ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัว
สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน

นายตุลชัย แจ่มใส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2435-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY OF EXPANDED GRANULAR SLUDGE BED REACTORS

FOR TREATING DOMESTIC SEWAGE

Mister Tulachai Jaemsai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2435-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัว สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน
โดย	นายตุลชัย แจ่มใส
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตุลชัย แจ่มใส : ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัวสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน. (EFFICIENCY OF EXPANDED GRANULAR SLUDGE BED REACTORS FOR TREATING DOMESTIC SEWAGE) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 163 หน้า. ISBN 974-17-2435-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยของระบบถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัว หรือ Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) โดยคำนึงถึงผลของเวลากักและความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อระบบ

งานวิจัยแบ่งออกเป็นการทดลองย่อย 2 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของเวลากักที่ 2 และ 6 ชม. โดยควบคุมให้มีความเร็วไหลขึ้นเท่ากันคือ 0.5 ม./ชม. และการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของการเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. โดยทุกการทดลองควบคุมเวลากักเท่ากับ 2 ชม.

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียชุมชนประเภทอาคารเรียนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีอัตราการป้อนน้ำเสียเฉลี่ย 8 และ 24 ลิตรต่อวัน ที่เวลากัก 6 และ 2 ชม. ตามลำดับ มีค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 160 มก./ล. ค่าบีโอดี 5 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 65 มก./ล. ค่าของแข็งแขวนลอย เฉลี่ยเท่ากับ 45 มก./ล. ผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของการทดลองพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดดังนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า 50 % ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี 5 วันสูงกว่า 80 % โดยมีค่าซีโอดีในน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 45 มก./ล. ค่าบีโอดี 5 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 20 มก./ล. ค่าของแข็งแขวนลอย เฉลี่ยเท่ากับ 12 มก./ล.

จากการทดลองพบว่าที่เวลากัก 2 ชม.ก็เพียงพอต่อการกำจัดซีโอดี และบีโอดี เนื่องจากเกิดการกระจายของสารอินทรีย์อย่างเพียงพอทั่วถึงทั้งชั้นสลัดจ์และความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียที่ต่ำทำให้ระบบยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี และความเร็วไหลขึ้นไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และบีโอดีเพิ่มขึ้น เนื่องจากระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เพียงพอต่อการกระจายของสารอินทรีย์ในชั้นสลัดจ์รวมทั้งสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมระหว่าง 25 -28 ^{o}ซ เป็นช่วงที่อัตราการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียเกิดขึ้นได้ดี

จากการทดลองเพื่อปรับปรุงการกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีด้วยถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์พบว่า ที่เวลากัก 8 ชม. น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์มีแอมโมเนียไนโตรเจนต่ำกว่า 35 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลายาวนาน 35 วัน และซีโอไลต์มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนเท่ากับ 7.6 มก.ไนโตรเจน/ล.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา......................................
ปีการศึกษา 2545

4270332121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: EGSB / DOMESTIC SEWAGE / ANAEROBIC TREATMENT / GRANULAR SLUDGE BED / UASB

TULACHAI JAEMSAI : EFFICIENCY OF EXPANDED GRANULAR SLUDGE BED REACTORS FOR TREATING DOMESTIC SEWAGE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 163 pp. ISBN 974-17-2435-7.

This research was a study on the efficiencies of Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) reactors for removal of COD, BOD and SS. The research examined the effects of the hydraulic retention time (HRT) and upflow loading velocity on the system performance.

The research was divided into 2 experiments. The first experiment studied the effect of hydraulic retention time at 2 and 6 hours and maintained the same upflow loading velocity at 0.5 m./hr. The second experiment studied the effect of variation of upflow loading velocity to 3.5, 6.5, 10.0 and 12.0 m./hr. and maintained the same hydraulic retention time at 2 hours.

The wastewater used in the research was domestic sewage from the Engineering building of Chulalongkorn university. On average, the feed flowrate was 8 and 24 litres per day at hydraulic retention time of 6 and 2 hours, respectively. The sewage had 160 mg.COD/l., 65 mg.BOD/l., and 45 mg.SS./l. From the results obtained at steady state condition, it was found that the system performance in terms of COD and BOD was higher than 50% and 80%, repectively. The effluent had 45 mg.COD/l., 20 mg.BOD/l., and 12 mg.SS./l

The experiments indicated that the hydraulic retention time of 2 hours was sufficient for COD and BOD removal efficiencies. The increasing of upflow loading velocity did not increase the COD and BOD removal because with low COD concentration there was enough efficient mass transfer due to 37% expansion of sludge bed at upflow loading velocity of 0.5 m./hr. and temperature range between 25 - 28 ^{0}c was also optimum to achieve high performance for anaerobic bacteria.

