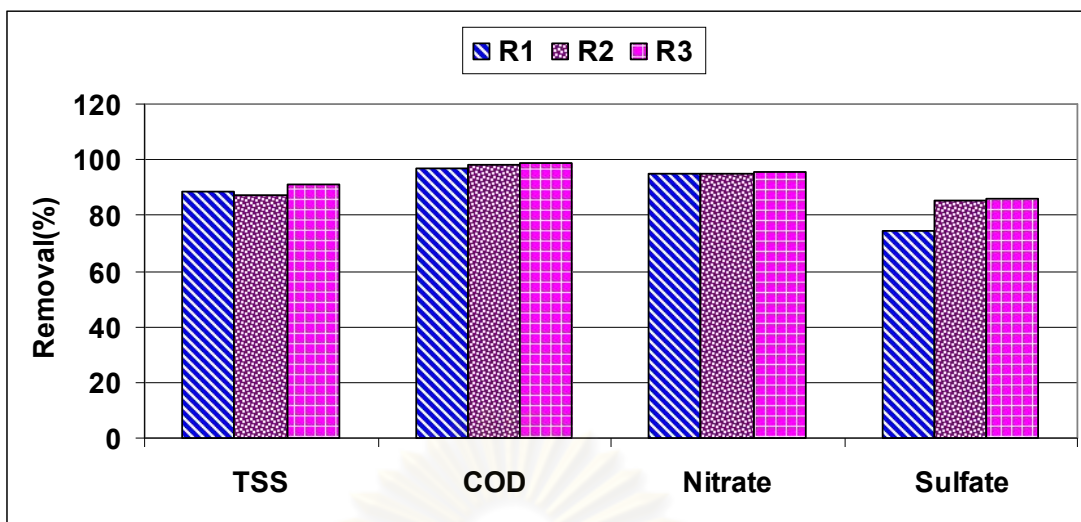
จากการทดลองใช้แหล่งคาร์บอนเหมือนกันทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์ คือ กากแป้งข้าวเจ้า ปริมาณ Sulfate Loading Rate ถึงปฏิกรณ์ที่ 1,2 และ 3 เท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตร ต่อวัน ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 74.64, 85.53 และ 85.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.39



ภาพที่ 4.38 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตช่วงการทดลองที่ 2

จากภาพที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าการทดลองช่วงที่ 2 ทุกถึงปฏิกรณ์เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตสูงขึ้นมาก เนื่องมาจากการเติมซัลเฟตในน้ำเข้าระบบเพิ่มขึ้นและเมื่อเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้รับซัลเฟตในปริมาณที่สูงจะทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมี Activity เพิ่มขึ้นและสามารถแข่งขันกับดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียได้ แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตที่ดีได้นั้น จะต้องไม่มีซัลไฟด์ในปริมาณมากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ โดยปริมาณซัลไฟด์ที่มากกว่า 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2536)

ประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ซีไอดี ไนเตรท และซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงได้ดังภาพที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีไอดี ไนเตรทและซัลเฟตสูงแต่ก็มีค่าใกล้เคียงกับถึงปฏิกรณ์อื่นๆ ซึ่งทำให้การทดลองมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1



ภาพที่ 4.39 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีไอดี ไนเตรทและซัลเฟตของการทดลองครั้งที่ 2

4.6 ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ

ตลอดการทดลองทั้ง 2 ช่วงการทดลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สภาพต่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรพื้นฐานที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเป็นตัวตรวจสอบการทำงานของระบบและช่วยในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับระบบได้หากมีสิ่งผิดปกติหรือระบบมีการล้มเหลวขึ้น

4.6.1 พีเอช

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การทดลองครั้งที่ 1 พีเอชของน้ำออกจากระบบของถังปฏิกรณ์ที่มี 1, 2 และ 3 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.75, 7.79 และ 7.82 ตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 2 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.52, 7.71 และ 7.77 ตามลำดับ การที่ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำออกระบบมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1.1 และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าพีเอชเฉลี่ยตลอดการทดลองนี้จะอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ ช่วง 6.8 – 8.2

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ที่มี 1, 2 และ 3 พบว่าการทดลองครั้งที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27, 0.30 และ 0.26 ตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.34, 0.37 และ 0.36 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบำบัดเพียงพอเพียงพอกับความต้องการในการทำงานของระบบ

4.6.2 อุณหภูมิ

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าอุณหภูมิของน้ำออกระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองช่วงที่ 1 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกระบบเท่ากับ 27.6, 27.8 และ 27.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และการทดลองช่วงที่ 2 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 26.7, 27.0 และ 26.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกระบบตลอดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลองนี้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ อยู่ในช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งอุณหภูมินี้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียและทำให้แบคทีเรียทำงานอยู่ในระบบได้โดยปกติ

4.6.3 สภาพต่างทั้งหมด

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำออกระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองช่วงที่ 1 เท่ากับ 440, 417 และ 453 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ และการทดลองช่วงที่ 2 มีค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 355, 357.8 และ 367.3 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ การที่ระบบจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพส่วนหนึ่งเกิดจากการปริมาณสภาพต่างในระบบที่มีอย่างเพียงพอ และค่าสภาพต่างจะมีความสัมพันธ์กับพีเอช เนื่องจากค่าสภาพต่าง คือ ความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบเมื่อมีการเติมกรดเข้าสู่ระบบ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบคทีเรียสร้างกรดจะทำให้หน้าที่สร้างกรดไขมันระเหยขึ้นมาซึ่งหากในระบบมีกำลังบัฟเฟอร์หรือสภาพต่างไม่เพียงพอจะทำให้พีเอชภายในระบบลดลงอย่างรวดเร็วได้จากสภาพกรดที่เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การล้มเหลวของระบบได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบ ได้แก่ การเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงพีเอช ซึ่งดูได้จากการที่ค่าพีเอชของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

4.6.4 กรดไขมันระเหย

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่ากรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองช่วงที่ 1 มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 118, 124 และ 116 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติค ตามลำดับ และการทดลองช่วงที่ 2 มีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 119, 131 และ 131 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติค ตามลำดับ

ค่ากรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบที่วิเคราะห์ได้นั้น มีความสำคัญต่อควบคุมการทำงานของระบบ เนื่องจากถ้าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้สภาพกรดในน้ำเพิ่มมากขึ้น และถ้าในระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ อาจทำให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบ และนำไปสู่การล้มเหลว

ของระบบได้ ค่ากรดไขมันระเหยนี้อาจอยู่ในรูปของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบำบัดเพียงพอ

4.7 ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity; SMA)

การศึกษาศักยภาพความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเป็นการศึกษาศักยภาพของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบในการย่อยสลายสารอินทรีย์มีมากน้อยเพียงใด โดยดูจากอัตราการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งแบคทีเรียที่มีอัตราการสร้างก๊าซมีเทนสูงจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงตามไปด้วย แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีสารยับยั้งเกิดขึ้นอยู่ด้วย เช่น ซัลเฟต และไนเตรท จะทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างไปจากเดิม คือ จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยมีซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเกิดปฏิกิริยาดีนิตริฟิเคชันโดยมีไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดการแข่งขันในการแย่งใช้สารอาหารหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Forming Bacteria) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria) และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Denitrifying Bacteria) โดยถ้าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงเจริญเติบโตขึ้นมาแย่งใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะส่งผลให้ Activity ของแบคทีเรียสร้างมีเทนลดลง ทำให้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้และอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ลดลง สำหรับการศึกษาศักยภาพจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ถัง ตลอดจนการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หลังสิ้นสุดการทดลอง

ถังปฏิกรณ์ที่	อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (R) (mL-CH ₄ /day)	VSS (g VSS/L)	SMA (gCOD-CH ₄ /g VSS-day)
1	7.461	66.25	0.030
2	7.258	80.15	0.024
3	8.155	69.72	0.032

จากตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า ค่า SMA เฉลี่ยของ 3 ถังปฏิกรณ์หลังสิ้นสุดการมีค่าเท่ากับ 0.030, 0.024 และ 0.032 กรัมซีโอดีมีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน ตามลำดับ โดยจากการทดลองหาค่า SMA เริ่มต้นระบบได้ค่าเท่ากับ 0.030 กรัมซีโอดีมีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าค่า SMA ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเนื่องจากเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมี Activity สูงขึ้น

4.8 สมดุลมวลของสารในระบบ

4.8.1 สมดุลมวลของซีไอดี (% COD recovery)

ค่าซีไอดี คือความต้องการออกซิเจนทางเคมีของตัวอย่างน้ำที่นำมาวิเคราะห์ หรือหมายถึงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น สารอินทรีย์, ซัลไฟด์ไอออน หรือเหล็กเฟอร์รัส เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวสามารถถ่ายเทจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งได้ ถ้าได้รับการกระตุ้นจากสารที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงกว่า ดังนั้นในระบบที่มีการถ่ายเทหรือการไหลของอินทรีย์คาร์บอนที่มีแบคทีเรียเป็นตัวการทำให้เกิดปฏิกิริยา จึงทำให้ซีไอดีสามารถเปลี่ยนรูปของอินทรีย์คาร์บอนจากเดิมไปสู่รูปอื่นได้

งานวิจัยนี้ซีไอดีของน้ำเข้าระบบเป็นซีไอดีของสารอินทรีย์หรือแหล่งคาร์บอนที่เติมให้กับแบคทีเรีย ดังนั้นการพิจารณาสมดุลมวลซีไอดีจากงานวิจัยจึงทำให้ทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยดูจาก % COD recovery แสดงดังตารางที่ 4.22 และ 4.23

ตารางที่ 4.22 ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 1

ถังปฏิกรณ์	ซีไอดี (mg/L)		ซัลเฟต (mg/L)		ไนเตรท (mg/L)		ก๊าซทั้งหมด (mL/d)	% CH ₄	% CO ₂	% recovery
1	640	40	92.48	38.19	60.38	0.87	800	58.40	17.10	42.98*
2	616	80	93.34	48.88	61.22	0.71	450	49.20	16.10	44.33*
3	624	104	94.59	29.44	62.27	0.53	450	28.40	17.90	45.82*

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย, ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมันและถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า

ตารางที่ 4.23 ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 2

ถังปฏิกรณ์	ซีไอดี (mg/L)		ซัลเฟต (mg/L)		ไนเตรท (mg/L)		ก๊าซทั้งหมด (mL/d)	% CH ₄	% CO ₂	% recovery
1	3,880	174	178.86	40.80	59.41	3.77	1,700	37.90	13.70	62.84*
2	5,420	174	270.90	39.40	60.94	2.16	2,750	36.10	11.90	66.13*
3	7,392	105	360.06	50.71	60.38	2.79	2,760	40.00	7.60	54.97*

หมายเหตุ : ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซีไอดี 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร, ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซีไอดี 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซีไอดี 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาว่า % COD recovery ตลอดการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดอ่อนหนึ่งคือ % recovery มีค่าค่อนข้างน้อยคืออยู่ระหว่าง 40-70 % ดังนั้นในการคำนวณ % COD recovery * จึงหมายถึงทำการรวมค่า COD_{unknown} หรือซีโอดีที่ไม่ทราบค่าในระบบเพิ่มเข้าไป และนอกจากนี้ยังรวมค่า 10% COD_{acc} คือปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรียอีก 10% ด้วย สาเหตุที่ % COD recovery มีค่าน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการวิเคราะห์ซีโอดีนั้นมีการกรองน้ำเสียก่อนทำการทดลองทำให้ค่าซีโอดีที่เกิดจากเซลล์จุลินทรีย์ไม่ได้ถูกวัดไปด้วยทำให้ข้อมูลส่วนนี้ขาดหายไป และนอกจากนี้ยังเกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย จากการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับแบคทีเรียพบว่ากระบวนการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะสัมพันธ์กับการกินสารอาหารและปริมาณสารอาหารที่รับเข้าไป โดยแบคทีเรียทุกชนิดต้องการพลังงานจากสารอินทรีย์ (สารอาหาร) เพื่อช่วยในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์หรือสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมา งานวิจัยของอนุตร เปียงแก้ว (2542) กล่าวถึงการใช้พลังงานของแบคทีเรียแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจนไว้ว่า แบคทีเรียชนิดใช้ออกซิเจนนั้นได้พลังงานจากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมเลกุลเทียบเท่ากับ 38 ATP แต่ถ้าแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนจะได้พลังงานจากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมเลกุลเป็นกรดไพรูวิก 2 ATP ได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดไพรูวิก 2 โมเลกุลเป็นกรดอะซิติก 2 ATP และได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดอะซิติก 2 โมเลกุลเป็นก๊าซมีเทน 2 ATP และถ้ารวมไฮโดรเจนอีก 4 โมเลกุลเมื่อถูกย่อยสลายเป็นมีเทนจะได้อีก 1ATP รวมทั้งสิ้น 7 ATP เท่านั้น ดังนั้นพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นเซลล์นั้นจะมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของอาหารที่แบคทีเรียกินเข้าไปเท่านั้น

4.8.2 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow)

จากข้อมูลสัดส่วนซีโอดีในรูปก๊าซมีเทน (% COD recovery) จะนำมาคำนวณ เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) หรือสัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง เพื่อนำมาเปรียบเทียบบทบาทระหว่างแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิดของการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังตารางที่ 4.24 และ 4.25

ตารางที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) ของการทดลองครั้งที่ 1

ถึงปฏิกรณ์	เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow)		
	แบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB)	แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB)	แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (DNB)
1	100	48.53	51.47
2	100	43.07	56.84
3	100	42.87	57.13

ตารางที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) ของการทดลองครั้งที่ 2

ถึงปฏิกรณ์	เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow)		
	แบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB)	แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB)	แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (DNB)
1	100	71.94	18.06
2	100	80.28	19.72
3	100	84.74	15.26

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) กำหนดเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสร้างมีเทนเทียบเป็น 100 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบบทบาทระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและดีไนตริฟายอิงให้ชัดเจนมากขึ้น จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในช่วงที่ 1 มีบทบาทน้อยกว่าแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงซึ่งพิจารณาแล้วพบว่าสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในช่วงที่ 1 ซึ่งให้ประสิทธิภาพไม่สูงนัก แต่เมื่อทดลองต่อในช่วงที่ 2 มีการเติมซัลเฟตให้ระบบเพิ่มขึ้นส่งผลต่อปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันบทบาทของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดจากคุณสมบัติของแหล่งคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 คือกากแป้งข้าวเจ้ามีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน จึงทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในกรดอ่อนเจริญเติบโตมากขึ้นได้ ส่วนแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงที่เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนลดลงนั้นเนื่องมาจากการทดลองในช่วงที่ 2 นี้เราเพิ่มแต่ปริมาณซัลเฟตให้ระบบแต่ปริมาณไนเตรทยังกำหนดให้คงที่เท่ากับในช่วงที่ 1 ส่งผลให้บทบาทของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงลดลงได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ อนุตร เปียงแก้ว (2542) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีค่าลดลง ขณะที่เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันเกิดมากขึ้นด้วย และจากงานวิจัยของ Smul และ Verstraete (1999) สนับสนุนว่าการมีซัลเฟตอยู่ในระบบมากเกินไปอาจทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีไอดีได้น้อยลงมากแต่ก็ยังคงพบการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่และเป็นการยากที่แบคทีเรียสร้างมีเทนจะไม่ใช้ซีไอดีเลย

4.8.3 สมดุลมวลของซัลเฟอร์ (% sulfur recovery)

การพิจารณาสมดุลมวลของซัลเฟอร์ เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูลและใช้ตรวจสอบย้อนกลับถึงความถูกต้องของข้อมูลการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้ซัลเฟตเป็นรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ชนิดเดียวที่ถูกป้อนเข้าระบบ โดยผลการคำนวณ (% sulfur recovery) ของการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 แสดงดังตารางที่ 4.26 และ 4.27

ตารางที่ 4.26 ค่า % sulfur recovery ของซัลเฟอร์ในการทดลองช่วงที่ 1

ถึงปฏิกรณ์	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% sulfur recovery
	เข้า	ออก	รูปซัลไฟด์	รูปซัลเฟต	รูป ซัลไฟด์	รูป ซัลเฟต	
1	92.48	38.19	8.00	24.00	9.50	0.59	67.88
2	93.34	48.88	14.20	42.66	8.50	0.53	98.58
3	94.59	29.44	12.80	38.40	9.00	0.56	72.31

ตารางที่ 4.27 ค่า % sulfur recovery ของซัลเฟอร์ในการทดลองช่วงที่ 2

ถึงปฏิกรณ์	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% sulfur recovery
	เข้า	ออก	รูปซัลไฟด์	รูปซัลเฟต	รูป ซัลไฟด์	รูป ซัลเฟต	
1	182.10	46.18	27.20	81.60	9.50	0.59	70.49
2	276.06	48.80	48.60	145.80	8.50	0.53	70.68
3	368.40	53.27	57.40	172.20	11.00	0.69	61.39

จากตารางที่ 4.26 และ 4.27 จะเห็นได้ว่าในทุกถึงปฏิกรณ์ตลอดการทดลอง ค่า % sulfur recovery จะมีค่าน้อยกว่า 100 สาเหตุเนื่องมาจากความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลไฟด์ละลายน้ำจะลดลงเมื่อสัมผัสกับอากาศภายนอก ซึ่งทำให้ค่าซัลไฟด์ของน้ำออกระบบทั้งหมดวัดได้น้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง และนอกจากนี้ค่าซัลเฟอร์ส่วนหนึ่งจะอยู่ในรูปตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้และสะสมอยู่ในเซลล์ของแบคทีเรียเพราะซัลเฟอร์เป็นธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

4.8.4 สมดุลมวลของไนโตรเจน (% nitrogen recovery)

การพิจารณาสมดุลมวลของไนโตรเจนในงานวิจัยนี้ เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่ง ที่แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยจะมองเฉพาะไนโตรเจนที่เข้าและออกจากระบบ เพียงอย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงซีโอดีเข้าระบบ (กำหนดให้ไนโตรเจนเป็นรูปของสารประกอบไนโตรเจนชนิดเดียวที่ถูกป้อนเข้าระบบ) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.28 และ 4.29

ตารางที่ 4.28 ค่า % nitrogen recovery ของไนโตรเจนในการทดลองช่วงที่ 1

ถึง ปฏิกรณ์	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% N ₂	ก๊าซไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% nitrogen recovery
	เข้า	ออก		รูปไนเตรท	รูปละลายน้ำ	
1	60.38	0.87	24.50	40.73	18.31	99.22
2	61.22	0.71	34.70	32.45	25.95	96.55
3	62.27	0.53	53.70	50.22	40.15	97.80

ตารางที่ 4.29 ค่า % nitrogen recovery ของไนโตรเจนในการทดลองช่วงที่ 2

ถึง ปฏิกรณ์	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% N ₂	ก๊าซไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		% nitrogen recovery
	เข้า	ออก		รูปไนเตรท	รูปละลายน้ำ	
1	62.35	2.12	48.40	70.41	36.19	95.12
2	60.22	2.04	52.00	81.05	38.88	86.30
3	60.38	2.20	52.40	82.77	39.18	89.68

จากตารางที่ 4.28 และ 4.29 จะเห็นได้ว่าในทุกถึงปฏิกรณ์ค่า % nitrogen recovery มีค่าต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจเนื่องมาจากปริมาณของไนโตรเจนก๊าซไนโตรเจนในระบบเกิดการรั่วไหลระหว่างการเก็บตัวอย่างเพื่อไปทำการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์สมดุลมวลของสารในระบบทั้งหมดจะทำให้ทราบได้ว่ามวลสารจะไม่มีหายไปจากระบบมีแต่เพียงการเปลี่ยนรูปไปเท่านั้น ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากการทำสมดุลมวลสารในระบบ คือ ทำให้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบง่ายขึ้นและมีความสะดวกในการวิเคราะห์ รวมทั้งแนวทางในการวิเคราะห์ทำได้ดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค่าผลของแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสพีสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรท สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบ ศึกษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรท และซัลเฟต กำหนดอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 6.7:1, 13.3:1, 20.0:1 และ 26.7:1 แหล่งคาร์บอนถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน และถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 94.23 , 92.18 และ 92.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 97.60, 97.44 และ 97.08 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตเท่ากับ 63.22, 62.64 และ 62.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรท และซัลเฟตสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาถึงปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 แล้วพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และที่อัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20.0:1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในทุกถึงปฏิกรณ์ สรุปได้ว่าการใช้แป้งมันหรือกากแป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตโรงงานแป้งและมีราคาถูกกว่าน้ำตาลทรายสามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาทดแทนแหล่งคาร์บอนที่มีราคาแพงในปัจจุบันอย่างน้ำตาลทรายได้

5.1.2 การทดลองช่วงที่ 2 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เดินระบบต่อเนื่องจากช่วงที่ 1 นำอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในช่วงที่ 1 คือ 20.0:1 และกำหนดความเข้มข้นซัลเฟตในถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 180, 270 และ 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นซีโอดีในถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 3,600, 5,400 และ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราภาวะบรรจุซัลเฟตเท่ากับ 1.08, 1.62 และ 2.16 กรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ใช้กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอนทั้งสามถึงปฏิกรณ์ พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในถึงปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 94.70, 96.95 และ 97.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทเท่ากับ 95.03, 94.94 และ 95.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตเท่ากับ 74.64, 85.53 และ 85.67

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่าเมื่อนำกากแบ่งข้าวเจ้าซึ่งเป็นของที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20.0:1 ในดังปฏิกิริยาที่ 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเนื่องจากระบบไม่ต้องทำการปรับตัวกับแหล่งคาร์บอนแหล่งใหม่มากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ในเตรท และซัลเฟตระหว่างสามดังปฏิกิริยาพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นการใช้แหล่งคาร์บอนที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตอย่างกากแบ่งข้าวเจ้ามาเป็นแหล่งคาร์บอนจึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในระดับที่สูงเช่นเดียวกัน

5.1.3 จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) ของทั้ง 2 ช่วงการทดลอง พบว่าโครงสร้างและลักษณะภายในของเม็ดตะกอนทั้ง 3 ดังปฏิกิริยาไม่พบความแตกต่างจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ช่วงเริ่มต้นระบบ และโครงสร้างและลักษณะภายในไม่มีการแยกออกเป็นชั้นได้อย่างชัดเจน แต่อาจจะพบแบคทีเรียที่มีรูปร่างแตกต่างกันอยู่บ้างตามหน้าที่การทำงาน และนอกจากนี้ยังพบโพรงที่เกิดจากการหลุดของก๊าซที่เม็ดตะกอนสร้างขึ้นด้วย

5.1.4 จากการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยเครื่อง Particle size Analyzer พบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงแรกมีแนวโน้มขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เล็กลงจากเมื่อเริ่มต้นระบบ แต่เมื่อเดินระบบผ่านไประยะหนึ่งตะกอนจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวและชินกับน้ำเสียที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นกากแบ่งข้าวเจ้า จึงมีแนวโน้มขนาดเม็ดตะกอนใหญ่ขึ้นกว่าช่วงเริ่มต้นระบบมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ในเตรท และซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย

5.1.5 จากการวิเคราะห์ค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity; SMA) ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบจะได้ค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนของดังปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 0.030, 0.024 และ 0.032 กรัมซีโอดีมีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน

5.1.6 น้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ด้วยจะเกิดการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียเพื่อแย่งใช้สารอินทรีย์ในระบบ ได้แก่ แบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง โดยแบคทีเรียชนิดใดสามารถใช้สารอินทรีย์ได้มาก จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนมาก

5.1.7 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ในน้ำเสียด้วยนั้นจะสามารถสร้างสภาพต่างให้เพิ่มขึ้นในระบบได้ ถึงแม้จะเป็นน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตก็ตาม เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะนำเอากรดภายในระบบไปใช้ ทำให้สภาพกรดภายในระบบลดลง ส่งผลให้สภาพต่างโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น

5.1.8 น้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสามารถพัฒนาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ แต่ต้องอยู่สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการสร้างเม็ดด้วย ได้แก่ พีเอชต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ไม่มีสารยับยั้งการทำงานของระบบ และความเร็วไหลขึ้นต้องไม่สูงจนเกินไปจนทำให้เกิดการแตกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และในระบบควรมีแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ด้วยเพราะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะขาดความสามารถในการเกาะติดกันเป็นเม็ด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเลือกใช้เม็ดตะกอนที่มีรูปทรงในลักษณะเป็นเม็ด และเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความคุ้นเคยกับชนิดและสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียที่จะใช้ในการทดลอง เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการเริ่มต้นระบบ (start-up)

5.2.2 เมื่อเริ่มต้นเดินระบบจะเกิดก๊าซขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ดัดให้ตะกอนจุลินทรีย์ลอยขึ้นมาสู่ด้านบนและเกิดแรงดันส่วนอุปกรณ์แยกสามสถานะทำให้เกิดการหลุดลอยของเม็ดตะกอนออกไปกับน้ำเสียออกระบบได้ ดังนั้นควรหมั่นตรวจสอบและดูแลระบบอยู่เสมอ

5.2.3 ควรระวังไม่ให้อากาศ (ออกซิเจน) เข้าไปในระบบ และตรวจสอบระดับน้ำเสียในถังพักว่ามีปริมาณเพียงพออยู่เสมอ ไม่ควรปล่อยให้ น้ำท่วมถังเพราะอาจทำให้มีสบู่ อากาศเข้าไปในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลงได้

5.2.4 ควรมีการเตรียมน้ำเสียใหม่ทุกวันเพื่อป้องกันการอุดตันของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เนื่องจากแหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำแตกต่างกัน

5.2.5 ควรนำน้ำเสียจริงจากโรงงานที่มีซัลเฟตและไนเตรทในปริมาณสูงโดยไม่มี การเจือจางมาทดลองใช้กับแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับตัวของ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์และศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานต่อไป

5.2.6 สามารถนำของเสียหรือส่วนเหลือจากกระบวนการผลิตอื่นๆ เช่น โรงงานผลิตผลไม้กระป๋องหรือกากน้ำตาลมาพัฒนาเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อช่วยในการลดต้นทุน การบำบัด และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดต่อไป

5.2.7 ควรมีการศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตและซีโอดีต่อไนเตรทแยกกัน เนื่องจากความสามารถของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและไนตริฟายอิงแบคทีเรียมีประสิทธิภาพการทำงานที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จันทิมา สกกุลพานิชย์. 2548. การบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลธิชา น้ำดอกไม้. 2545. ผลของชนิดตะกอนต่อการสร้างตะกอนเม็ดของระบบบำบัดแบบ ยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียโปรตีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ณัฐริกา ตันติวงศ์. 2550. ผลของคลอรีนที่มีต่อการกำจัดซีโอทีในน้ำเสียปิโตรเคมีโดยใช้ระบบ ยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ตุลชัย แจ่มใส. 2545. ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัวสำหรับบำบัดน้ำ เสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวีชัย ธีระเศรษฐนันท์. 2540. การใช้ยูเอเอสบีบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อกรดแบบไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธงชัย มหัจฉริยวงศ์. 2549. ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการสร้างตะกอนเม็ดของระบบยูเอเอสบีใน การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศักดิ์ชัย สุริยจันทราทอง. 2542. วิศวกรรมการประปาและสุขาภิบาล. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์เว็อนแก้วการพิมพ์.
- ปริญา รัตนา. 2549. ผลของอัตราส่วนซีโอทีต่อซัลเฟตที่มีต่อซัลเฟตรีดักชันในระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภูคำ พิมพ์จักร. 2546. การใช้กระบวนการยูเอเอสบี-แอนีออกซิก-แอโรบิกในการบำบัดน้ำเสียที่มี ความเค็มและไนโตรเจนสูงจากน้ำเสียสะพานปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มันสิน ตันฑุลเวศม์ . 2536. การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ . 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- อนุตร เปียงแก้ว. 2542. การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดแหล่งคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุรษา เศรษฐธีรกิจ. 2542. ผลของความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช . 2544. ประมวลสาระชุดวิชาการจัดการคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม. นนทบุรี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- สุรภี เบญจปัญญางศ์. 2549. ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, Y.H. 2000. Physicochemical and microbial aspects of anaerobic granular pellets. Journal Environmental Science and Health A35(9): 1617–1635.
- Callado, N.H., and Foresti, E. 1992. Response of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor to Increasing Sulfate Concentrations. 47th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings: 437-443.
- Chen, J., and Lun, S.-Y. 1993. Study on mechanism of anaerobic sludge granulation in UASB reactors. Water Science and Technology 28(7): 171–178.
- Chiu, Y.L., and Chin-Chao Chen. 2001. Toxicity-resistance of sludge biogranules to heavy metals. Biotechnology and Bioengineering 19: 224-228.

- Dolfing, J. 1987. Microbiological aspects of granular methanogenic sludge. Ph.D. Thesis, Agricultural University Wageningen, Netherlands.
- De, Zeeuw., Lettinga, G., Van Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., W. and Klapwijk, A. 1980. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering 22: 699-734.
- Dubourgier, H.C., Prensier G. and Albagnac G., 1987. Structure and microbial activities of granular anaerobic sludge. Microbiology and Technology: 18-33.
- Eckenfelder, WW., Jr. 2000. Industrial water pollution control . Third edition. McGraw-Hill, Singapore.
- Fang, H.H.P. 2000. Microbial distribution in UASB granules and its resulting effects. Water Science Technology 42(12): 201-208.
- Gottschalk, G. 1986. Bacterial Metabolism. Springer Verlag. New York, USA: 380.
- Grotenhuis, J.T.C., Koornneef, E., and Plugge, C.M., 1987. Immobilization of anaerobic bacteria in methanogenic aggregates., Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology: 187-194.
- Guiot, S.R., Pauss, A., and Costerton, J.W., 1992. A structure model of the anaerobic granule consortium. Water Science and Technology 25(7): 1-10.
- Hendriksen, H.V., and Ahring, B.K. 1996. Integrated removal of nitrate and carbon in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors. Water Research 30: 1451-1458.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J.C., and Arvin, E. 1996. Wastewater treatment: biological and chemical processes Berlin: Springer-Verlag.
- Hulshoff Pol, L.W., De Zeeuw, W.J. Velzeboer C.T.M. and Lettinga, G. 1983. Granulation in UASB reactors. Water Science Technology 15 8(9): 291-304.
- Hulshoff Pol, L.W., Lettinga, G., Lens, P.N.L. 2004. Anaerobic sludge granulation. Water Research 38: 1376-1389.
- Hyun S.J., Yong H.K., Sung H.Y., Bong K.S. and Sang Il Lee. 2003. Facilitated UASB granule formation using organic-inorganic hybrid polymers. Process Biochemistry 40, Issue 1: 89-94.

- Journey, W.K. and McNiven. 1996. Anaerobic Enhanced Treatment of Wastewater and Options for Further Treatment. USAID Global Environment Bureau.
- Kugelman and P.L. McCarty, 1965. Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment, Water Pollution. Control Fed. 37: 97.
- Lens P. N. L., Klijn R., van Lier J. B. and Lettinga G. 2003. Effect of specific gas loading rate on thermophilic(55°C) acidifying (pH 6) and sulfate reducing granular sludge reactors. Water Research 37: 1033-1047.
- Lettinga, G., and Hulshoff Pol, L.W. 1991. UASB - Process design for various types of wastewater. Water Science and Technology 24(8): 87-107.
- Rinzema, A., Grin, P.C., Roersma, R.E., and Hobma, S.W. 1984. High rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews 2: 253-284.
- Lettinga, G., Roersm, R., and Grin, P. 1980. Anaerobic treatment of domestic sewage at ambient temperature using a granular bed UASB reactor. Biotechnology and Bioengineering 22: 1701-1723.
- MacLeod, F. A., Guiot, S.R., Costerton, J.W. 1990. Layered structure of bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor. Applied and Environmental Microbiology 56(6): 1598-1607.
- Madigan, M.T., Marris, B.L., 1997. Extremophiles. Scientific American (Apr): 82-87.
- McCarty, P.L. 1994. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Public Work 12.
- Morgan J.W., Evison L.M. and Forster C.F.1991. Internal architecture of anaerobic sludge granules. Environmental Microbiology 50: 211-226.
- Mosey et al., Mosey, F.E., Swanwick J.D. and Hughes, D.A. 1971. Factors affecting the availability of heavy metals to inhibit anaerobic digestion. Water Pollution 70: 668.
- Pereboom, J.H.F. 1994. Size distribution model for methanogenic granules from full scale UASB and IC reactors. Water Science Technology 30(12): 211-221.

- Vanderhaegen B., Ysebaert K., Favere K., van Wambeke M., Peeters T., Panic V., Vandenlangenbergh V. and Verstraete W. 1992. Acidogenesis in relation to in-reactor granule yield. Water Science Technology 25(7): 21–30.
- 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.
- Wiegant W.M., The 'spaghetti theory' on anaerobic sludge formation, or the inevitability of granulation. 1987. Microbiology and technology: 146–152.
- Sam-Soon P.A.L.N.S., Loewenthal R.E., Dold P.L. and Marais Gv.R. 1987. Hypothesis for pelletisation in the upflow anaerobic sludge bed reactor. Water SA 13(2): 69–80.
- Sander, G.J. 1966. Water pollution research-a key to wastewaters management. J.WPCF 38: 774.
- Schmidt J.E. and Ahring B.K. 1996. granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. Biotechnology Bioengineering 49: 229–246.
- Show, K.Y., Wang, Y., Foong, S.F., and Tay, J.H. 2004. Accelerated start-up and Enhanced granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactors. Water Research 38: 2293-2304.
- Singh, R.P., Kumar, S., and Ojha, C.S.P. 1999. Nutrient requirement for UASB process. Biochemical Engineering 3: 35-54.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Tennessee: Archae press.
- Teo K.C., Tay J.H., Xu H.L. 2000. Molecular mechanism of granulation. I: H⁺ translocation–dehydration theory. Environmental Engineering 126: 403–410.
- Thaveesri J., Daffonchio D., Liessens B., Vandermeren P. and Verstraete W. 1995. Granulation and sludge bed stability in upflow anaerobic sludge bed reactors in relation to surface thermodynamics. Applied and Environmental Microbiology 61(10): 3681–3686.
- Takashi Yamaguchi , Hideki Harada, Tomoaki Hisano, Shinichi Yamazaki and I-Cheng . Process behavior of UASB reactor treating a wastewater containing high strength sulfate. Water Research 33: 3182-3190.

- Wang, F., Yang, F., Qi, A., 2005. Nitrifying and denitrifying bacteria in aerobic granules formed in sequencing batch airlift reactors. *Environmental Science* 25(2): 218-221.
- Wu Wei-min., Jain M.K. and Zeikus J.G. 1996. Formation of fatty acid-degrading anaerobic granules by defined species. *Applied and Environmental Microbiology* 62(6): 2037-2044.
- Yu, H.Q., Tay, J.H., and Fang, H.H.H. 2000. The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor Start-up. *Water Research* 35: 1052-1060.
- Yu, H.Q., Fang, H.H.H., and Tay, J.H. 2001. Enhanced sludge granulation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors by aluminum chloride. *Chemosphere* 44: 31-36.
- Zhu J., Hu J. and Gu X.1997. The bacterial numeration and the observation of a new syntrophic association for granular sludge. *Wat Sci Tech* 36 6/7: 133-140.





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ ก.1 พีเอชของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	พีเอช					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	22/5/2552	7.93	7.54	6.99	7.78	7.29	7.76
4	25/5/2552	7.48	7.74	7.80	7.06	7.36	7.75
7	27/5/2552	7.03	7.83	7.16	7.72	7.19	7.93
8	28/5/2552	7.74	7.91	7.46	7.95	6.99	7.37
11	1/6/2552	7.98	7.79	7.31	7.71	7.74	7.82
14	4/6/2552	7.17	7.79	6.99	7.05	7.46	7.78
17	8/6/2552	7.83	7.73	7.32	7.80	6.90	7.79
18	9/6/2552	7.52	8.01	6.88	7.09	7.11	7.79
21	11/6/2552	7.19	7.84	7.54	7.17	7.02	7.90
24	14/6/2552	8.06	7.87	8.05	7.17	7.05	8.16
25	15/6/2552	7.08	7.99	6.87	7.88	7.63	7.79
28	18/6/2552	7.41	7.90	7.63	7.23	7.60	8.07
30	20/6/2552	7.69	7.65	7.59	7.07	7.51	7.92
31	21/6/2552	7.47	8.00	7.93	7.19	7.83	8.02
35	25/6/2552	7.74	7.99	7.81	8.04	7.58	7.73
37	27/6/2552	6.94	7.71	7.69	8.15	6.59	7.93
39	30/6/2552	7.28	7.61	8.10	8.05	8.03	7.80
41	2/7/2552	7.74	7.14	7.85	7.44	7.12	8.18
44	6/7/2552	7.10	7.61	7.07	7.89	6.99	8.13
45	7/7/2552	7.48	7.99	7.32	7.78	7.56	7.95
48	10/7/2552	7.12	7.74	7.08	7.81	6.99	7.67
51	13/7/2552	7.15	8.14	7.05	7.95	7.19	8.05
52	14/7/2552	7.71	8.04	7.69	7.93	7.63	7.94

ตารางที่ ก.1 พิเศษของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	พิเศษ					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
55	17/7/2552	7.03	8.13	7.37	7.91	7.17	7.90
56	18/7/2553	7.14	7.74	6.84	7.85	6.85	7.85
57	19/7/2552	7.20	7.87	7.26	7.85	7.14	7.84
60	22/7/2552	6.91	7.69	7.29	7.75	7.19	7.57
63	27/7/2552	7.75	7.49	7.77	7.99	7.71	7.81
64	28/7/2552	6.89	7.73	7.13	8.04	7.75	7.66
67	31/7/2552	7.15	7.76	7.72	8.04	7.17	7.97
69	3/8/2552	7.20	7.50	7.11	7.97	6.84	7.71
72	5/8/2552	7.03	7.68	6.98	7.96	7.33	7.69
73	6/8/2552	7.10	7.73	6.92	8.07	6.99	7.90
76	10/8/2552	7.19	7.77	7.19	8.15	6.94	7.94
79	12/8/2552	7.97	7.80	7.99	8.07	7.69	7.87
80	13/8/2552	7.18	8.05	7.37	8.15	6.96	7.76
83	17/8/2552	6.92	7.67	7.16	7.87	6.97	7.86
84	18/8/2552	7.32	7.52	7.71	7.98	7.44	7.32
87	21/8/2552	6.99	7.55	7.17	7.80	6.95	7.69
90	24/8/2552	7.15	7.67	7.38	7.99	7.12	7.36
91	25/8/2552	7.15	7.50	7.01	7.82	7.87	7.71
94	28/8/2552	6.93	7.57	7.37	8.12	6.97	7.92
97	31/8/2552	7.20	7.76	7.11	8.04	6.98	7.78
98	1/9/2552	7.46	7.45	7.71	7.62	7.23	7.70
99	2/9/2552	6.91	7.83	7.27	8.06	6.97	7.72
101	4/9/2552	6.96	7.55	7.12	7.82	6.93	7.80
103	7/9/2552	7.86	7.61	7.12	7.89	7.12	7.60
104	8/9/2552	6.98	7.81	7.45	8.06	7.39	7.94
105	11/9/2552	7.12	7.91	7.23	8.01	7.12	7.88