The experiment of improvement in ammonia nitrogen removal from EGSB reactors' effluent by zeolite column was found that the effluent of empty bed contact time (EBCT) of 8 hours had concentration of ammonia nitrogen below 35 mg.N/l. with breakthough time of 35 days. The zeolites' capacity was 7.5 mg.N./l.

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

Field of study Environmental Engineering Advisor's signature..................................

Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนและความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้มอบคำแนะนำในงานวิจัยและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และอาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ที่ได้เสนอข้อแนะนำและตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้มอบความรู้ซึ่งเป็นประโยชน์กับตัวผู้ทำวิจัยและทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนด้วยดีตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

ขอบขอบคุณ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ถ่ายทอดความรู้และเทคนิควิธีการเกี่ยวกับแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทำให้ผู้วิจัยได้เข้าใจเกี่ยวกับกลไกของแบคทีเรียที่ละเอียดมากขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.สมเกียรติ เตชกาญจนารักษ์ และคุณวิวัฒน์ จูประพัทธศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งได้ให้การอนุเคราะห์เกี่ยวกับเทคนิคฟิชเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณเพื่อนๆน้องๆทุกคนที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความช่วยเหลือและถ่ายทอดแลกเปลี่ยนความรู้ซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์และสร้างกำลังใจให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างมากตลอดงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ ๆ ทุกคนที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์และแนวทางในการทำการวิจัยอันทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณพ่อและแม่ที่เป็นกำลังใจสำคัญและสนับสนุนตลอดมารวมถึงญาติๆทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ประโยชน์อันใดซึ่งได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้ท่านเหล่านี้ซึ่งดูแลเลี้ยงดูและตักเตือนจนผู้วิจัยสามารถลุล่วงอุปสรรคต่างๆมาได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ
กิตติกรรมประกาศ ฉ
สารบัญ ช
สารบัญตาราง ฎ
สารบัญรูป ฐ
คำอธิบายคำย่อและคำจำกัดความ ด

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 คำนำ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตการวิจัย 3

บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร 4
2.1 ลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน 4
2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยไร้ออกซิเจน 5
2.3 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) 14
2.3.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี 14
2.3.2 การทำงานของระบบยูเอเอสบี 16
2.3.2 ประเภทของ Granular Sludge ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 18
2.4 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดจุลชีพ (granules) 19
2.4.1 ความสำคัญของ Extracellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ด จุลชีพ (Granulation) 22
2.4.2 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดจุลชีพ (Granulation) 23
2.4.3 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ 25
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี 19
2.5.1 อุณหภูมิ 25
2.5.2 พีเอช 26
2.5.3 ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ 26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.4 ระดับสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต 26
2.5.5 โออาร์พี 27
2.5.6 ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย 27
2.5.7 สารอาหารที่จำเป็น 27
2.5.7 สารพิษ 28
2.6 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB) 30
2.7 การศึกษาที่ผ่านมา 36

บทที่ 3 แผนการทดลองและวิจัย 45
3.1 แผนการทดลอง 47
3.2 การเตรียมน้ำเสีย 46
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 47
3.3.1 ถังพักน้ำเสีย 47
3.3.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบและเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ 47
3.3.3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี 47
3.3.4 อุปกรณ์วัดก๊าซ 47
3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน 48
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ 52
3.6 การควบคุมการทดลอง 53