ตารางที่ ก.1 พิเศษของการทดลองครั้งที่ 1 (ต่อ)

	วัน/เดือน/ปี	พิเศษ					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
	ค่ามากที่สุด	8.06	8.14	8.10	8.15	8.03	8.18
	ค่าน้อยที่สุด	6.89	7.14	6.84	7.05	6.59	7.32
	ผลรวม	358.53	379.90	360.93	381.79	355.15	382.98
	เฉลี่ย	7.32	7.75	7.37	7.79	7.25	7.82
	SD	0.34	0.20	0.34	0.33	0.33	0.18

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของการทดลองครั้งที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	22/5/2552	28.6	27.2	28.2	28.2	28.0	28.0
4	25/5/2552	28.7	28.3	28.9	28.6	28.9	28.6
7	27/5/2552	29.0	28.0	28.7	28.0	28.6	28.2
8	28/5/2552	28.1	28.0	28.1	28.1	28.1	27.7
11	1/6/2552	27.7	28.0	27.7	28.0	27.9	28.1
14	4/6/2552	26.9	27.4	27.4	27.5	27.4	27.5
17	8/6/2552	27.8	27.3	27.9	28.1	26.9	28.1
18	9/6/2552	27.9	27.9	28.0	28.5	28.1	28.1
21	11/6/2552	28.5	28.3	28.5	28.5	27.8	28.2
24	14/6/2552	27.4	27.1	27.0	26.9	26.8	27.2
25	15/6/2552	27.9	27.8	28.0	28.5	28.0	28.1
28	18/6/2552	27.6	27.6	27.4	27.5	27.1	27.5
30	20/6/2552	28.0	27.9	28.1	28.5	28.2	28.3
31	21/6/2552	27.7	27.9	28.1	28.2	28.1	28.5
35	25/6/2552	27.4	27.7	27.3	27.8	27.7	28.4
37	27/6/2552	28.2	28.5	28.4	28.6	28.4	28.5

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
39	30/6/2552	28.3	27.6	28.4	27.6	28.0	27.4
41	2/7/2552	27.4	28.1	27.5	28.4	27.5	27.4
44	6/7/2552	27.5	27.4	27.5	27.4	27.5	27.3
45	7/7/2552	27.5	27.6	27.9	28.3	27.8	28.1
48	10/7/2552	27.2	26.4	27.0	27.0	27.2	27.0
51	13/7/2552	26.4	26.5	26.3	26.4	26.4	26.5
52	14/7/2552	28.1	27.7	27.6	27.6	27.8	28.0
55	17/7/2552	26.7	26.5	26.5	26.6	26.5	26.3
56	18/7/2553	26.7	26.8	26.6	26.8	26.6	26.9
57	19/7/2552	27.5	28.0	26.8	28.0	27.7	28.3
60	22/7/2552	27.7	27.4	27.5	27.5	28.5	27.4
63	27/7/2552	27.4	27.3	27.5	27.2	27.6	27.3
64	28/7/2552	27.4	26.6	26.9	26.9	27.3	27.4
67	31/7/2552	26.9	27.2	27.2	27.1	27.0	27.2
69	3/8/2552	27.5	27.2	27.4	28.1	27.8	28.1
72	5/8/2552	27.7	27.9	28.1	28.1	27.6	28.1
73	6/8/2552	28.0	28.3	28.0	28.7	28.2	28.3
76	10/8/2552	28.6	28.4	28.5	29.0	28.6	28.8
79	12/8/2552	27.6	28.0	27.9	28.1	28.1	28.1
80	13/8/2552	27.9	27.7	27.7	28.1	27.9	28.0
83	17/8/2552	28.7	28.5	28.8	28.8	28.8	28.9
84	18/8/2552	28.5	28.2	28.6	28.3	28.4	28.4
87	21/8/2552	28.3	28.3	28.2	28.3	28.3	28.3
90	24/8/2552	28.9	29.1	28.7	29.0	28.6	29.0
91	25/8/2552	27.8	27.7	27.7	27.6	27.5	27.6
94	28/8/2552	26.5	26.7	26.6	26.6	26.8	26.6

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
97	31/8/2552	26.9	26.9	27.1	26.8	27.1	27.0
98	1/9/2552	27.0	26.4	27.0	26.6	27.0	26.7
99	2/9/2552	27.5	27.1	27.3	27.1	27.4	27.3
101	4/9/2552	27.6	27.3	27.5	27.8	27.6	27.9
103	7/9/2552	26.9	26.9	27.1	27.2	27.6	27.5
104	8/9/2552	27.8	27.8	27.7	27.7	27.8	27.9
105	11/9/2552	26.8	27.8	27.8	27.7	27.8	27.9
	ค่ามากที่สุด	29.0	29.1	28.9	29.0	28.9	29.0
	ค่าน้อยที่สุด	26.4	26.4	26.3	26.4	26.4	26.3
	ผลรวม	1,356.6	1,352.2	1,356.6	1,316.9	1,358.3	1,361.9
	เฉลี่ย	27.9	27.6	27.7	27.8	27.7	27.8
	SD	0.64	0.62	0.64	0.69	0.61	0.63

ตารางที่ ก.3 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	3/6/2552	260.0	460.0	352.5	455.0	412.5	507.5
5	4/6/2552	300.0	420.0	340.0	480.0	400.5	525.5
7	10/6/2552	387.5	490.0	332.5	420.0	267.5	492.5
10	11/6/2552	350.0	480.0	340.0	386.8	407.5	425.0
14	17/6/2552	400.0	457.5	265.0	372.5	267.5	422.5
16	18/6/2552	435.0	455.0	302.50	452.50	360.0	405.0
19	24/6/2552	267.5	445.0	295.0	310.0	257.5	457.5
23	25/6/2552	462.0	477.5	525.0	462.5	512.5	477.5
25	1/7/2552	483.0	587.5	550.0	675.0	547.5	747.5

ตารางที่ ก.3 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
28	2/7/2552	342.5	567.5	405.0	610.0	455.0	605.0
32	8/7/2552	372.5	665.0	372.5	502.5	425.0	685.0
34	9/7/2552	482.5	582.5	375.0	540.0	467.5	567.5
37	15/7/2552	435.0	500.0	315.0	410.0	287.5	535.0
41	16/7/2552	387.5	445.5	362.5	392.5	412.5	487.5
43	22/7/2552	292.5	342.5	337.5	352.5	300.0	375.0
46	23/7/2552	262.5	290.0	257.5	365.0	252.5	405.0
48	29/7/2552	312.5	367.5	275.0	437.5	300.0	450.0
50	30/7/2552	337.5	462.5	302.5	472.5	355.0	490.0
53	5/8/2552	240.0	440.0	282.5	420.0	275.0	432.5
57	6/8/2552	340.0	425.0	310.0	412.5	355.0	400.0
59	12/8/2552	307.5	402.5	310.0	365.0	325.0	410.0
60	13/8/2552	320.0	392.5	315.0	402.5	330.0	413.5
65	19/8/2552	245.0	387.5	230.0	360.0	300.0	335.0
70	20/8/2552	232.5	337.5	277.5	380.0	280.0	310.0
75	26/8/2552	295.0	405.0	287.5	382.5	277.5	390.0
80	27/8/2552	302.5	385.0	312.5	360.0	295.0	387.5
85	2/9/2552	262.5	360.0	230.0	377.5	220.0	345.0
90	3/9/2552	295.0	400.0	262.5	365.0	252.5	400.0
95	9/9/2552	270.0	380.0	230.0	230.0	237.5	325.0
105	10/9/2552	285.0	375.0	255.0	350.0	260.0	365.0
	ค่ามากที่สุด	483.0	665.0	550.0	675.0	547.5	747.5
	ค่าน้อยที่สุด	232.5	290.0	230.0	230.0	220.0	310.0
	ผลรวม	9,965.0	13,185.5	9,607.5	12,501.8	10,095.5	13,547
	เฉลี่ย	332.2	439.5	320.3	416.7	336.5	452.5

ตารางที่ ก.4 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก)					
		ถึงปฏิกิริยาที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกิริยาที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกิริยาที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	27/5/2552	60	110	80	135	85	102
8	3/6/2552	100	125	75	102	90	103
15	10/6/2552	60	105	65	125	75	111
22	17/6/2552	80	115	75	115	80	110
29	24/6/2552	60	125	40	150	40	105
36	1/7/2552	60	120	50	125	55	110
43	8/7/2552	65	95	80	100	60	105
50	15/7/2552	38	98	45	113	45	170
57	16/7/2552	60	111	68	115	48	105
64	22/7/2552	50	95	35	85	20	80
71	29/7/2552	50	105	55	128	30	85
78	5/8/2552	68	150	73	120	58	155
85	12/8/2552	73	110	60	95	70	100
92	19/8/2552	65	133	60	108	73	105
99	26/8/2552	65	140	75	170	60	160
101	2/8/2552	80	165	105	180	85	170
105	9/8/2552	65	100	70	150	80	100
	ค่ามากที่สุด	100	165	105	180	90	170
	ค่าน้อยที่สุด	38	95	35	85	20	80
	ผลรวม	1,099	2,002	1,111	2,116	1,054	1,976
	เฉลี่ย	65	118	65	124	62	116

ตารางที่ ก.5 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	26/5/2552	6.5	10.0	6.8	10.4	6.2	8.7
8	2/6/2552	8.0	12.0	5.7	9.6	5.0	8.0
15	9/6/2552	6.8	10.4	5.6	14.4	6.0	12.0
22	18/6/2552	5.8	8.0	3.8	14.2	4.4	12.8
29	23/6/52	2.2	18.6	2.0	17.0	3.4	18.2
36	30/6/2552	5.2	5.8	5.4	6.6	5.6	8.6
43	7/7/2552	3.8	6.0	2.2	5.2	3.0	6.6
50	14/7/2552	1.4	5.2	2.4	7.4	2.4	6.6
57	15/7/2552	2.3	6.1	3.8	8.4	3.4	6.0
64	21/7/2552	3.6	6.0	2.8	5.0	3.2	5.6
71	28/7/2552	2.6	5.8	3.8	7.0	2.2	8.8
78	4/8/2552	3.0	5.0	2.4	5.6	2.0	6.0
85	11/8/2552	3.6	5.2	1.6	5.6	2.4	6.2
92	18/8/2552	3.6	7.2	3.4	7.0	4.0	7.8
99	25/8/2552	4.0	6.4	1.8	6.2	2.4	6.0
101	1/9/2552	2.0	4.4	3.0	6.0	0.8	5.2
105	8/9/2552	3.6	6.8	2.6	6.6	2.4	6.2
	ค่ามากที่สุด	8.0	18.6	6.8	17.0	6.2	18.2
	ค่าน้อยที่สุด	1.4	4.4	1.6	5.0	0.8	5.2
	ผลรวม	68.0	128.9	59.1	142.2	58.8	139.3
	เฉลี่ย	4.0	7.6	3.5	8.4	3.5	8.2

ตารางที่ ก.6 ซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
1	26/5/2552	9.00	10.40	8.70
8	2/6/2552	10.00	8.60	7.50
15	9/6/2552	8.80	9.00	7.45
22	18/6/2552	9.50	8.50	9.00
29	23/6/52	7.50	9.35	9.15
36	30/6/2552	8.50	9.00	9.50
43	7/7/2552	7.80	7.80	7.00
50	14/7/2552	9.15	8.50	4.50
57	15/7/2552	9.00	9.00	8.50
64	21/7/2552	5.70	7.50	8.00
71	28/7/2552	8.00	8.50	9.80
78	4/8/2552	8.60	6.50	9.00
85	11/8/2552	9.00	7.50	7.50
92	18/8/2552	9.85	8.00	8.50
99	25/8/2552	9.45	9.00	8.90
101	1/9/2552	7.60	7.60	9.15
105	8/9/2552	6.80	6.50	6.50
	ค่ามากที่สุด	10.00	10.40	9.80
	ค่าน้อยที่สุด	5.70	6.50	4.50
	ผลรวม	144.25	141.25	138.65
	เฉลี่ย	8.49	8.31	8.16

ตารางที่ ก.7 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	26/5/2552	52.5	1.8	6.9	1.7	29.4	1.4
8	2/6/2552	42.0	3.6	11.4	6.2	48.6	2.5
15	9/6/2552	67.0	3.7	5.8	3.1	41.7	2.4
22	16/6/2552	60.4	4.6	8.2	2.6	33.0	1.9
29	23/6/52	52.1	5.2	8.2	2.3	26.0	0.6
36	30/6/2552	44.1	10.0	11.7	3.0	84.7	4.2
43	7/7/2552	30.4	3.3	15.8	8.4	54.6	2.1
50	14/7/2552	68.4	3.0	14.6	1.0	28.3	2.4
57	15/7/2552	33.5	2.7	13.3	9.3	50.4	3.5
64	21/7/2552	46.0	8.6	10.6	4.1	60.8	3.1
71	28/7/2552	35.2	11.7	9.6	2.5	29.5	3.4
78	4/8/2552	59.9	7.6	11.6	7.1	51.9	2.6
85	11/8/2552	45.5	5.5	17.6	7.8	40.4	2.2
92	18/8/2552	39.4	14.5	21.3	8.3	21.2	4.7
99	25/8/2552	105.3	7.7	22.0	15.0	96.3	7.4
105	8/9/2552	108.0	8.6	21.4	10.5	73.7	2.6
	ค่ามากที่สุด	108.0	14.5	22.0	15.0	96.3	7.4
	ค่าน้อยที่สุด	30.4	1.8	5.8	1.0	21.2	0.6
	ผลรวม	889.7	102.1	210.0	92.9	770.5	47.0
	เฉลี่ย	55.6	6.4	13.1	5.8	48.2	2.9

ตารางที่ ก.8 ซีโอติของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอติ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	22/5/2552	520	40	624	64	616	96
3	25/5/2552	520	40	664	64	520	64
6	28/5/2552	640	80	584	40	504	16
10	1/5/2552	640	64	624	120	584	16
14	4/6/2552	560	40	664	64	696	120
22	8/6/2552	600	96	656	64	616	160
25	11/6/2552	696	40	680	64	664	80
29	15/6/2552	600	80	600	104	624	64
30	18/6/2552	640	40	616	80	624	104
ผลรวม		5,416	520	5,712	664	5,448	720
ค่าเฉลี่ย		601.78	57.78	634.67	73.78	605.33	80.00
31	22/6/2552	1,392	64	1,440	80	1,488	216
34	25/6/2552	1,152	40	1,072	40	1,120	64
38	29/7/2552	1,200	66	1,312	53	1,408	53
41	2/7/2552	1,102	47	1,368	66	1,062	53
45	6/7/2552	1,222	86	1,169	100	1,102	66
48	9/7/2552	1,255	86	1,200	166	1,180	153
51	13/7/2552	1,195	96	1,089	80	1,036	40
55	16/7/2552	1,262	96	1,222	144	1,222	64
ผลรวม		9,780	581	9,872	729	9,618	709
ค่าเฉลี่ย		1,223	76.63	1,234	91.13	1,202	88.63

ตารางที่ ก.8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
57	20/7/2552	1,728	80	1,712	144	1,808	120
58	23/7/2552	1,808	80	1,760	104	1,680	104
59	27/7/2552	1,712	96	1,760	120	1,648	40
60	30/7/2552	1,872	80	1,712	104	1,760	96
61	3/8/2552	1,872	96	1,760	184	1,840	56
65	6/8/2552	1,792	64	1,808	96	1,920	96
68	10/8/2552	1,760	64	1,792	144	1,680	136
80	13/8/2552	1,792	64	1,888	184	1,760	96
ผลรวม		14,336	624	14,192	1,080	14,096	744
ค่าเฉลี่ย		1,792	78	1,774	135	1,762	93
81	17/8/2552	2,368	64	2,400	96	2,320	96
84	20/8/2552	2,288	80	2,400	160	2,352	120
88	24/8/2552	2,352	64	2,608	104	2,448	176
91	27/8/2552	2,624	80	2,560	96	2,510	184
95	31/8/2552	2,352	56	2,560	136	2,272	24
98	3/9/2552	2,288	144	2,400	144	2,432	176
100	7/9/2552	2,352	104	2,320	104	2,320	80
105	10/9/2552	2,608	64	2,400	80	2,448	80
ผลรวม		19,232	656	19,648	920	19,102	936
ค่าเฉลี่ย		2,404	82	2,456	115	2,388	117

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
1	22/5/2552	92.31	89.74	84.42
3	25/5/2552	92.31	90.36	87.69
6	28/5/2552	87.50	93.15	96.83
10	1/5/2552	90.00	80.77	97.26
14	4/6/2552	92.86	90.36	82.76
22	8/6/2552	84.00	90.24	74.03
25	11/6/2552	94.25	90.59	87.95
29	15/6/2552	86.67	82.67	89.74
30	18/6/2552	93.75	87.01	83.33
ผลรวม		83.65	794.89	784.01
ค่าเฉลี่ย		90.63	88.32	87.11
31	22/6/2552	95.40	94.44	85.43
34	25/6/2552	96.53	96.27	94.29
38	29/7/2552	94.50	95.95	96.23
41	2/7/2552	95.74	95.18	95.01
45	6/7/2552	92.96	91.45	94.01
48	9/7/2552	93.15	86.17	87.03
51	13/7/2552	91.97	92.65	96.14
55	16/7/2552	92.39	88.21	94.76
ผลรวม		752.64	740.32	754.90
ค่าเฉลี่ย		94.08	92.54	92.86

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
57	20/7/2552	95.37	91.59	93.36
58	23/7/2552	95.58	94.09	93.81
59	27/7/2552	94.39	93.18	97.57
60	30/7/2552	95.73	93.93	94.55
61	3/8/2552	94.87	89.55	96.96
65	6/8/2552	96.43	94.69	95.00
68	10/8/2552	96.36	91.96	91.90
80	13/8/2552	96.43	90.25	94.55
ผลรวม		765.16	739.24	757.70
ค่าเฉลี่ย		95.65	92.41	94.71
81	17/8/2552	97.30	96.00	95.86
84	20/8/2552	96.50	93.33	94.90
88	24/8/2552	97.28	96.01	92.81
91	27/8/2552	96.95	96.25	92.68
95	31/8/2552	97.62	94.69	98.94
98	3/9/2552	93.71	94.00	92.76
100	7/9/2552	95.58	96.67	96.73
105	10/9/2552	97.55	96.67	96.73
ผลรวม		772.49	763.62	761.41
ค่าเฉลี่ย		96.56	95.45	95.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	22/5/2552	62.51	0.51	55.79	0.67	61.34	0.91
3	25/5/2552	59.20	1.54	59.49	2.87	58.32	4.46
6	28/5/2552	61.75	0.91	59.69	1.24	61.26	1.20
10	1/6/2552	60.94	0.47	62.31	0.71	62.27	0.95
14	4/6/2552	61.26	0.95	62.39	0.47	63.92	1.20
22	8/6/2552	56.19	0.47	56.51	0.87	61.38	1.44
25	11/6/2552	61.34	1.20	57.40	0.91	56.71	1.24
29	15/6/2552	59.61	0.91	62.39	0.59	59.25	1.20
30	18/6/2552	60.38	0.87	61.22	0.71	62.27	0.53
31	22/6/2552	62.43	0.99	60.78	0.99	62.39	1.08
34	25/6/2552	58.32	0.39	56.31	1.44	57.24	2.97
38	29/6/2552	56.51	1.44	56.27	1.80	56.63	3.33
41	2/7/2552	53.41	2.69	59.01	2.97	52.04	3.29
45	6/7/2552	62.35	1.88	57.68	1.96	60.74	0.39
48	9/7/2552	61.35	0.67	56.40	3.33	60.54	1.32
51	13/7/2552	61.87	2.24	60.18	1.20	56.03	1.68
55	16/7/2552	59.85	0.71	60.02	0.67	60.38	0.79
57	20/7/2552	63.36	1.20	62.55	1.72	62.31	1.72
58	23/7/2552	54.74	0.67	58.20	0.95	62.79	1.20
59	27/7/2552	61.26	1.04	65.69	0.91	58.16	0.79
60	30/7/2552	62.15	1.96	59.35	3.69	63.36	1.68
61	3/8/2552	56.11	2.69	56.79	0.79	57.40	0.63
65	6/8/2552	60.14	0.47	60.82	0.63	60.65	1.16
68	10/8/2552	58.24	2.08	58.40	0.43	63.39	4.30
80	13/8/2552	60.42	0.47	62.35	0.51	60.26	3.89
81	17/8/2552	63.48	3.85	59.65	2.65	56.88	3.45