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ 54
4.1 การดำเนินการวิจัย 54
4.2 ผลการทดลอง 56
4.2.1 การศึกษาผลของเวลากักที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ (ชุดการทดลองที่ 1) 56
4.2.2 การศึกษาผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ (ชุดการทดลองที่ 2) 65
4.3 อุณหภูมิ พีเอช และโออาร์พี 78
4.4 การวิเคราะห์ผลของเวลากักที่มีต่อประสิทธิภาพระบบอีจีเอสบี 80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1 ซีโอดี 80
4.4.2 บีโอดี 5 วัน 83
4.4.3 ของแข็งแขวนลอย 84
4.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยระบบยูเอเอสบี ที่ความเร็วไหลขึ้นต่ำ 85
4.5 การวิเคราะห์ผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพระบบอีจีเอสบี 86
4.5.1 ซีโอดี 86
4.5.2 บีโอดี 5 วัน 88
4.5.3 ของแข็งแขวนลอย 90
4.5.4 การขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่มีต่อพารามิเตอร์ในน้ำออก 92
4.6 ก๊าซชีวภาพ 86
4.7 สภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย และพีเอช 100
4.8 เม็ดแบคทีเรีย 108
4.8.1 ลักษณะของเม็ดแบคทีเรียและกลุ่มแบคทีเรีย 108
4.8.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดแบคทีเรีย 119
4.9 การกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบี 123
4.10 พารามิเตอร์ในน้ำออกของระบบอีจีเอสบีเปรียบเทียบกับ มาตรฐานน้ำทิ้งอาคาร 128

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 129
5.1 สรุปผลการทดลอง 129
5.2 ข้อเสนอแนะ 130

รายการอ้างอิง 131
ภาคผนวก 135

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย 136
ภาคผนวก ข ข้อมูลการกระจายขนาดของสลัดจ์ 143
ภาคผนวก ค กราฟของDeffeyes 156
ภาคผนวก ง รายละเอียดการคำนวณสภาพด่างและพีเอชในน้ำออกจากระบบ 158
ภาคผนวก จ เปรียบเทียบราคาของระบบอีจีเอสบีกับแอคติเวตเต็ดสลัดจ์
และระบบอีจีเอสบีร่วมกับซีโอไลต์ 161

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 163

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนในประเทศต่าง ๆ 2
ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนชุมชนในประเทศไทย 2
ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานอิสระสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ต่าง ๆ ของกระบวนการไร้อากาศ 9
ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับระบบ UASB และ EGSB ที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน 44
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ 45
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนจากอาคารสำนักงานที่ใช้ในงานวิจัย 46
ตารางที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ 52
ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนการทำวิจัย 55
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรผลของเวลากักที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ (ชุดการทดลองที่ 1) 64
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ (ชุดการทดลองที่ 2) 77
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงตัวของอุณหภูมิ พีเอช และโออาร์พี 78
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความเร็วไหลขึ้นและเวลากักจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 85
ตารางที่ 4.6 ยีลด์ปรากฏที่คำนวณได้ในแต่ละชุดการทดลอง 91
ตารางที่ 4.7 ปริมาณและปริมาตรของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยการคำนวณ 94
ตารางที่ 4.8 การคำนวณการแทนค่าโดยการ Trial & Error ในสมการการละลายน้ำของก๊าซ 97
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของก๊าซและความดันพาร์เชียล ที่ปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัด 98
ตารางที่ 4.10 ค่าอินทรีย์คาร์บอนที่คำนวณได้จากซีโอดีที่ถูกกำจัด ในทุกชุดการทดลองที่สัดส่วน COD/TOC ต่าง ๆ 99

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลสภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย และพีเอช ในสภาวะคงตัวทุกชุดการทดลอง 100
ตารางที่ 4.12 การคำนวณสภาพด่างทั้งหมดและพีเอชเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากผลการทดลอง 106
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีกับ มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคาร 128

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน 6
รูปที่ 2.2 วิถีการเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนของไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต 6
รูปที่ 2.3 วิถีไกลโคไลซิส 8
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนและปฏิกิริยาแบบไร้อากาศของสารอาหาร (substrates) ต่างๆ 8
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนย้ายของพลังงานในกระบวนการไร้อากาศ 13
รูปที่ 2.6 ระบบแบบไร้อากาศที่รับภาระบรรทุกสูง (high rate) ประเภทต่าง ๆ รวมทั้งระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ 15
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี 16
รูปที่ 2.8 รายละเอียดของ GSS ที่ใช้ในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศต่าง ๆ 17
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเม็ดจุลชีพในระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียกลูโคส 20
รูปที่ 2.10 โครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต 21
รูปที่ 2.11 บทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของแบคทีเรีย 22
รูปที่ 2.12 กลไกการเคลื่อนไหวต่าง ๆที่มีผลต่อการรวมตัวของเซลแบคทีเรีย 23
รูปที่ 2.13 กลไกของการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลโดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดจุลชีพ 24
รูปที่ 2.14 แผนผังส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบีและอีจีเอสบี 31
รูปที่ 2.15 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 64 ลบ.ม. ที่เมืองคาลี โคลัมเบีย 39
รูปที่ 2.16 แผนผังของระบบอีจีเอสบีขนาด 2.5 ลิตร 2 ชุดซึ่งมีส่วนประกอบเหมือนกัน 42
รูปที่ 3.1 การติดตั้งถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี 48
รูปที่ 3.2 แผนผังการไหลของแบบจำลองระบบอีจีเอสบี 49
รูปที่ 3.3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ อีจีเอสบี 50
รูปที่ 3.4 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์รับน้ำออกจากระบบอีจีเอสบี 51
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดก๊าซ 53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ระดับชั้นสลัดจ์ที่ขยายตัวเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงเวลากัก 55
รูปที่ 4.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 1 57
รูปที่ 4.3 บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันในการทดลองที่ 1 58
รูปที่ 4.4 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลองที่ 1 59
รูปที่ 4.5 สภาพด่างทั้งหมดในการทดลองที่ 1 60
รูปที่ 4.6 ปริมาณกรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 1 60
รูปที่ 4.7 พีเอชในการทดลองที่ 1 61
รูปที่ 4.8 โออาร์พีในการทดลองที่ 1 61
รูปที่ 4.9 ทีเคเอ็นในการทดลองที่ 1 63
รูปที่ 4.10 ซัลไฟด์ในทดลองที่ 1 63
รูปที่ 4.11 ระดับชั้นสลัดจ์ที่ขยายตัวเนื่องจากของการเปลี่ยนแปลงความเร็วไหลขึ้น 66
รูปที่ 4.12 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 2 67
รูปที่ 4.13 บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันในการทดลองที่ 2 68
รูปที่ 4.14 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลองที่ 2 70
รูปที่ 4.15 สภาพด่างทั้งหมดในการทดลองที่ 2 71
รูปที่ 4.16 ปริมาณกรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 2 71
รูปที่ 4.17 พีเอชในการทดลองที่ 2 73
รูปที่ 4.18 โออาร์พีในการทดลองที่ 2 73
รูปที่ 4.19 ทีเคเอ็นในการทดลองที่ 2 76
รูปที่ 4.20 ซัลไฟด์ในทดลองที่ 2 76
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 80
รูปที่ 4.22 การขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่เวลากักต่างๆ 81
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน 83
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย 84
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 87
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นกับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ 88
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน 88

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพ
การกำจัดของแข็งแขวนลอย 90

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์การขยายตัวของชั้นสลัดจ์กับพารามิเตอร์ในน้ำออก 92

รูปที่ 4.30 ค่าเฉลี่ยสภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยที่สภาวะคงตัวทุกชุดการทดลอง 101

รูปที่ 4.31 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของมวลสารของคาร์บอเนต
และมีเทนในระบบไร้อากาศ 102

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM)
ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม.
ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. 109

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM)
ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม.
ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. 110

รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM)
ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม.
ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. 111

รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM)
ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม.
ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. 112

รูปที่ 4.36 กลุ่มแบคทีเรียชนิดต่าง ๆโดยเทคนิค FISH ของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์
ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า) 116

รูปที่ 4.37 กลุ่มแบคทีเรียชนิดต่าง ๆโดยเทคนิค FISH ของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์
ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า) 118

รูปที่ 4.38 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในแต่ละช่วงการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1 120

รูปที่ 4.39 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในแต่ละช่วงการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 2 120

รูปที่ 4.40 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ที่การทดลองค่าความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. 121

รูปที่ 4.41 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ที่การทดลองค่าความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. 122

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชั้นสลัดจ์กับ D10 D50 และ D90 122

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างทีเคเอ็นที่ถูกกำจัดโดยซีโอไลต์ต่อระยะเวลาที่เวลากักต่างๆ...123
รูปที่ 4.44 ปริมาณแอมโมเนียสะสมในซีโอไลต์ที่เวลากัก (Empty bed contact time)ต่าง ๆ...124
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียที่เวลากักต่าง ๆ...125
รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณจากสมการ...126
รูปที่ 4.47 พารามิเตอร์ต่างๆของน้ำออกจากซีโอไลต์ที่เวลากักต่างๆเทียบกับน้ำเข้า...127