ตารางที่ ก.10 ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1(ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
84	20/8/2552	60.38	1.20	60.54	1.76	62.11	1.24
88	24/8/2552	60.38	3.65	64.97	1.16	60.54	0.43
91	27/8/2552	60.26	1.80	59.33	3.89	60.54	0.71
95	31/8/2552	58.69	1.20	57.48	0.55	59.65	0.10
98	3/9/2552	58.53	0.31	60.38	4.38	59.89	4.78
100	7/9/2552	60.94	1.70	59.29	1.40	61.14	0.71
105	10/9/2552	59.33	4.90	60.42	0.71	60.30	2.08
	ค่ามากที่สุด	63.48	4.90	65.69	4.38	63.92	4.78
	ค่าน้อยที่สุด	53.41	0.31	55.79	0.43	52.04	0.10
	ผลรวม	1,977.68	48.03	1,970.05	49.53	1,982.08	56.85
	เฉลี่ย	59.93	1.46	59.70	1.50	60.06	1.72

ตารางที่ ก.11 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดไนเตรท		
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
1	22/5/2552	99.18	98.80	98.52
3	25/5/2552	97.40	95.18	92.35
6	28/5/2552	98.53	97.92	98.04
10	1/6/2552	99.23	98.86	98.47
14	4/6/2552	98.45	99.25	98.12
22	8/6/2552	99.16	98.46	97.65
25	11/6/2552	98.04	98.41	97.81
29	15/6/2552	98.39	99.05	97.97
30	18/6/2552	98.56	98.84	99.15
31	22/6/2552	98.41	98.37	98.27

ตารางที่ ก.11 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดไนเตรท		
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
34	25/6/2552	99.33	97.44	94.81
38	29/6/2552	97.45	96.80	94.12
41	2/7/2552	94.96	94.97	93.68
45	6/7/2552	96.98	96.60	99.36
48	9/7/2552	98.90	94.09	97.82
51	13/7/2552	96.38	98.01	97.00
55	16/7/2552	98.81	98.88	98.69
57	20/7/2552	98.11	97.25	97.24
58	23/7/2552	98.78	98.37	98.09
59	27/7/2552	98.30	98.61	98.64
60	30/7/2552	96.85	93.78	97.35
61	3/8/2552	95.21	98.61	98.90
65	6/8/2552	99.22	98.96	98.09
68	10/8/2552	96.43	99.26	93.22
80	13/8/2552	99.22	99.18	93.54
81	17/8/2552	93.94	95.56	93.93
84	20/8/2552	98.01	97.09	98.00
88	24/8/2552	93.95	98.21	99.29
91	27/8/2552	97.01	93.44	98.83
95	31/8/2552	97.96	99.04	99.83
98	3/9/2552	99.47	92.75	92.02
100	7/9/2552	97.21	97.64	98.84
105	10/9/2552	91.74	98.82	96.55
	ค่ามากที่สุด	99.47	99.26	99.83
	ค่าน้อยที่สุด	91.74	92.75	92.02
	ผลรวม	3,219.57	3,216.5	3,204.19
	เฉลี่ย	97.80	97.83	97.31

ตารางที่ ก.12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	22/5/2552	90.47	23.41	89.57	30.95	93.13	24.92
3	25/5/2552	87.30	58.07	92.58	61.53	89.06	65.87
6	28/5/2552	96.80	69.21	93.08	69.11	94.19	61.41
10	1/6/2552	94.09	56.96	88.31	51.41	91.37	72.93
14	4/6/2552	93.84	50.91	88.81	47.09	93.34	61.52
22	8/6/2552	93.89	47.54	88.81	36.43	93.34	42.71
25	11/6/2552	95.40	44.73	89.57	54.63	90.07	55.99
29	15/6/2552	93.49	47.69	93.23	38.79	94.89	44.52
30	18/6/2552	92.48	38.19	93.34	48.88	94.59	49.75
31	22/6/2552	94.59	38.99	93.23	56.24	94.04	30.59
34	25/6/2552	92.58	37.13	93.54	53.62	92.13	29.44
38	29/6/2552	94.84	63.98	91.63	54.43	94.19	51.11
41	2/7/2552	93.59	48.34	92.63	40.05	98.26	37.79
45	6/7/2552	88.56	38.39	88.56	36.53	92.08	46.33
48	9/7/2552	89.46	29.24	89.98	43.27	91.05	50.71
51	13/7/2552	93.08	35.83	90.57	33.11	87.35	23.71
55	16/7/2552	87.30	27.13	93.94	20.45	90.02	27.43
57	20/7/2552	86.50	29.19	89.41	37.29	87.55	25.62
58	23/7/2552	87.40	32.06	90.97	22.46	82.48	23.91
59	27/7/2552	91.53	33.57	88.96	27.38	91.37	22.75
60	30/7/2552	94.64	23.56	89.82	23.91	95.15	23.46
61	3/8/2552	92.43	19.64	90.92	18.48	94.04	21.25
65	6/8/2552	94.59	31.05	94.44	24.97	93.94	27.53
68	10/8/2552	90.32	22.81	92.58	16.27	91.63	25.47
80	13/8/2552	94.14	18.43	93.08	23.21	94.59	25.22
81	17/8/2552	93.64	19.44	89.62	29.34	87.55	22.36

ตารางที่ ก.12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1(ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
84	20/8/2552	89.62	29.64	93.08	19.64	90.62	24.27
88	24/8/2552	90.02	24.06	94.64	16.62	90.52	29.39
91	27/8/2552	89.62	17.68	94.84	31.45	94.49	28.19
95	31/8/2552	86.19	19.29	93.34	18.94	90.37	17.13
98	3/9/2552	94.04	13.36	90.32	16.42	94.64	13.61
100	7/9/2552	94.04	22.00	89.41	20.65	87.03	19.39
105	10/9/2552	90.47	21.15	90.37	16.17	94.64	19.44
	ค่ามากที่สุด	96.80	69.21	94.84	69.11	98.26	72.93
	ค่าน้อยที่สุด	86.19	13.36	88.31	16.17	82.48	13.61
	ผลรวม	3,030.95	1,132.67	3,017.18	1,139.72	3,033.71	1,145.72
	เฉลี่ย	91.85	34.32	91.43	34.54	91.93	34.72

ตารางที่ ก.13 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟต		
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
1	22/5/2552	74.12	65.45	73.24
3	25/5/2552	33.48	33.54	26.04
6	28/5/2552	28.50	25.75	34.80
10	1/6/2552	39.46	41.78	20.18
14	4/6/2552	45.75	46.98	34.09
22	8/6/2552	49.37	58.98	54.24
25	11/6/2552	53.11	39.01	37.84
29	15/6/2552	48.99	58.39	53.08
30	18/6/2552	58.70	47.63	68.88
31	22/6/2552	58.78	39.68	67.47

ตารางที่ ก.13 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของการทดลองครั้งที่ 1 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟต		
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
34	25/6/2552	59.89	42.68	46.00
38	29/6/2552	32.54	40.60	45.74
41	2/7/2552	48.35	56.76	61.54
45	6/7/2552	56.65	58.75	49.69
48	9/7/2552	67.32	51.91	44.30
51	13/7/2552	61.51	63.44	72.68
55	16/7/2552	68.92	78.23	69.53
57	20/7/2552	66.25	58.29	69.59
58	23/7/2552	63.32	75.31	71.01
59	27/7/2552	63.32	69.22	75.10
60	30/7/2552	75.11	73.38	75.34
61	3/8/2552	78.75	79.67	77.40
65	6/8/2552	67.17	73.56	70.69
68	10/8/2552	74.75	82.43	72.20
80	13/8/2552	80.42	75.06	73.34
81	17/8/2552	79.24	67.26	74.46
84	20/8/2552	66.93	78.90	73.22
88	24/8/2552	73.27	82.80	67.53
91	27/8/2552	80.27	64.79	70.17
95	31/8/2552	77.62	79.71	81.04
98	3/9/2552	85.79	81.82	85.62
100	7/9/2552	76.61	76.90	77.72
105	10/9/2552	76.62	82.11	79.46
	ค่ามากที่สุด	85.79	82.80	85.62
	ค่าน้อยที่สุด	28.50	25.75	20.18
	ผลรวม	2,070.88	2,050.77	2,053.23
	เฉลี่ย	62.75	62.14	62.22

ตารางที่ ก.14 ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตรต่อวัน)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทราย	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 แป้งมัน	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้า
27/5/2552	750	500	470
3/6/2552	700	570	600
10/6/2552	600	450	450
18/6/2552	800	450	450
1/7/2552	600	570	520
8/7/2552	500	400	600
15/7/2552	620	550	550
16/7/2552	430	610	630
22/7/2552	520	510	580
29/7/2552	600	570	620
5/8/2552	640	550	450
12/8/2552	580	560	570
19/8/2552	650	670	560
26/8/2552	780	500	440
2/9/2552	520	610	450
9/9/2552	550	540	670
ค่ามากที่สุด	800	670	630
ค่าน้อยที่สุด	430	400	440
ผลรวม	9,840	8,610	8,610
เฉลี่ย	615	538	538

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองครั้งที่ 2

ตารางที่ ข.1 พิเศษของการทดลองครั้งที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	พิเศษ					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	19/10/2552	7.44	7.45	7.50	7.52	7.53	7.76
4	20/10/2552	7.05	7.50	7.15	7.65	7.16	7.45
7	23/10/2552	7.18	7.63	7.58	7.68	7.34	7.68
8	26/10/2552	7.15	7.47	7.12	7.80	7.38	7.69
11	27/10/2552	7.04	7.55	7.15	7.98	7.10	7.84
14	30/10/2552	7.01	7.45	7.08	7.63	7.14	7.85
17	2/11/2552	7.03	7.69	7.15	7.65	7.04	7.37
18	3/11/2552	7.06	7.89	7.07	7.85	7.14	7.96
21	6/11/2552	7.12	7.29	7.13	7.96	7.29	7.98
24	9/11/2552	7.02	7.66	7.05	7.62	7.10	7.96
25	10/11/2552	7.13	7.32	7.13	7.73	7.16	7.93
28	13/11/2552	7.05	7.45	7.13	7.83	7.15	7.96
29	16/11/2552	7.01	7.34	7.14	7.41	7.35	7.40
30	17/11/2552	7.09	7.55	7.13	7.59	7.20	7.93
	ค่ามากที่สุด	7.44	7.89	7.58	7.98	7.53	7.98
	ค่าน้อยที่สุด	7.01	7.29	7.05	7.41	7.04	7.37
	ผลรวม	99.38	105.24	100.51	107.90	101.08	108.76
	เฉลี่ย	7.10	7.52	7.18	7.71	7.22	7.77
	SD	0.11	0.16	0.16	0.16	0.14	0.22

ตารางที่ ข.2 คุณภาพของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	19/10/2552	27.5	26.9	27.4	27.4	27.4	27.0
4	20/10/2552	27.1	27.0	27.0	27.1	27.0	27.2
7	23/10/2552	26.9	26.5	26.8	26.4	26.9	26.3
8	26/10/2552	28.3	27.4	28.2	28.0	27.9	28.0
11	27/10/2552	28.1	27.5	28.0	27.2	27.4	27.4
14	30/10/2552	27.8	27.5	27.5	27.8	27.8	27.5
17	2/11/2552	25.6	24.9	25.1	25.4	25.6	25.5
18	3/11/2552	24.5	23.1	23.9	23.7	24.1	23.6
21	6/11/2552	25.2	24.3	25.0	24.4	25.0	24.6
24	9/11/2552	27.3	26.9	27.5	27.7	27.0	27.0
25	10/11/2552	27.7	26.6	27.5	27.4	27.5	27.2
28	13/11/2552	27.7	27.7	27.7	27.6	27.6	27.7
29	16/11/2552	29.2	28.7	28.9	29.0	29.0	29.0
30	17/11/2552	28.8	28.1	28.5	28.3	28.6	28.4
	ค่ามากที่สุด	29.2	28.7	28.9	29.0	29.0	29.0
	ค่าน้อยที่สุด	24.5	23.1	23.9	23.7	24.1	23.6
	ผลรวม	381.7	373.1	379.0	377.4	378.8	376.4
	เฉลี่ย	27.3	26.7	27.1	27.0	27.1	26.9
	SD	1.34	1.54	1.44	1.50	1.34	1.46

ตารางที่ ข.3 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	21/10/2552	240.0	325.0	280.0	390.0	265.0	360.0
2	22/10/2552	250.0	330.0	252.5	300.0	335.0	355.0
8	28/10/2552	232.5	405.0	230.0	345.0	275.0	395.0
9	29/10/2552	235.0	385.0	265.0	360.0	242.5	377.5
15	4/11/2552	280.0	320.0	290.0	355.0	280.0	330.0
16	5/11/2552	285.0	335.0	257.5	382.5	222.5	365.0
22	11/11/2552	285.0	380.0	280.0	390.0	265.0	400.0
23	12/11/2552	305.0	375.0	310.0	380.0	332.5	385.0
29	18/11/2552	225.0	337.5	255.0	330.0	215.0	342.5
30	19/11/2552	257.5	357.5	230.0	345.0	235.0	362.5
	ค่ามากที่สุด	305.0	405.0	310.0	390.0	335.0	400.0
	ค่าน้อยที่สุด	225.0	320.0	230.0	300.0	215.0	330.0
	ผลรวม	2,595.0	3,550.0	2,650	3,577.5	2,667.5	3,672.5
	เฉลี่ย	259.5	355.0	265.0	357.8	266.8	367.3

ตารางที่ ข.4 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติค)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	21/10/2552	45	110	65	155	55	135
8	28/10/2552	25	115	25	120	50	150
15	4/11/2552	35	120	25	125	30	120
22	11/11/2552	25	140	33	130	23	135
30	18/11/2552	35	110	30	125	40	115

ตารางที่ ข.4 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอซิดิก)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
	ค่ามากที่สุด	45	140	65	155	55	150
	ค่าน้อยที่สุด	25	110	25	125	23	115
	ผลรวม	165	595	178	655	198	655
	เฉลี่ย	33	119	36	131	40	131

ตารางที่ ข.5 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	20/10/2552	3.60	29.80	2.80	43.60	1.20	52.40
8	27/10/2552	4.00	21.20	2.40	40.40	1.60	50.40
15	5/11/2552	3.20	27.20	3.60	48.60	1.20	57.40
22	10/11/2552	3.60	26.00	2.40	47.20	2.00	57.60
30	17/11/2552	1.60	28.80	1.80	47.20	1.60	58.00
	ค่ามากที่สุด	4.00	29.80	3.60	48.60	2.00	58.00
	ค่าน้อยที่สุด	1.60	21.20	1.80	40.40	1.20	50.40
	ผลรวม	16.00	133.00	13.00	227.00	7.60	275.80
	เฉลี่ย	3.20	26.60	2.60	45.40	1.52	55.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 ซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
1	20/10/2552	11.50	10.00	8.50
8	27/10/2552	10.50	9.00	10.00
15	5/11/2552	9.50	8.50	11.00
22	10/11/2552	7.00	7.00	8.00
29	17/11/2552	11.00	10.50	9.00
30	24/11/2552	9.00	9.00	8.50
	ค่ามากที่สุด	11.50	10.50	11.00
	ค่าน้อยที่สุด	7.00	7.00	8.00
	ผลรวม	58.50	54.00	55.00
	เฉลี่ย	9.75	9.00	9.17

ตารางที่ ข.7 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	20/10/2552	274.30	19.50	253.40	23.00	212.00	18.10
8	27/10/2552	282.50	36.30	219.20	34.60	218.50	25.20
15	3/11/2552	254.50	27.90	216.10	31.50	199.20	19.60
22	10/11/2552	284.90	31.90	221.80	29.00	187.70	10.40
30	17/11/2552	254.50	37.70	220.80	26.90	209.10	20.00
	ค่ามากที่สุด	284.90	37.70	253.40	34.60	218.50	25.20
	ค่าน้อยที่สุด	254.50	19.50	216.10	23.00	187.70	10.40
	ผลรวม	1,350.70	153.30	1,131.30	145.00	1,026.50	93.30
	เฉลี่ย	270.14	30.66	226.26	29.00	205.30	18.66

ตารางที่ ข.8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	19/10/2552	3,744	249	5,400	162	7,344	131
4	22/10/2552	3,758	223	5,544	180	7,269	249
8	26/10/2552	3,819	154	5,544	185	7,392	192
11	29/10/2552	3,880	174	5,420	174	7,392	105
15	2/11/2552	3,696	174	5,729	192	7,269	123
18	5/11/2552	3,511	123	5,421	123	7,269	185
22	9/11/2552	3,696	236	5,359	166	7,392	180
25	12/11/2552	3,573	211	5,359	142	7,392	105
30	18/11/2552	3,881	236	5,421	180	7,207	120
	ค่ามากที่สุด	3,881	249	5,729	192	7,392	249
	ค่าน้อยที่สุด	3,511	123	5,359	123	7,207	105
	ผลรวม	33,558	1,780	49,197	1504	65,926	1,390
	เฉลี่ย	3,729	198	5,466	167	7,325	154

ตารางที่ ข.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
1	19/10/2552	93.35	97.00	98.22
4	22/10/2552	94.07	96.75	96.57
8	26/10/2552	95.97	96.66	97.40
11	29/10/2552	95.52	96.79	98.58
15	2/11/2552	95.29	96.65	98.31
18	5/11/2552	96.50	97.73	97.45
22	9/11/2552	93.61	96.90	97.56
25	12/11/2552	94.09	97.35	98.58
30	18/11/2552	93.92	96.68	98.33

ตารางที่ ข.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
	ค่ามากที่สุด	96.50	97.73	98.58
	ค่าน้อยที่สุด	93.35	96.65	97.40
	ผลรวม	852.32	872.51	881.00
	เฉลี่ย	94.70	96.95	97.89

ตารางที่ ข.10 ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	19/10/2552	58.40	4.34	62.00	4.90	59.50	4.01
4	22/10/2552	58.08	3.59	54.62	2.56	58.28	2.92
8	26/10/2552	60.70	3.47	61.99	2.48	61.50	2.67
11	29/10/2552	59.41	3.77	60.94	2.16	60.38	2.79
15	2/11/2552	60.62	2.16	60.26	3.85	60.54	2.16
18	5/11/2552	62.35	2.12	60.22	2.04	60.38	2.20
22	9/11/2552	60.14	2.61	60.26	2.80	60.94	2.48
25	12/11/2552	60.30	2.28	60.54	3.09	60.26	2.73
30	18/11/2552	64.32	2.53	63.12	3.69	60.46	2.93
	ค่ามากที่สุด	64.32	4.34	63.12	4.90	61.50	4.01
	ค่าน้อยที่สุด	58.08	2.12	54.62	2.04	58.28	2.16
	ผลรวม	544.32	26.87	543.95	27.57	542.24	24.89
	ค่าเฉลี่ย	60.48	2.99	60.44	3.06	60.25	2.77

ตารางที่ ข.11 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดไนเตรท		
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
1	19/10/2552	92.57	92.10	93.26
4	22/10/2552	93.82	95.31	94.99
8	26/10/2552	94.28	96.00	95.66
11	29/10/2552	93.65	96.46	95.38
15	2/11/2552	96.44	93.61	96.43
18	5/11/2552	96.60	96.61	96.36
22	9/11/2552	95.66	95.35	95.93
25	12/11/2552	96.22	94.90	95.47
30	18/11/2552	96.07	94.15	95.15
	ค่ามากที่สุด	96.60	96.61	96.43
	ค่าน้อยที่สุด	92.57	92.10	93.26
	ผลรวม	855.31	854.49	858.63
	เฉลี่ย	95.03	94.94	95.40

ตารางที่ ข.12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	19/10/2552	181.40	44.02	272.50	32.96	356.00	61.52
4	22/10/2552	179.70	45.97	268.02	39.54	356.70	60.63
8	26/10/2552	178.92	41.51	276.06	38.64	363.00	64.08
11	29/10/2552	178.86	40.80	270.90	39.40	360.06	50.71
15	2/11/2552	180.66	46.08	270.30	34.42	364.50	48.95
18	5/11/2552	182.10	46.18	276.06	48.80	368.40	53.27
22	9/11/2552	180.06	48.60	270.30	43.22	360.30	50.05
25	12/11/2552	180.30	46.79	276.06	41.36	360.48	39.60
30	18/11/2552	172.80	49.30	276.54	37.34	360.24	36.68

ตารางที่ ข.12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L		ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
	ค่ามากที่สุด	182.10	49.30	276.54	48.80	368.40	64.08
	ค่าน้อยที่สุด	172.80	40.80	268.02	32.96	356.00	36.68
	ผลรวม	1,614.80	409.25	2,456.74	355.68	3,249.68	465.49
	เฉลี่ย	179.42	45.47	272.97	39.52	361.08	51.72

ตารางที่ ข.13 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2

วันที่	วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟต		
		ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
1	19/10/2552	75.73	87.90	82.72
4	22/10/2552	74.42	85.25	83.00
8	26/10/2552	76.80	86.00	82.35
11	29/10/2552	77.19	85.46	85.92
15	2/11/2552	74.49	87.27	86.57
18	5/11/2552	74.64	82.32	85.54
22	9/11/2552	73.01	84.01	86.11
25	12/11/2552	74.05	85.02	89.01
30	18/11/2552	71.47	86.50	89.82
	ค่ามากที่สุด	77.19	87.90	89.82
	ค่าน้อยที่สุด	71.47	82.32	82.35
	ผลรวม	671.80	769.73	771.04
	เฉลี่ย	74.64	85.53	85.67

ตารางที่ ข.14 ก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตรต่อวัน)		
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 COD 3,600 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 COD 5,400 mg/L	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 COD 7,200 mg/L
21/10/2552	1,660	2,560	2,900
29/10/2552	1,700	2,750	2,760
4/11/2552	1,690	2,800	2,960
11/11/2552	1,750	2,650	2,800
ค่ามากที่สุด	1,750	2,800	2,860
ค่าน้อยที่สุด	1,660	2,560	2,950
ผลรวม	10,210	16,120	1,7230
เฉลี่ย	1,702	2,687	2,872

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มต้นการทดลอง, สิ้นสุดการทดลองครั้งที่ 1 และสิ้นสุดการทดลองครั้งที่ 2 แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฝ่ายการณมหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน : ศูนย์วิจัย ๕๒, ถนนวิภาวดีรังสิต, กรุงเทพมหานคร 10730 โทร 2188029-32, 2188101
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi ๕2 Phaya Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2541211

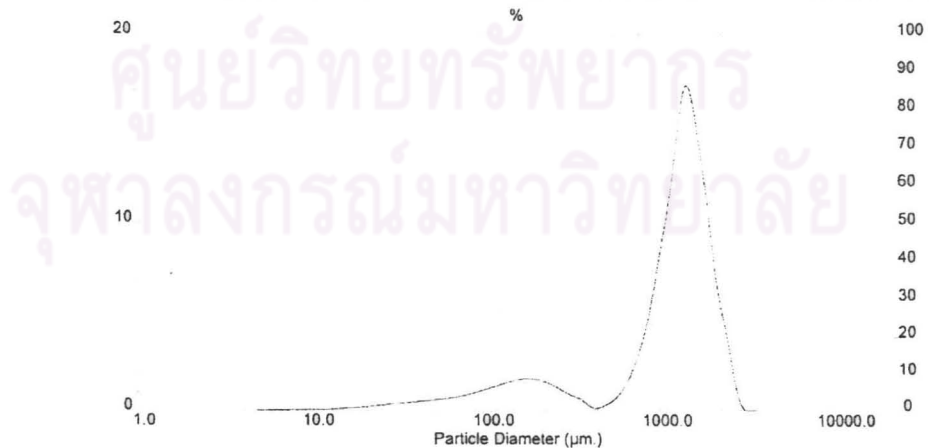
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Start	Run Number: 11	Measured: Wed Oct 7 2009 4:17PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 185	Analysed: Wed Oct 7 2009 4:17PM
Sample Path: D:\DATA11		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system Medium : water Stirrer speed : 50%		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.1 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 4.790 %
Analysis Model: Polydisperse	Modifications: None		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.5622 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 0.0188 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 140.63 um	D (v, 0.5) = 1171.00 um	D (v, 0.9) = 1771.26 um
D [4, 3] = 1094.33 um	D [3, 2] = 319.47 um	Span = 1.393E+00	Uniformity = 3.850E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.01	4.88	0.01	120.67	1.58	140.58	10.00
4.88	0.02	5.69	0.03	140.58	1.70	163.77	11.69
5.69	0.03	6.63	0.06	163.77	1.68	190.80	13.38
6.63	0.03	7.72	0.09	190.80	1.51	222.28	14.89
7.72	0.04	9.00	0.13	222.28	1.20	258.95	16.09
9.00	0.05	10.48	0.18	258.95	0.85	301.68	16.93
10.48	0.06	12.21	0.24	301.68	0.57	351.46	17.50
12.21	0.08	14.22	0.32	351.46	0.15	409.45	17.65
14.22	0.12	16.57	0.44	409.45	0.28	477.01	17.93
16.57	0.16	19.31	0.59	477.01	0.70	555.71	18.64
19.31	0.21	22.49	0.80	555.71	1.61	647.41	20.25
22.49	0.27	26.20	1.08	647.41	3.22	754.23	23.46
26.20	0.34	30.53	1.41	754.23	5.74	878.67	29.20
30.53	0.40	35.56	1.81	878.67	9.25	1023.66	38.45
35.56	0.46	41.43	2.28	1023.66	13.42	1192.56	51.87
41.43	0.53	48.27	2.80	1192.56	17.25	1389.33	69.13
48.27	0.60	56.23	3.40	1389.33	14.48	1618.57	83.61
56.23	0.69	65.51	4.09	1618.57	9.62	1885.64	93.23
65.51	0.81	76.32	4.90	1885.64	5.13	2196.77	98.36
76.32	0.97	88.91	5.87	2196.77	1.64	2559.23	100.00
88.91	1.17	103.58	7.04	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	1.38	120.67	8.42	2981.51	0.00	3473.45	100.00



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

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number:

p. 7
 07 Oct 09 16:24

ภาพที่ ค.1 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของตะกอนก่อนเริ่มต้นเดินระบบ



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 52 อ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-30, 2188101 โทรสาร 2-49211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 52 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

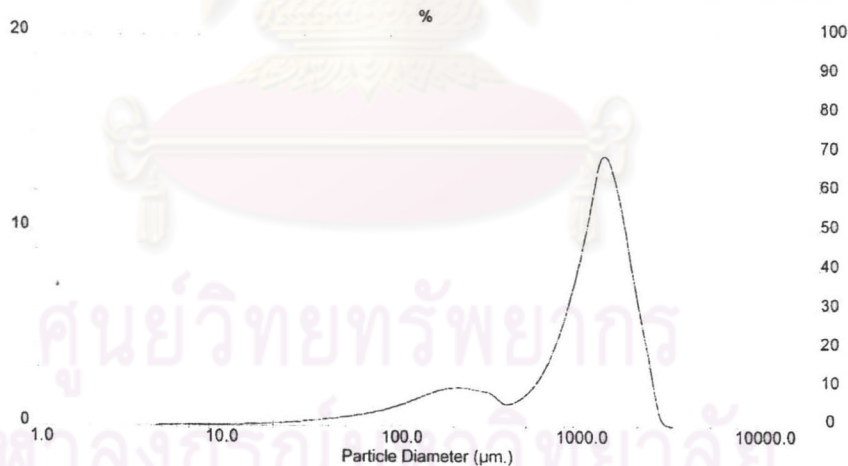
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column1	Run Number: 1	Measured: Thu Oct 8 2009 9:45AM
Sample File: CHULA12	Record Number: 189	Analysed: Thu Oct 8 2009 9:45AM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system Medium : water Stirrer speed : 50%		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 10.1 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 2.685 %
Analysis Model: Polydisperse	Modifications: None		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.4380 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0199 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 154.62 um	D (v, 0.5) = 1124.06 um	D (v, 0.9) = 1857.14 um
D [4, 3] = 1067.93 um	D [3, 2] = 301.74 um	Span = 1.515E+00	Uniformity = 4.520E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.03	4.88	0.03	120.67	1.48	140.58	8.96
4.88	0.04	5.69	0.07	140.58	1.71	163.77	10.67
5.69	0.06	6.63	0.13	163.77	1.89	190.80	12.56
6.63	0.07	7.72	0.20	190.80	1.97	222.28	14.52
7.72	0.07	9.00	0.27	222.28	1.93	258.95	16.46
9.00	0.08	10.48	0.35	258.95	1.80	301.68	18.26
10.48	0.08	12.21	0.44	301.68	1.65	351.46	19.91
12.21	0.09	14.22	0.53	351.46	1.16	409.45	21.06
14.22	0.11	16.57	0.64	409.45	1.28	477.01	22.34
16.57	0.13	19.31	0.77	477.01	1.71	555.71	24.05
19.31	0.16	22.49	0.93	555.71	2.52	647.41	26.56
22.49	0.21	26.20	1.14	647.41	3.78	754.23	30.34
26.20	0.26	30.53	1.40	754.23	5.57	878.67	35.91
30.53	0.31	35.56	1.71	878.67	7.91	1023.66	43.82
35.56	0.37	41.43	2.08	1023.66	10.73	1192.56	54.55
41.43	0.44	48.27	2.52	1192.56	13.63	1389.33	68.18
48.27	0.51	56.23	3.04	1389.33	12.84	1618.57	81.02
56.23	0.60	65.51	3.64	1618.57	9.81	1885.64	90.82
65.51	0.71	76.32	4.35	1885.64	6.16	2196.77	96.98
76.32	0.85	88.91	5.20	2196.77	2.85	2559.23	99.63
88.91	1.03	103.58	6.23	2559.23	0.17	2981.51	100.00
103.58	1.24	120.67	7.48	2981.51	0.00	3473.45	100.00



Malvern Instruments Ltd
 Malvern, UK
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892739

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number:

p. 1
 08 Oct 09 10:06

ภาพที่ ค.2 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองครั้งที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32 2188101 เลขสาร 2140211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2840211

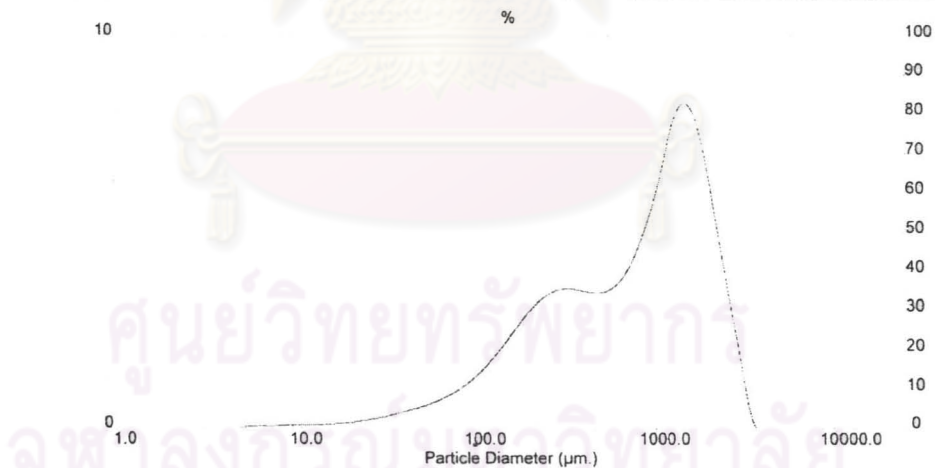
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column2	Run Number: 12	Measured: Thu Oct 8 2009 10:18AM
Sample File: CHULA12	Record Number: 220	Analysed: Thu Oct 8 2009 10:18AM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system		
Medium : water		
Stirrer speed : 50%		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 11.0 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.218 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.3820 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0251 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 123.88 um	D (v, 0.5) = 760.27 um	D (v, 0.9) = 1809.49 um
D [4, 3] = 867.92 um	D [3, 2] = 239.33 um	Span = 2.217E+00	Uniformity = 7.272E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.03	4.88	0.03	120.67	2.11	140.58	11.77
4.88	0.05	5.69	0.08	140.58	2.52	163.77	14.29
5.69	0.07	6.63	0.15	163.77	2.91	190.80	17.20
6.63	0.08	7.72	0.22	190.80	3.24	222.28	20.43
7.72	0.09	9.00	0.31	222.28	3.45	258.95	23.88
9.00	0.09	10.48	0.40	258.95	3.54	301.68	27.43
10.48	0.10	12.21	0.50	301.68	3.53	351.46	30.95
12.21	0.11	14.22	0.60	351.46	3.46	409.45	34.42
14.22	0.13	16.57	0.73	409.45	3.45	477.01	37.86
16.57	0.15	19.31	0.88	477.01	3.55	555.71	41.42
19.31	0.19	22.49	1.08	555.71	3.88	647.41	45.30
22.49	0.24	26.20	1.32	647.41	4.45	754.23	49.74
26.20	0.30	30.53	1.62	754.23	5.28	878.67	55.03
30.53	0.37	35.56	2.00	878.67	6.36	1023.66	61.39
35.56	0.46	41.43	2.45	1023.66	7.65	1192.56	69.04
41.43	0.55	48.27	3.00	1192.56	8.25	1389.33	77.29
48.27	0.65	56.23	3.65	1389.33	7.84	1618.57	85.13
56.23	0.78	65.51	4.44	1618.57	6.45	1885.64	91.58
65.51	0.94	76.32	5.38	1885.64	4.63	2196.77	96.21
76.32	1.15	88.91	6.53	2196.77	2.81	2559.23	99.01
88.91	1.41	103.58	7.94	2559.23	0.99	2981.51	100.00
103.58	1.73	120.67	9.67	2981.51	0.00	3473.45	100.00



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

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number:

p. 6
 08 Oct 09 10:58

ภาพที่ ค.3 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 2
 แป้งมันเป็นแหล่งคาร์บอน



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-52, 2188101 โทรสาร 25460211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 25460211

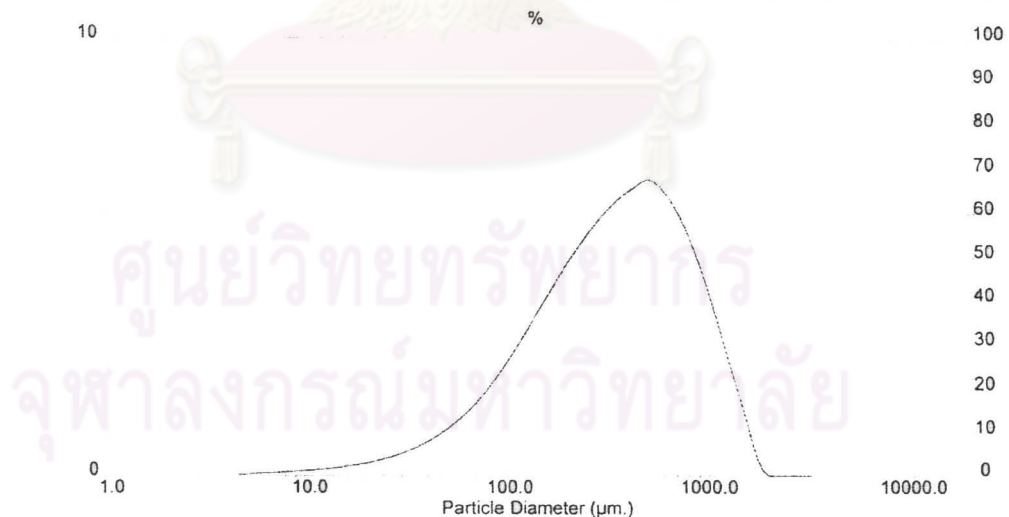
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column3	Run Number: 8	Measured: Thu Oct 8 2009 11:04AM
Sample File: CHULA12	Record Number: 244	Analysed: Thu Oct 8 2009 11:04AM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet analysis system Medium : water Stirrer speed : 50%		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 14.9 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.340 %
Analysis Model: Polydisperse	Modifications: None		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.3652 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0364 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 83.64 um	D (v, 0.5) = 350.20 um	D (v, 0.9) = 939.71 um
D [4, 3] = 440.48 um	D [3, 2] = 164.85 um	Span = 2.445E+00	Uniformity = 7.558E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.02	4.88	0.02	120.67	3.42	140.58	19.69
4.88	0.04	5.69	0.07	140.58	3.92	163.77	23.61
5.69	0.06	6.63	0.13	163.77	4.43	190.80	28.04
6.63	0.08	7.72	0.21	190.80	4.90	222.28	32.94
7.72	0.10	9.00	0.31	222.28	5.35	258.95	38.29
9.00	0.12	10.48	0.43	258.95	5.75	301.68	44.04
10.48	0.14	12.21	0.57	301.68	6.10	351.46	50.15
12.21	0.17	14.22	0.74	351.46	6.39	409.45	56.53
14.22	0.21	16.57	0.94	409.45	6.60	477.01	63.14
16.57	0.25	19.31	1.20	477.01	6.76	555.71	69.89
19.31	0.31	22.49	1.51	555.71	6.53	647.41	76.42
22.49	0.39	26.20	1.89	647.41	6.07	754.23	82.50
26.20	0.48	30.53	2.37	754.23	5.40	878.67	87.90
30.53	0.59	35.56	2.96	878.67	4.52	1023.66	92.42
35.56	0.73	41.43	3.70	1023.66	3.50	1192.56	95.92
41.43	0.91	48.27	4.60	1192.56	2.43	1389.33	98.35
48.27	1.12	56.23	5.73	1389.33	1.36	1618.57	99.71
56.23	1.38	65.51	7.11	1618.57	0.29	1885.64	100.00
65.51	1.70	76.32	8.81	1885.64	0.00	2196.77	100.00
76.32	2.06	88.91	10.87	2196.77	0.00	2559.23	100.00
88.91	2.47	103.58	13.34	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	2.93	120.67	16.27	2981.51	0.00	3473.45	100.00



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

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number:

p. 5
 08 Oct 09 11:31

ภาพที่ ค.4 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ที่ 3 กากแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งคาร์บอน



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาน 2 พุททณีย์ ซอย 62 อ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