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายคำย่อและคำจำกัดความ

EGSB	=	Expanded granular sludge bed
UASB	=	Upflow anaerobic sludge blanket
ULV (Vup)	=	Upflow loading velocity (ความเร็วไหลขึ้น)
HRT	=	Hydraulic retention time (เวลากัก)
ECP	=	Extracellular Polymers (โพลิเมอร์นอกเซลแบคทีเรีย)
ORP	=	Oxidation Reduction Potential
VFA	=	Volatile fatty acid (กรดไขมันระเหยง่าย)
GSS	=	Gas - solid separator (ชุดตกตะกอนของ UASB)
SVI	=	Sludge volume index
SS	=	Suspended solid (ของแข็งแขวนลอย)
VSS	=	Volatile suspended solid (ของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์)
Ks	=	Half velocity constant (ไคเนติกของสมการโมโนด์)
SEM	=	Scanning Electron Microscopy
FISH	=	Fluorescent In Situ Hybridization (เทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของแบคทีเรียทางจุลชีววิทยา)
Steady State	=	ช่วงสภาวะคงตัวของระบบซึ่งเป็นช่วงที่ตัวแปรตามต่าง ๆ ในน้ำออกจากระบบ เช่น ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย กรดไขมันระเหยง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ปริมาณและสัดส่วนก๊าซชีวภาพ มีแนวโน้มคงที่หรือสม่ำเสมอในช่วงเวลาที่ได้ทำการควบคุมตัวแปรอิสระและสภาวะการทำงานของระบบให้คงที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 คำนำ

ระบบบำบัดทางชีววิทยาแบบไร้อากาศได้ถูกนำมาใช้ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย (readily biodegradable organic) โรงบำบัดน้ำเสียได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่ได้เริ่มมีการพัฒนาระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพสูง ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบไร้อากาศที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง โดยระบบสามารถรับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงมากกว่าระบบทั่วไป เช่น แอคติเวตเต็ดสลัดจ์ และนอกเหนือจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบในหลาย ๆ ด้านโดยเฉพาะในเรื่องของการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามจนถึงปัจจุบันนี้ระบบยูเอเอสบีถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับน้ำเสียโรงงานที่มีค่าความเข้มข้นของน้ำเสียในระดับปานกลางถึงสูงมาก แต่ไม่นานมานี้ได้มีความพยายามที่จะใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศสำหรับน้ำเสียโรงงานที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1,000 มก./ล. รวมไปถึงน้ำเสียชุมชน ได้มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำโดยเฉพาะน้ำเสียชุมชนพบว่าส่วนใหญ่ยังไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีพอที่จะทำให้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากข้อจำกัดของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศเองซึ่งไม่มีประสิทธิภาพที่สูงพอที่จะบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำได้ ในการทดลองระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนในงานวิจัยบางแห่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูง สาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความเข้มข้นของน้ำเสียชุมชนที่มีค่าสูง (ซีโอดีมากกว่า 500 มก./ล.) แต่บางแห่งที่มีซีโอดีต่ำรวมทั้งประเทศไทยจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ ดังแสดงข้อมูลน้ำเสียในประเทศต่าง ๆที่แตกต่างกันในตารางที่ 1.1 และ 1.2 ดังนั้นในทางปฏิบัติระบบยูเอเอสบีจึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสียชุมชน แต่อย่างไรก็ตามได้มีการคิดค้นและทำการพัฒนาระบบยูเอเอสบีโดยการศึกษาถึงผลของค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์จากการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำทิ้งและเรียกระบบนี้ว่า อีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB) ซึ่งระบบนี้มีลักษณะของชั้นสลัดจ์ที่ขยายตัวมากกว่าระบบยูเอเอสบี ส่งผลให้การสัมผัสระหว่างน้ำเสียและจุลชีพเป็นไปอย่างทั่วถึง

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนในประเทศต่าง ๆ (Seghezzo และคณะ, 1998)

component	Pedregal (Brazil)	Cali (Colombia)	Bennekom(The Netherland)
Settleable solids(ml/l)	8.2	-	-
SS			
Total	429	215	-
Fixed	177	106	-
Volatile	252	107	-
BOD	368	95	231
COD	727	267	520
Nitrogen (as N)	44	24	45
Organic	10	7	-
Ammonia	34	17	-
Phosphorus			
Total	11	13	18
Orthophosphate	8	-	-
Oraganic	3	-	-
E.Coli (in 100 ml.)	4×10^7	-	-
Sulphates	18	-	15
Chlorides	110	-	-
Alkalinity	388	120	350
Calcium	110	-	4
Magnesium	105	-	2
Temp (^{0}C)			
Maximum	26	27	20
Minimum	24	24	8

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย (มั่นสิน, 2545)

พารามิเตอร์	หน่วย	เทศบาลเมืองนนทบุรี (2531-32)	เขตยานนาวา (2535)
TDS	มก./ล.	624	403
คลอไรด์	มก./ล.	-	40.5
ซัลเฟต	มก./ล.	-	46.5
ทีเคเอ็น	มก./ล.N	10.8	26.6
ฟอสเฟต	มก./ล.P	3.8	3.3
บีโอดี	มก./ล.	49.7	26.8
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	55.3	13.9
FOG	มก./ล.	-	1.4
พีเอช	-	7.3	7.1
สภาพด่างทั้งหมด	มก./ล.$CaCO_3$	-	224

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชุมชนประเภทอาคารเรียน
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่ เวลากัก และความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์ต่อประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี
3. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ในการกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบี

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในขั้นเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการอีจีเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจากอาคารเรียน งานวิจัยทั้งหมดเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบจำลองทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้น้ำเสียจากอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอบเขตงานวิจัยมีดังนี้

ก. กำหนดค่าเวลากักในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 เท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีความเร็วไหลขึ้นเท่ากันคือ 0.50 เมตร / ชม. และกำหนดเวลากักในถังปฏิกรณ์1 และ 2 เท่ากันคือ 2 ชม. เปลี่ยนแปลงค่าความเร็วการไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์เป็น 3.5 , 6.5 ,10.0 และ 12.0 เมตร / ชม. ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ 1 เดือน และแต่ละช่วงใช้เวลา 2 เดือน รวมระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด 9 เดือน

ข. กำหนดค่าเวลากัก (Empty bed contact time)ของซีโอไลต์ในการกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีเท่ากับ 2 4 และ 8 ชม. ระยะเวลาในการทดลอง 2 เดือน

บทที่ 2
ทฤษฎีและแนวความคิด

2.1 ลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน (มั่นสิน, 2536)

ปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียทั่วไปล้วนมีลักษณะพื้นฐานร่วมกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชั่น - รีดัคชั่น หรือ รีดอกซ์ ปฏิกิริยารีดอกซ์ หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และสารรับอิเล็กตรอน ทั้งนี้พลังงานเคมีเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ แหล่งของพลังงานเคมีก็คือสารอินทรีย์ซึ่งจำเป็นที่จะต้องเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดอกซ์ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพราะมีพลังงานในตัวสูง และสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำจะเป็นสารรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนมีความแตกต่างอยู่ที่ประเภทของสารรับอิเล็กตรอน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ปฏิกิริยาก็เป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือแอโรบิค ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่อิเล็กตรอน แต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือไนเตรทหรือซัลเฟต ปฏิกิริยาก็เป็นแบบไร้ออกซิเจน ค่าพลังงานอิสระสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ต่าง ๆของกระบวนการไร้อากาศซึ่งใช้สารอาหาร (substrates) ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีหน้าที่ 2 ประการ คือ

ก. บำบัดสลัดจ์หรือสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนอินทรีย์ (อาจเป็นจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใด ๆ ก็ได้) โดยใช้ทำลายสารอินทรีย์ในตะกอนสลัดจ์ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ข. การบำบัดน้ำเสีย กระบวนการบำบัดน้ำเสียมักเป็นกระบวนการขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลงก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการแอโรบิคทำการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือ วิธีการนี้จะช่วยประหยัดทั้งพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มาก

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างจากกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนอย่างเด่นชัดหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น

- กระบวนการไร้ออกซิเจนที่ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา
- มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากได้

- มีเสถียรภาพต่ำ
- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ

2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยไร้ออกซิเจน

ภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ สารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กจะถูกขนส่งผ่านเข้าไปในเมมเบรนของแบคทีเรียได้เลย ส่วนสารประกอบที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะต้องถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ให้มีขนาดเล็กจนสามารถถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลได้ เมื่อสารอินทรีย์อยู่ในเซลแล้วจะถูกออกซิไดส์หลายครั้ง จนในที่สุดกลายเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ จนกระทั่งได้ผลสุดท้ายมีหลายขั้นตอน ลำดับขั้นตอนของปฏิกิริยาสามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