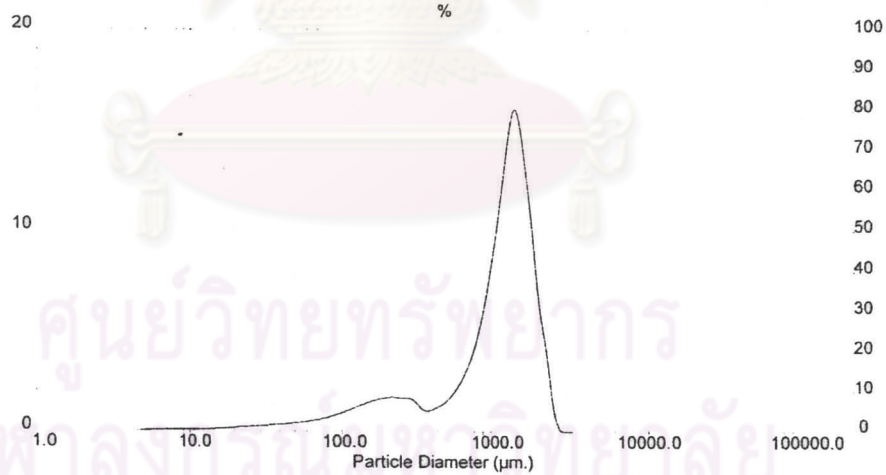
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column1	Run Number: 29	Measured: Wed Dec 2 2009 11:23AM
Sample File: CHULA12	Record Number: 766	Analysed: Wed Dec 2 2009 11:23AM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: wet analysis system		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.0 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.950 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.8076 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0177 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 182.76 um	D (v, 0.5) = 1123.30 um	D (v, 0.9) = 1737.16 um
D [4, 3] = 1058.64 um	D [3, 2] = 338.42 um	Span = 1.384E+00	Uniformity = 3.973E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.02	4.88	0.02	120.67	1.25	140.58	7.40
4.88	0.04	5.69	0.06	140.58	1.45	163.77	8.86
5.69	0.05	6.63	0.11	163.77	1.61	190.80	10.46
6.63	0.06	7.72	0.16	190.80	1.67	222.28	12.13
7.72	0.06	9.00	0.22	222.28	1.64	258.95	13.77
9.00	0.07	10.48	0.29	258.95	1.54	301.68	15.31
10.48	0.07	12.21	0.37	301.68	1.04	351.46	16.35
12.21	0.09	14.22	0.45	351.46	1.08	409.45	17.44
14.22	0.10	16.57	0.55	409.45	1.35	477.01	18.79
16.57	0.13	19.31	0.68	477.01	1.87	555.71	20.66
19.31	0.16	22.49	0.84	555.71	2.73	647.41	23.39
22.49	0.19	26.20	1.03	647.41	4.07	754.23	27.46
26.20	0.23	30.53	1.26	754.23	6.13	878.67	33.60
30.53	0.27	35.56	1.53	878.67	9.10	1023.66	42.70
35.56	0.31	41.43	1.84	1023.66	12.82	1192.56	55.51
41.43	0.35	48.27	2.19	1192.56	16.00	1389.33	71.51
48.27	0.40	56.23	2.59	1389.33	13.63	1618.57	85.14
56.23	0.46	65.51	3.05	1618.57	9.00	1885.64	94.14
65.51	0.55	76.32	3.60	1885.64	4.75	2196.77	98.89
76.32	0.68	88.91	4.28	2196.77	1.11	2559.23	100.00
88.91	0.84	103.58	5.12	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	1.04	120.67	6.15	2981.51	0.00	3473.45	100.00



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

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number: MAL400016

p. 3
 02 Dec 09 13:49

ภาพที่ ค.5 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1
 ซีไอดีเท่ากับ 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานีน 2 จุฬาลงกรณ์ รอย 02 อ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

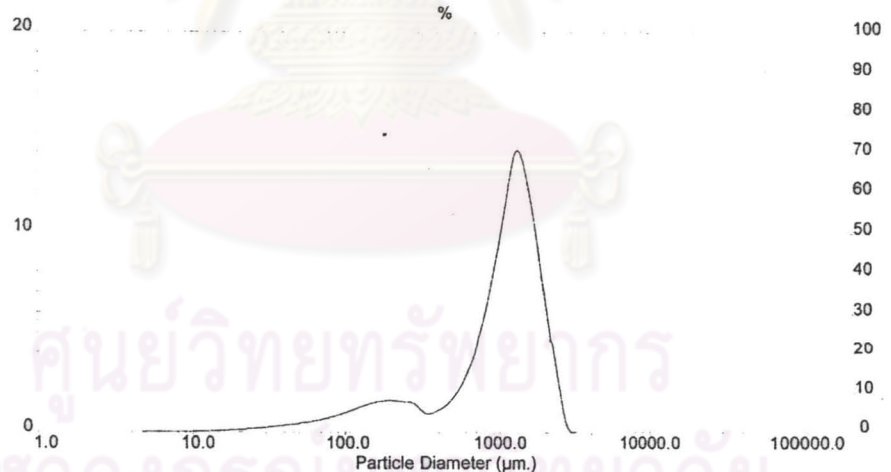
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column2	Run Number: 3	Measured: Wed Dec 2 2009 1:55PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 777	Analysed: Wed Dec 2 2009 1:55PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: wet analysis system		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 23.7 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.843 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 1.2328 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0180 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 172.31 um	D (v, 0.5) = 1142.83 um	D (v, 0.9) = 1873.90 um
D [4, 3] = 1101.43 um	D [3, 2] = 333.70 um	Span = 1.489E+00	Uniformity = 4.299E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.02	4.88	0.02	120.67	1.30	140.58	8.03
4.88	0.04	5.69	0.06	140.58	1.46	163.77	9.49
5.69	0.05	6.63	0.11	163.77	1.56	190.80	11.05
6.63	0.06	7.72	0.17	190.80	1.58	222.28	12.62
7.72	0.06	9.00	0.23	222.28	1.51	258.95	14.14
9.00	0.06	10.48	0.29	258.95	1.41	301.68	15.55
10.48	0.07	12.21	0.36	301.68	0.96	351.46	16.51
12.21	0.08	14.22	0.44	351.46	1.02	409.45	17.53
14.22	0.09	16.57	0.53	409.45	1.30	477.01	18.84
16.57	0.12	19.31	0.65	477.01	1.87	555.71	20.70
19.31	0.15	22.49	0.80	555.71	2.78	647.41	23.48
22.49	0.20	26.20	1.00	647.41	4.13	754.23	27.60
26.20	0.24	30.53	1.24	754.23	6.03	878.67	33.63
30.53	0.29	35.56	1.53	878.67	8.50	1023.66	42.13
35.56	0.34	41.43	1.87	1023.66	11.37	1192.56	53.49
41.43	0.40	48.27	2.27	1192.56	14.01	1389.33	67.50
48.27	0.46	56.23	2.74	1389.33	12.93	1618.57	80.43
56.23	0.54	65.51	3.28	1618.57	9.92	1885.64	90.34
65.51	0.64	76.32	3.92	1885.64	6.31	2196.77	96.65
76.32	0.77	88.91	4.69	2196.77	3.02	2559.23	99.68
88.91	0.93	103.58	5.62	2559.23	0.32	2981.51	100.00
103.58	1.11	120.67	6.73	2981.51	0.00	3473.45	100.00



Malvern Instruments Ltd. Malvern, UK Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789
 Mastersizer S long bed Ver. 2.19 Serial Number: MAL400016
 p. 8 02 Dec 09 14:57

ภาพที่ ค.6 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งได้ดีเท่ากับ 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2546211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

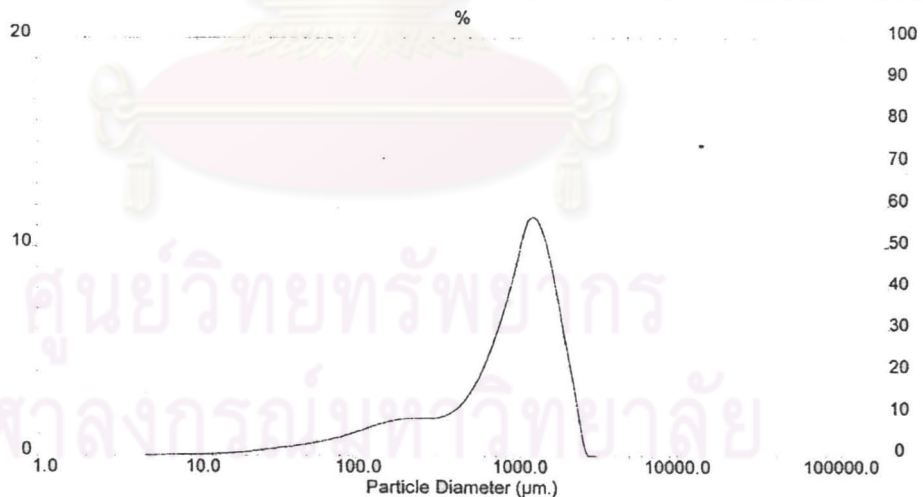
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: column3	Run Number: 22	Measured: Wed Dec 2 2009 3:16PM
Sample File: CHULA12.	Record Number: 833	Analysed: Wed Dec 2 2009 3:16PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA		Result Source: Analysed
Sample Notes: wet analysis system		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.4 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 2.124 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.7016 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0210 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 147.70 um	D (v, 0.5) = 964.24 um	D (v, 0.9) = 1742.66 um
D [4, 3] = 960.45 um	D [3, 2] = 286.04 um	Span = 1.654E+00	Uniformity = 5.003E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.03	4.88	0.03	120.67	1.42	140.58	9.50
4.88	0.04	5.69	0.07	140.58	1.58	163.77	11.09
5.69	0.05	6.63	0.12	163.77	1.70	190.80	12.79
6.63	0.06	7.72	0.18	190.80	1.76	222.28	14.54
7.72	0.07	9.00	0.25	222.28	1.77	258.95	16.31
9.00	0.07	10.48	0.32	258.95	1.77	301.68	18.06
10.48	0.08	12.21	0.40	301.68	1.84	351.46	19.92
12.21	0.10	14.22	0.50	351.46	2.06	409.45	21.98
14.22	0.12	16.57	0.62	409.45	2.51	477.01	24.49
16.57	0.15	19.31	0.77	477.01	3.24	555.71	27.73
19.31	0.19	22.49	0.96	555.71	4.27	647.41	32.00
22.49	0.24	26.20	1.20	647.41	5.58	754.23	37.59
26.20	0.30	30.53	1.51	754.23	7.18	878.67	44.77
30.53	0.37	35.56	1.88	878.67	9.02	1023.66	53.78
35.56	0.44	41.43	2.31	1023.66	11.03	1192.56	64.82
41.43	0.51	48.27	2.82	1192.56	11.31	1389.33	76.12
48.27	0.58	56.23	3.40	1389.33	9.93	1618.57	86.06
56.23	0.67	65.51	4.07	1618.57	7.44	1885.64	93.50
65.51	0.78	76.32	4.85	1885.64	4.65	2196.77	98.14
76.32	0.91	88.91	5.76	2196.77	1.86	2559.23	100.00
88.91	1.07	103.58	6.83	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	1.25	120.67	8.08	2981.51	0.00	3473.45	100.00



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

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number: MAL400016

p. 10
 02 Dec 09 15:38

ภาพที่ ค.7 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่ 3
 ซีไอดีเท่ากับ 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ง

การหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity : SMA)

การศึกษาความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนจากเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบซึ่งจะให้แบบจำลองแบบ Batch ใส่เมล็ดตะกอนจุลินทรีย์และสารอาหารเพียงครั้งเดียว โดยไม่มีการเติมเข้าไปอีก ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 1 ชุด ประกอบด้วย

1.1 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ มีท่อแก้วนำก๊าซและจุกยางสำหรับปิดปากขวด

1.2 สายยางซิลิโคน

1.3 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน



ภาพที่ ง.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity: SMA)

2. วิธีการทดลอง

นำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรใส่เมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดซึ่งสอดท่อแก้วนำก๊าซซึ่งต่อกับสายยางซิลิโคนเพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นผ่านไปยังขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรอีกใบหนึ่ง มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดเจาะรูสองรู สอดท่อแก้วนำก๊าซ 2 ท่อ

โดยที่อxygen จะจมลงไปในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นประมาณ 1 นอร์มัลในขวด เพื่อดักก๊าซชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากก๊าซมีเทน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ละลายลงไป ส่วนก๊าซมีเทนจะแยกตัวออกมาแล้วเข้าสู่ท่อแก้วนำก๊าซต่ออีกท่อหนึ่งที่ต่อกับสายยางซิลิโคน เพื่อนำก๊าซมีเทนไปยังอุปกรณ์ วัดปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซมีเทนจะใช้บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน บรรจุน้ำที่ทราบระดับแน่นอน และใช้สายยางซิลิโคนเชื่อมต่อบิวเรตทั้ง 2 อันเข้าด้วยกันที่บริเวณด้านล่างของบิวเรตให้มีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรยู (U) โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะผ่านสายยางซิลิโคนเข้าสู่ทางด้านบนของบิวเรต เข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ในบิวเรตทำให้ระดับน้ำด้านหนึ่งของบิวเรตลดลง อ่านระดับน้ำที่ลดลงเทียบกับปริมาณระดับน้ำเริ่มต้นก็จะทำให้สามารถวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้

สารอาหารที่ใช้ คือ กรดอะซิติก โดยทำการผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ค่าซีไอดีประมาณ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร นำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีมาประมาณ 25 มิลลิตร แล้วเติมสารอาหารให้ได้ปริมาณรวมเท่ากับ 150 มิลลิตร หลังจากผสมสารอาหารกับตะกอนจุลินทรีย์แล้วให้ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO₃) ให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.2-7.5 นำขวดรูปชมพู่ที่ใส่ตะกอนจุลินทรีย์ไปวางบนชุดควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 35 องศาเซลเซียส บันทึกปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อหาค่าความชันของกราฟในช่วงที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งช่วงที่กราฟมีความชันมากที่สุดจะเป็นค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

3. สูตรการคำนวณหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA)

การหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) จะหาในช่วงที่อัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดในระหว่างการทดลอง โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

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

กำหนด SMA = Specific Methanogenic Activity (SMA) หรือ ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (gCOD-CH₄/g VSS-day)

R = อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (mL-CH₄/day) หาได้จากค่าความชันของกราฟ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นกับเวลา

CF = Conversion Factor (mL-CH₄/g COD) ซึ่งหาได้จากตาราง ง.1

V = Effective volume ของ Reactor (L)

VSS = ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid) ของตะกอนจุลินทรีย์ (gVSS/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

4. ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA)

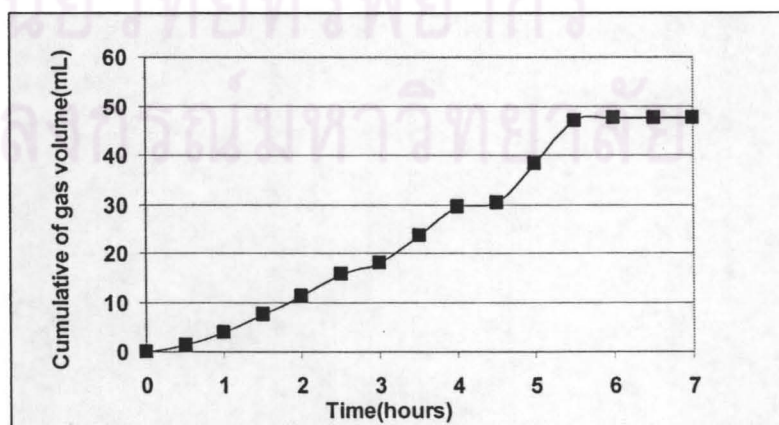
ในที่นี้จะขอคำนวณค่าความสามารถของแบคทีเรียสร้างมีเทน Specific Methanogenic Activity (SMA) ของตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นระบบเป็นตัวอย่าง โดยเมื่อนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ไปดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น จะได้ข้อมูลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆตลอดการทดลองแสดงดังตารางที่ ง.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลดิบของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาต่างๆ ตลอดการทดลองของ ตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

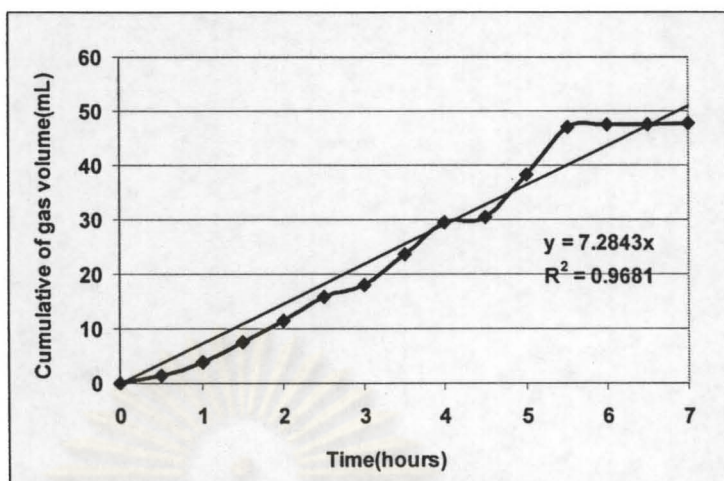
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0	0.00	0
0.5	1.50	1.50
1.0	2.40	3.90
1.5	3.65	7.55
2.0	3.80	11.35
2.5	4.40	15.75
3.0	2.40	18.15
3.5	5.40	23.55
4.0	6.00	29.55
4.5	1.00	30.55
5.0	7.65	38.20
5.5	8.80	47.00
6.0	0.50	47.50
6.5	0.10	47.60
7.0	0.10	47.70

นำข้อมูลที่ได้ในตารางที่ ง.2 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลา และนำกราฟช่วงที่มีความชันมากที่สุดไปหาค่าความชันซึ่งค่าความชันที่ได้คือ ค่าอัตราการเกิด ก๊าซมีเทน



ภาพที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

นำกราฟที่มีความชันมากที่สุดไปหาค่าความชัน จะได้ดังภาพที่ ง.3 ซึ่งค่าความชันที่ได้ คือ ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน



ภาพที่ ง.3 อัตราการเกิดก๊าซมีเทน

จากกราฟจะได้

อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (ความชันของกราฟ)	= 7.2843 mL-CH ₄ /day
ค่า Conversion Factor ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	= 395 mL- CH ₄ /g COD
ค่า Effective Volume ของ Reactor	= 0.225L
ค่า Volatile Suspended Solid	= 66.16 g VSS/L

จากสูตร	SMA = R/CF×V×VSS
แทนค่า	SMA = (7.284×24) / (395×0.225×66.16)
ดังนั้น	SMA = 0.030 gCOD-CH ₄ /g VSS-day

5. Specific Methanogenic Activity (SMA) หลังสิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ ง.3 ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หลังสิ้นสุดการทดลอง

ถังปฏิกรณ์ที่	อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (R) (mL-CH ₄ /day)	VSS (g VSS/L)	SMA (gCOD-CH ₄ /g VSS-day)
1	7.461	66.25	0.030
2	7.258	80.15	0.024
3	8.155	69.72	0.032

ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ

ความดันพาร์เชียลก๊าซชีวภาพ คือสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ
ของก๊าซชีวภาพทั้งหมด ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ จ.1 – จ.8

FM

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7523-5 โทรสาร 0-2255-6831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับงานเลข 0 หน้าที 1

วันที่ 16 ตุลาคม 2552

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการทดสอบหาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ผู้ส่งตัวอย่าง : ...นางสาวทิพวรรณ รักสงบ.....ใบเสนอราคาเลขที่....CT008/53.....
 หน่วยงาน : ...-
 ชนิดตัวอย่าง : ...Gas
 วันที่รับตัวอย่าง : ...15 ตุลาคม 2552... วันที่วิเคราะห์ : 16 ตุลาคม 2552

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : ... GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO
FINNIGAN


สภาวะการวิเคราะห์ :


Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min
 Injector Temperature : 120 °C
 Column : MOLECULA SIEVE, Temperature program set at 40 °C for 10 min
 Detector : TCD at 150 °C
 Injection Volume : 1 ml
 มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Nitrogen	% Methane
1	Sample 1	24.5	58.4
2	Sample 2	34.7	49.2
3	Sample 3	53.7	28.4

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

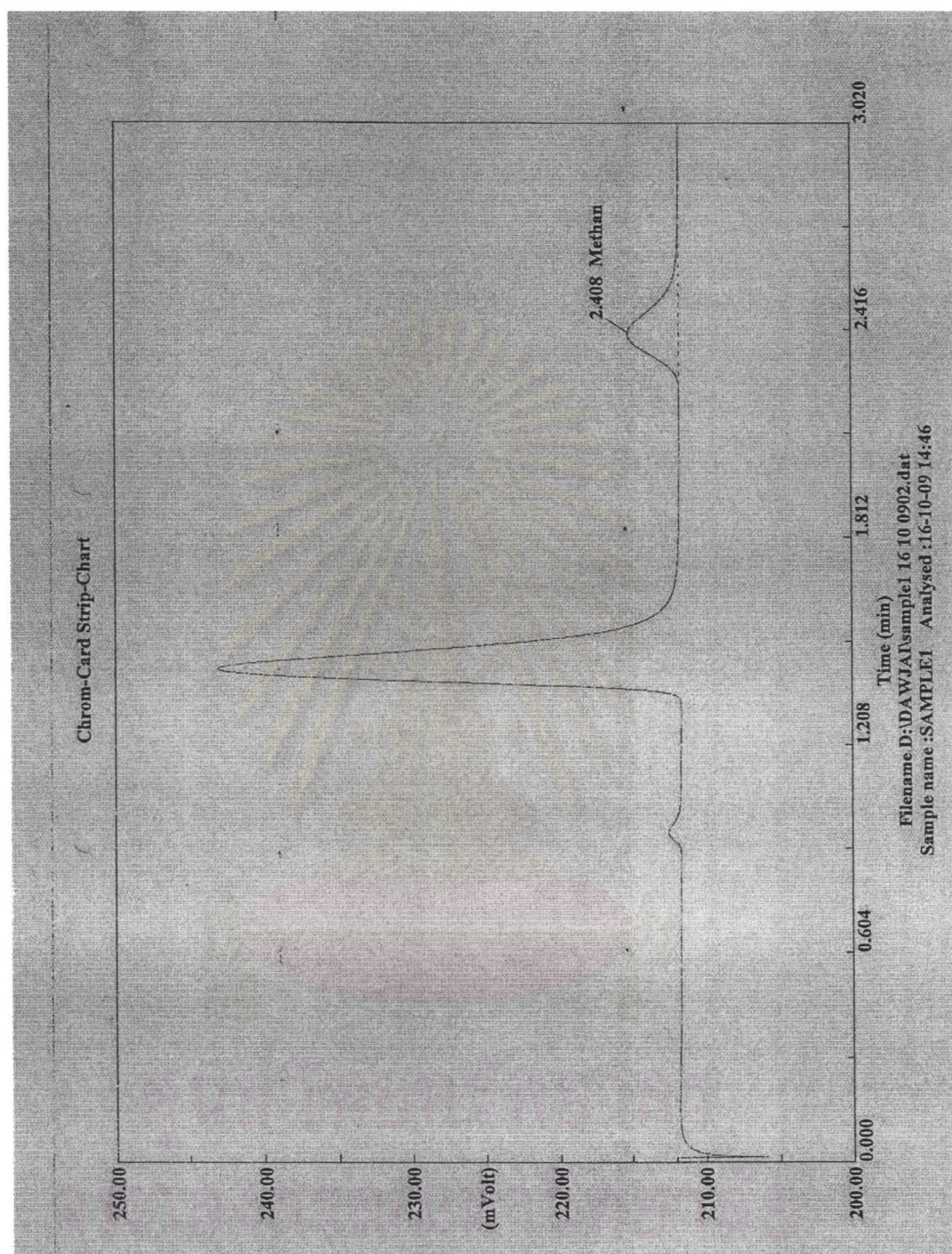

 (นางตาวใจ แก้วอัครยาด)
 นักวิทยาศาสตร์
 วันที่ 16 ตุลาคม 2552


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เขียวร้อยเจริญ)
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research
 วันที่ 16 ตุลาคม 2552

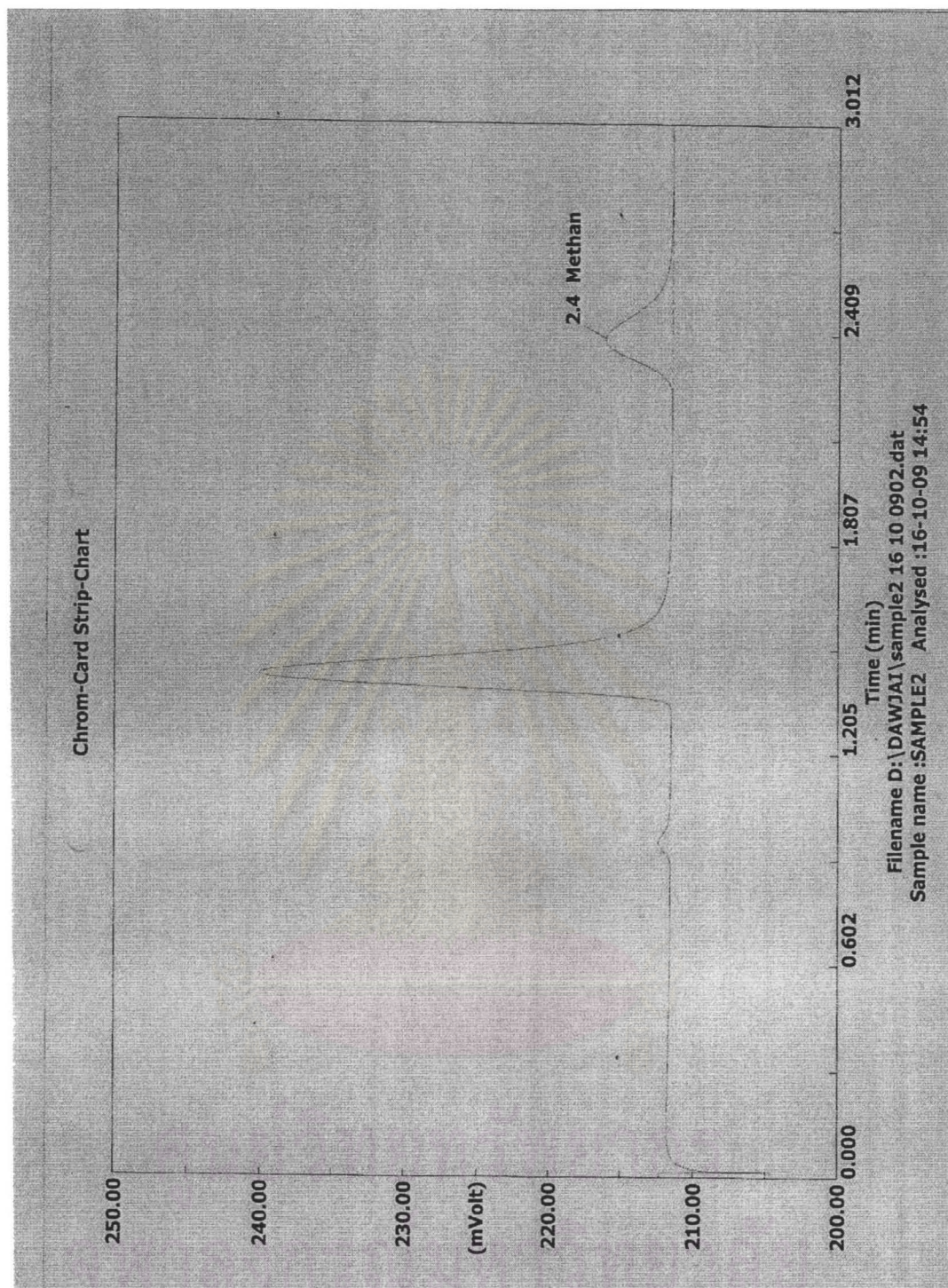
- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ให้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
 2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

เอกสาร	ผู้จัดทำ	วิธีการจัดทำ	สถานที่เก็บเก็บที่เก็บ	ระยะเวลาที่เก็บ	ผู้ดูแลจัดทำ	วิธีการทำลาย	ผู้มีหน้าที่ทำลาย
ScFM-CT-06-002-A	เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์	เข้าเก็บ	เก็บที่ภาควิชาการของ เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์	1 ปี	QMR	ทิ้ง	เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์

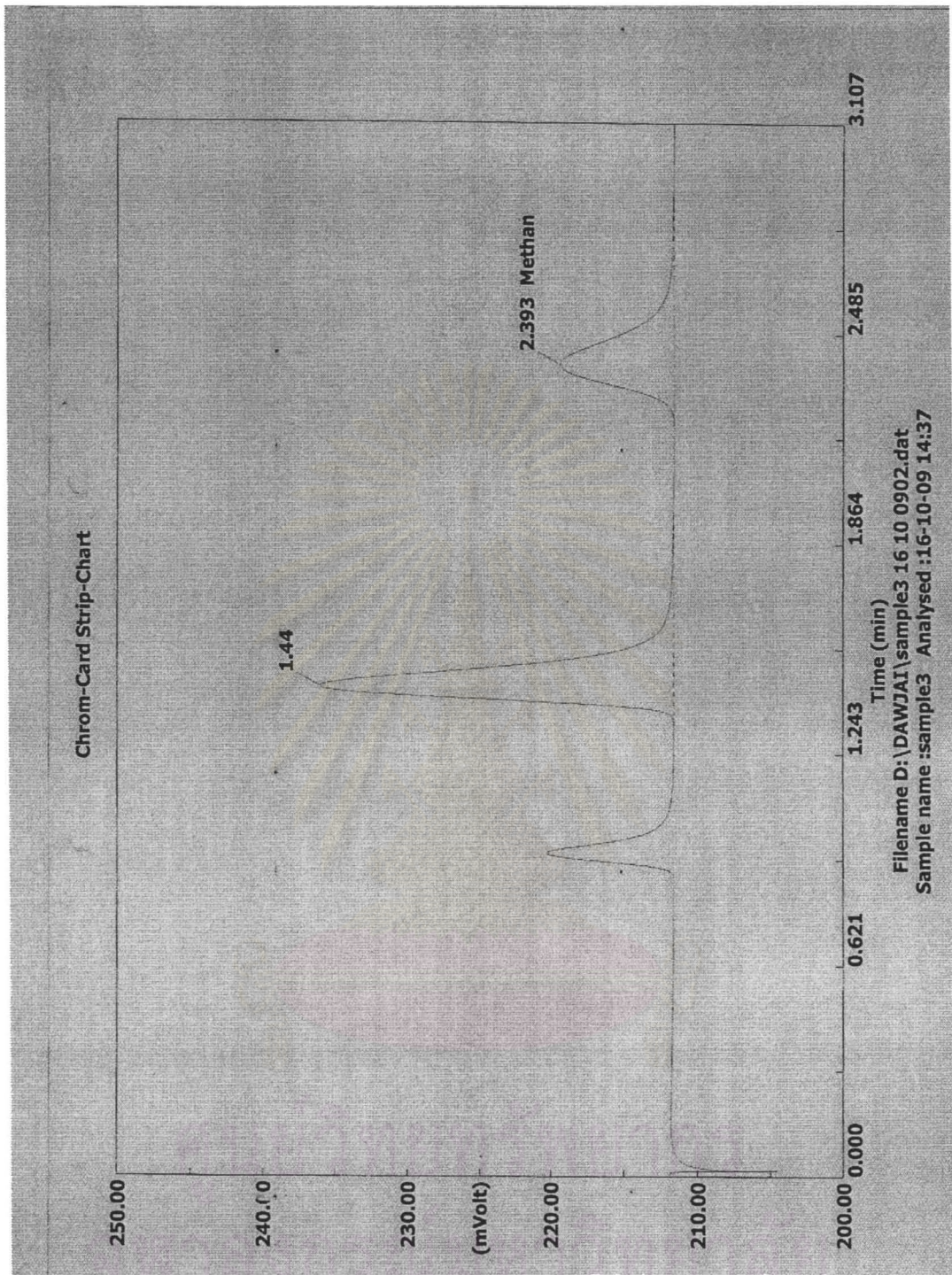
ภาพที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ช่วงการทดลองที่ 1



ภาพที่ ๑.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถึงปฏิกิริยาที่ 1



ภาพที่ จ.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถึงปฏิบัติการที่ 2



ภาพที่ ๑.๔ การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถึงปริมาตรที่ 3

FM

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7523-5 โทรสาร 0-2255-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการแก้ไข 0 หน้าที่ 1

วันที่ 15 มกราคม 2553

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการทดสอบหาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ผู้ส่งตัวอย่าง : นางสาวทิพวรรณ รักสงบ โบนัสราคาเครื่อง CT053/53

หน่วยงาน : หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : Gas

วันที่รับตัวอย่าง : 9 ธันวาคม 2552 วันที่วิเคราะห์ : 29 ธันวาคม 2552

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : GAS CHROMATOGRAPHY MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNINGAN

สภาวะการวิเคราะห์ :

Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min

Injector Temperature : 120 °C

Column : MOLECULA SIEVE, Temperature program set at 40 °C for 10 min

Detector : TCD at 150 °C


Injection Volume : 1 ml

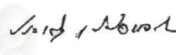
มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Nitrogen	% Methane
1	Sample 1	48.4	37.9
2	Sample 2	52.0	36.1
3	Sample 3	52.4	40.0

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

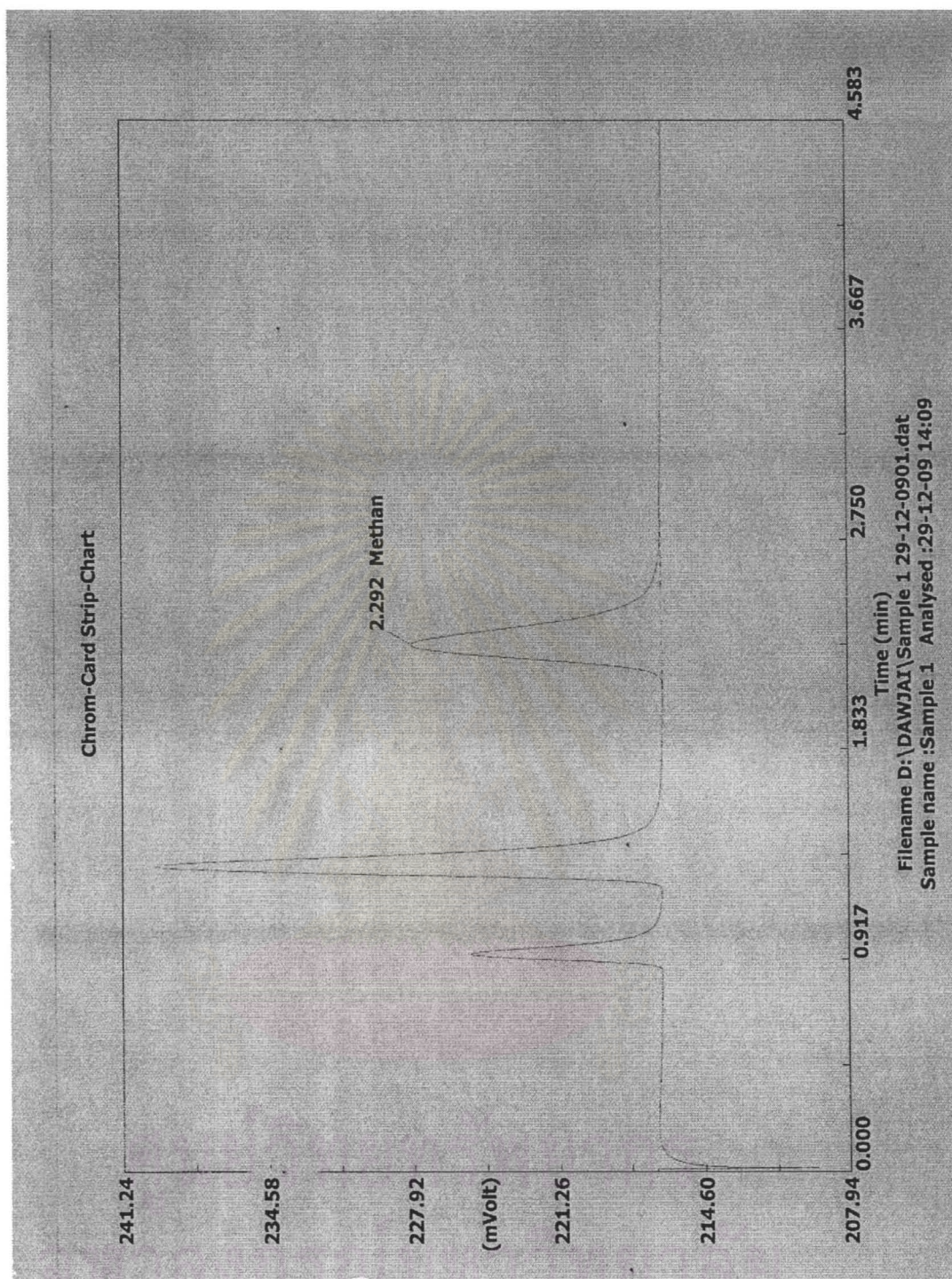

(นางสาววันวิสา อาศัยญาติ)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 15 มกราคม 2553


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research
วันที่ 15 มกราคม 2553

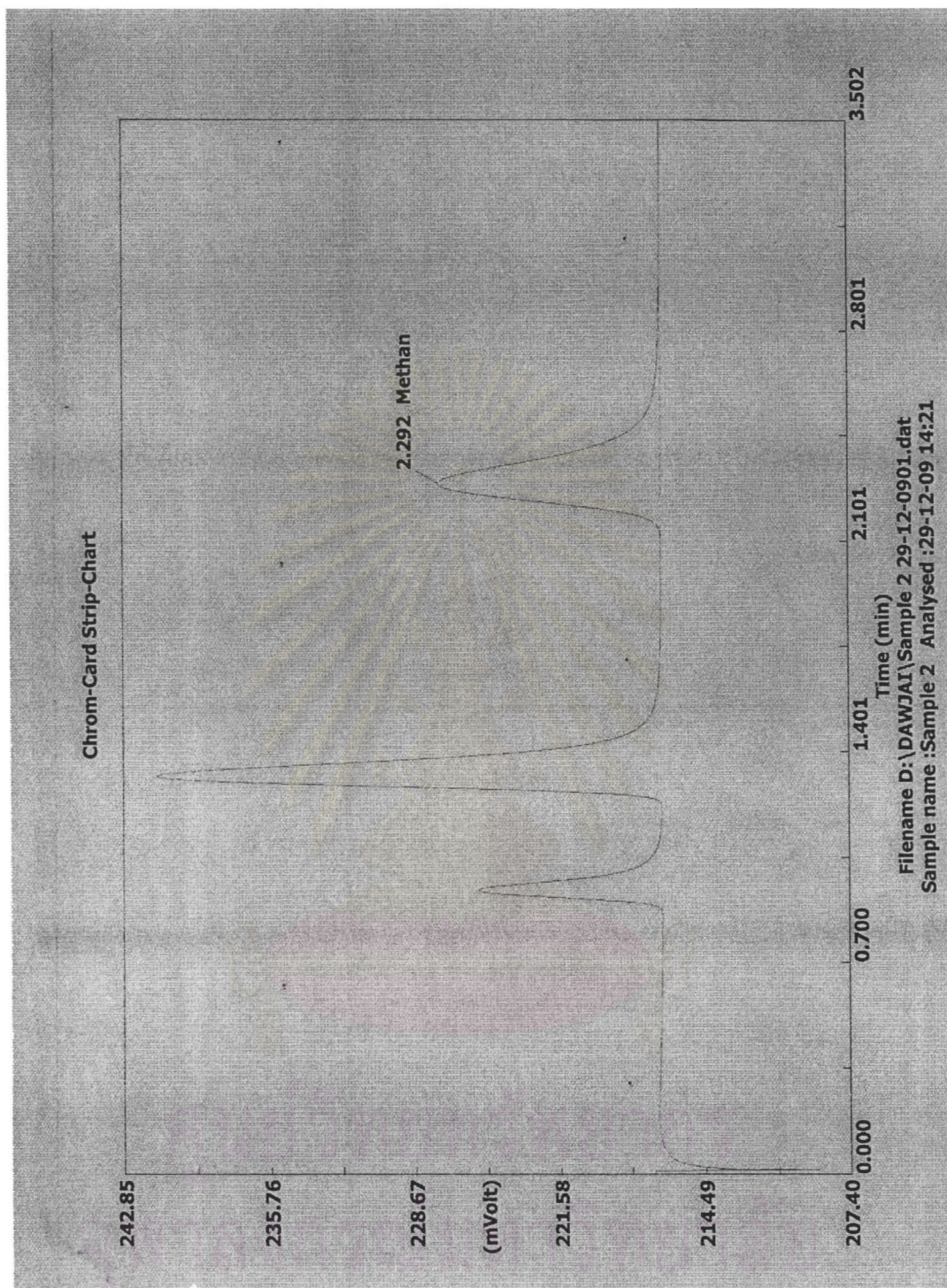
- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้สำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

เอกสาร	ผู้จัดทำ	วิธีการจัดทำ	สถานที่เก็บเก็บ	ระยะเวลาที่เก็บ	ผู้อนุมัติให้ทำลาย	วิธีการทำลาย	ผู้นับที่ทำลาย
ScFM-CT-06-002-A	เจ้าหน้าที่วิเคราะห์	เจ้าหน้าที่	คลังเอกสารวิชาการ เจ้าหน้าที่วิเคราะห์	1 ปี	CMR	ทิ้ง	เจ้าหน้าที่วิเคราะห์

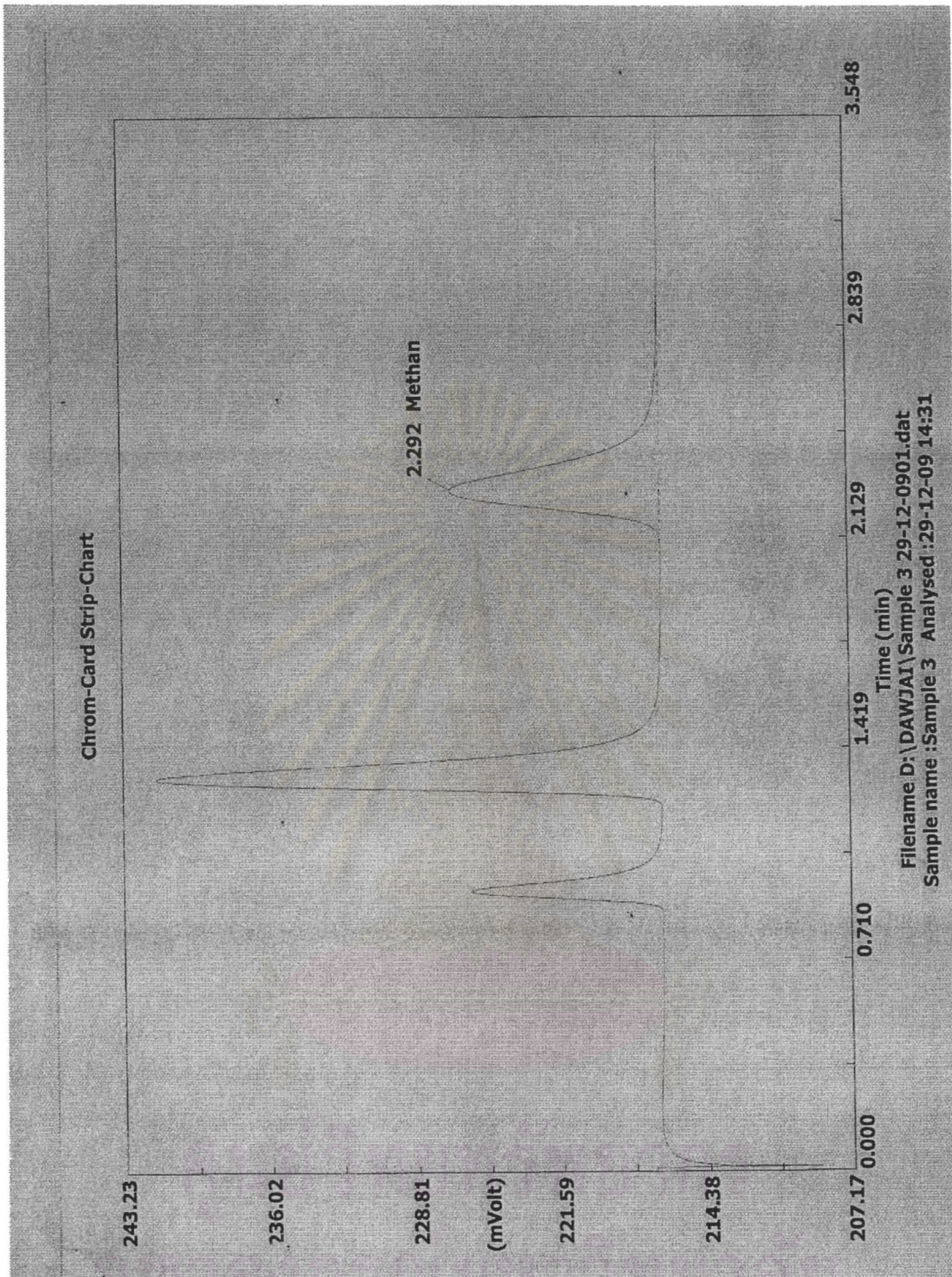
ภาพที่ ๑.5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ช่วงการทดลองที่ 2



ภาพที่ ๑.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ดังปฏิกรณ์ที่ 1



ภาพที่ ๑.7 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ถึงปริมาตรที่ 2



ภาพที่ ๑.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ดังปฏิกรณ์ที่ 3

ภาคผนวก จ
สมดุลมวลซีไอดี ชัลเฟอร์และไนโตรเจน

สมดุลมวลซีไอดี (%COD recovery)

$$\% \text{COD recovery} = \left[(\text{Soluble COD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD} + \text{Soluble CH}_4 - \text{COD} + \Delta \text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta \text{NO}_3^- - \text{COD}) + \text{COD}_{\text{unknown}} + 10\% \text{COD}_{\text{acc}} / \text{COD}_{\text{in}} \right] \times 100$$

เมื่อ	$\text{Soluble COD}_{\text{eff}}$	=	ซีไอดีทั้งหมดหลังออกระบบ
	$\text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD}$	=	ซีไอดีในรูปของก๊าซมีเทน
	$\text{Soluble CH}_4 - \text{COD}$	=	ซีไอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ
	$\Delta \text{SO}_4^{2-} - \text{COD}$	=	ซีไอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการชัลเฟตรีดักชัน
	$\Delta \text{NO}_3^- - \text{COD}$	=	ซีไอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
	$\text{COD}_{\text{unknown}}$	=	ซีไอดีที่ไม่ทราบค่าในระบบ
	COD_{acc}	=	ซีไอดีที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์จุลินทรีย์
	COD_{in}	=	ซีไอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลซีไอดี

จากข้อมูลภาคผนวก ก. ผลการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 18/6/2552
อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

ซีไอดีเข้าระบบ	640	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีไอดีออกระบบ	40	มิลลิกรัมต่อลิตร
ชัลเฟตเข้าระบบ	92.48	มิลลิกรัมต่อลิตร
ชัลเฟตออกระบบ	38.19	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทเข้าระบบ	60.38	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทออกระบบ	0.87	มิลลิกรัมต่อลิตร
ก๊าซทั้งหมดต่อวัน	800	มิลลิลิตร
สัดส่วนของก๊าซมีเทน	58.40	เปอร์เซ็นต์

แทนค่า

$$\begin{aligned} \text{Soluble COD}_{\text{eff}} &= 40 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ \text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 / 24.86) \times 16 \times 4/Q \\ &= (800 \times 0.584 / 24.86) \times 16 \times 4 / 24 \\ &= 50.12 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Soluble CH}_4\text{-COD} &= K_{h\text{CH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \\ \text{เมื่อ } K_{h\text{CH}_4} &= \text{ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซมีเทนที่ } 30^\circ\text{C (โมลต่อลิตร) เท่ากับ } 12.40 \times 10^{-4} \\ \text{Partial Pressure of CH}_4 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)} \\ &= 12.40 \times 10^{-4} \times 0.584 \times 16,000 \times 4 \\ &= 46.35 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \\ \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (\text{ซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี } 2/3 \text{ มิลลิกรัม)} \\ &= (92.48 - 38.19) \times 2/3 \\ &= 36.19 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \\ \Delta\text{NO}_3\text{-COD} &= (\text{ไนเตรตเข้า} - \text{ไนเตรตออก}) \times 2/3.1 \\ &= (\text{ไนเตรตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี } 2/3.1 \text{ มิลลิกรัม)} \\ &= (60.38 - 0.87) \times 2/3.1 \\ &= 38.39 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \\ \text{COD}_{\text{unknown}} &= \text{ซีไอดีที่ไม่ทราบค่าในระบบ} \\ 10\% \text{ COD}_{\text{acc}} &= 0.1 \times 640 \\ &= 64 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \\ \text{ดังนั้น } \% \text{COD recovery} &= [(40 + 50.12 + 46.35 + 36.19 + 38.39 + \text{COD}_{\text{unknown}} + 64) / 640] \times 100 \\ &= 42.98 + \text{COD}_{\text{unknown}} \% \\ \text{สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียในระบบ} & \\ \% \text{ electron flow to MPB} &= [(\text{CH}_4\text{-COD}) / (\text{CH}_4\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(50.12 + 46.35) / (50.12 + 46.35)] \times 100 \\ &= 100 \\ \% \text{ electron flow to SRB} &= [(\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}) / (\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(36.19 / (36.19 + 38.39))] \times 100 \\ &= 48.53 \\ \% \text{ electron flow to DNB} &= [(\Delta\text{NO}_3\text{-COD}) / (\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(38.39 / (36.19 + 38.39))] \times 100 \\ &= 51.47 \end{aligned}$$

จากข้อมูลภาคผนวก ก. ผลการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 วันที่ 18/6/2552 อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

ซีไอดีเข้าระบบ	616	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีไอดีออกระบบ	80	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตเข้าระบบ	93.34	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตออกระบบ	48.88	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทเข้าระบบ	61.22	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทออกระบบ	0.71	มิลลิกรัมต่อลิตร
ก๊าซทั้งหมดต่อวัน	450	มิลลิลิตร
สัดส่วนของก๊าซมีเทน	0.492	เปอร์เซ็นต์

แทนค่า

$$\text{Soluble COD}_{\text{eff}} = 80 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 / 24.86) \times 16 \times 4/Q \\ &= (450 \times 0.492 / 24.86) \times 16 \times 4 / 24 \\ &= 23.75 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\text{soluble CH}_4\text{-COD} = K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4$$

เมื่อ K_{hCH_4} = ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซมีเทนที่ 30°C (โมลต่อลิตร) เท่ากับ 12.40×10^{-4}

$$\begin{aligned} \text{Partial Pressure of CH}_4 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)} \\ &= 12.40 \times 10^{-4} \times 0.492 \times 16,000 \times 4 \\ &= 39.05 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (93.34 - 48.88) \times 2/3 \\ &= 29.64 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{NO}_3\text{-COD} &= (\text{ไนเตรทเข้า} - \text{ไนเตรทออก}) \times 2/3.1 \\ &= (61.22 - 0.71) \times 2/3.1 \\ &= 39.04 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\text{COD}_{\text{unknown}} = \text{ซีไอดีที่ไม่ทราบค่าในระบบ}$$

$$10\% \text{ COD ที่แบคทีเรียใช้} = 0.1 \times 616$$

$$= 61.6 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีไอดี}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น \%COD recovery} &= [(80 + 23.75 + 39.05 + 29.64 + 39.04 + \text{COD}_{\text{unknown}} + 61.6) / 616] \\ &\times 100 \end{aligned}$$

$$= 44.33 + \text{COD}_{\text{unknown}} \%$$

สัดส่วนการใช้ชีโอดีของแบคทีเรียในระบบ

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to MPB} &= [(\text{CH}_4\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(23.75+39.05) / (23.75+39.05)] \times 100 \\ &= 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to SRB} &= [(\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(29.64 / (29.64+39.04))] \times 100 \\ &= 43.07 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to DNB} &= [(\Delta\text{NO}_3\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3\text{-COD})] \times 100 \\ &= [(39.04 / (29.64+39.04))] \times 100 \\ &= 56.84 \end{aligned}$$

จากข้อมูลภาคผนวก ก. ผลการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 3 วันที่ 18/6/2552 อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

ชีโอดีเข้าระบบ	624	มิลลิกรัมต่อลิตร
ชีโอดีออกระบบ	104	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตเข้าระบบ	94.59	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตออกระบบ	29.44	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทเข้าระบบ	62.27	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทออกระบบ	0.53	มิลลิกรัมต่อลิตร
ก๊าซทั้งหมดต่อวัน	450	มิลลิลิตร
สัดส่วนของก๊าซมีเทน	0.284	เปอร์เซ็นต์

แทนค่า

$$\begin{aligned} \text{Soluble COD}_{\text{eff}} &= 104 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 / 24.86) \times 16 \times 4/Q \\ &= (450 \times 0.284 / 24.86) \times 16 \times 4 / 24 \\ &= 13.70 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปชีโอดี} \\ \text{soluble CH}_4\text{-COD} &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \end{aligned}$$

เมื่อ K_{hCH_4} = ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซมีเทนที่ 30°C (โมลต่อลิตร) เท่ากับ 12.40×10^{-4}

$$\begin{aligned} \text{Partial Pressure of CH}_4 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)} \\ &= 12.40 \times 10^{-4} \times 0.284 \times 16,000 \times 4 \\ &= 22.54 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (\text{ซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 2/3 มิลลิกรัม}) \\ &= (94.59 - 49.75) \times 2/3 \\ &= 29.89 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{NO}_3 - \text{COD} &= (\text{ไนเตรทเข้า} - \text{ไนเตรทออก}) \times 2/3.1 \\ &= (\text{ไนเตรทที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 2/3.1 มิลลิกรัม}) \\ &= (62.27 - 0.53) \times 2/3.1 \\ &= 39.83 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COD}_{\text{unknown}} &= \text{ซีไอดีที่ไม่ทราบค่าในระบบ} \\ 10\% \text{ COD ที่แบคทีเรียใช้} &= 0.1 \times 624 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น \%COD recovery} &= [(104 + 13.70 + 22.54 + 43.43 + 39.83 + \text{COD}_{\text{unknown}} \\ &+ 62.40) / 624] \times 100 \\ &= 45.82 + \text{COD}_{\text{unknown}} \% \end{aligned}$$

สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียในระบบ

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to MPB} &= [(\text{CH}_4 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100 \\ &= [(13.70 + 22.54) / (13.70 + 22.54)] \times 100 \\ &= 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to SRB} &= [(\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100 \\ &= [(29.89 / (29.89 + 39.83))] \times 100 \\ &= 42.87 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ electron flow to DNB} &= [(\Delta\text{NO}_3 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] \times 100 \\ &= [(39.83 / (29.89 + 39.83))] \times 100 \\ &= 57.13 \end{aligned}$$

สมมูลมวลซัลเฟอร์

$$\text{สมการ} \quad \% \text{sulfur recovery} = \left[(\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}) / \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}} \right] \times 100$$

เมื่อ	$\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่น้ำเข้า
	$\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่น้ำออก
	S^{2-}	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ไอออน
	HS^-	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว
	$\text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัว
	$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ
	โดย $\text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$	คือ	ปริมาณซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด

ตัวอย่างการคำนวณสมมูลมวลของซัลเฟอร์

จากข้อมูลภาคผนวก ก. ผลการทดลองครั้งที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 18/6/2552
อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

ซัลเฟตเข้าระบบ	92.48	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตออกระบบ	38.19	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด	8.00	มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์
ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ	9.50	มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์

จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{ซัลไฟด์ทั้งหมดเท่ากับ} &= 8.00 \times 3 \text{ (ซัลไฟด์ 1 กรัมมาจากซัลเฟต 3 กรัม)} \\ &= 24 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟต} \\ \text{ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ} &= \text{ก๊าซซัลไฟด์} \times \text{ปริมาตรชุดดักก๊าซ} \times 3/Q \\ &= 9.50 \times 0.5 \times 3 / 24 \\ &= 0.59 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟต} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \% \text{sulfur recovery} &= [(38.19 + 24 + 0.59) / 92.48] \times 100 \\ &= 67.88 \% \end{aligned}$$

สมมูลมวลไนโตรเจน

$$\text{สมการ} \quad \% \text{nitrogen recovery} = \left[(\text{NO}_3^-{}_{\text{eff}} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_2) / \text{NO}_3^-{}_{\text{in}} \right] \times 100$$

เมื่อ	$\text{NO}_3^-{}_{\text{in}}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่น้ำเข้า
	$\text{NO}_3^-{}_{\text{eff}}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่น้ำออก
	$\text{N}_{2\text{gas}}$	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน
	soluble N_2	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลของไนโตรเจน

จากข้อมูลภาคผนวก ก. ผลการทดลองช่วงที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 วันที่ 18/6/2552
อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน

ไนเตรทเข้าระบบ	60.38	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรทออกระบบ	0.87	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาณก๊าซทั้งหมดต่อวัน	800	มิลลิลิตร
สัดส่วนของก๊าซไนโตรเจน	24.50	เปอร์เซ็นต์

จากสมการ

$$\begin{aligned} N_{2\text{gas}} &= (\text{Total gas volume} \times \%N_2 / 24.86) \times 28 \times 124/28/Q \\ &= (800 \times 0.245 / 24.86) \times 28 \times 124/28/24 \\ &= 40.73 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปไนเตรท} \end{aligned}$$



เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจน 1 โมล)

$$\text{Soluble } N_2 = K_{\text{hN}_2} \times \text{Partial Pressure of } N_2 \times 28,000 \times 124/28$$

เมื่อ K_{hN_2} = ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซไนโตรเจนที่ 30°C (โมลต่อลิตร) เท่ากับ 6.03×10^{-4}

$$\begin{aligned} \text{Partial Pressure of } N_2 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซไนโตรเจน (สัดส่วนก๊าซไนโตรเจน)} \\ &= 6.03 \times 10^{-4} \times 0.245 \times 28,000 \times 124/28 \\ &= 18.31 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปไนเตรท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \% \text{nitrogen recovery} &= [(0.87 + 40.73 + 18.31)/60.38] \times 100 \\ &= 99.22 \% \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิพาวรรณ รักสงบ เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ.2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากภาควิชาหลักสูตรการสอนและเทคโนโลยี การศึกษา สาขาวิชาการศึกษาวิทยาศาสตร์ คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2549 ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาการศึกษา หลักสูตรศึกษาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิถียาลัยเมื่อปี พ.ศ.2549

การเสนอผลงานวิชาการ

ปี 2549 เสนอผลงานวิจัย “Landfill-Design and Technologies” ณ มหาวิทยาลัย Van Lang ประเทศเวียดนาม

ปี 2552 เสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย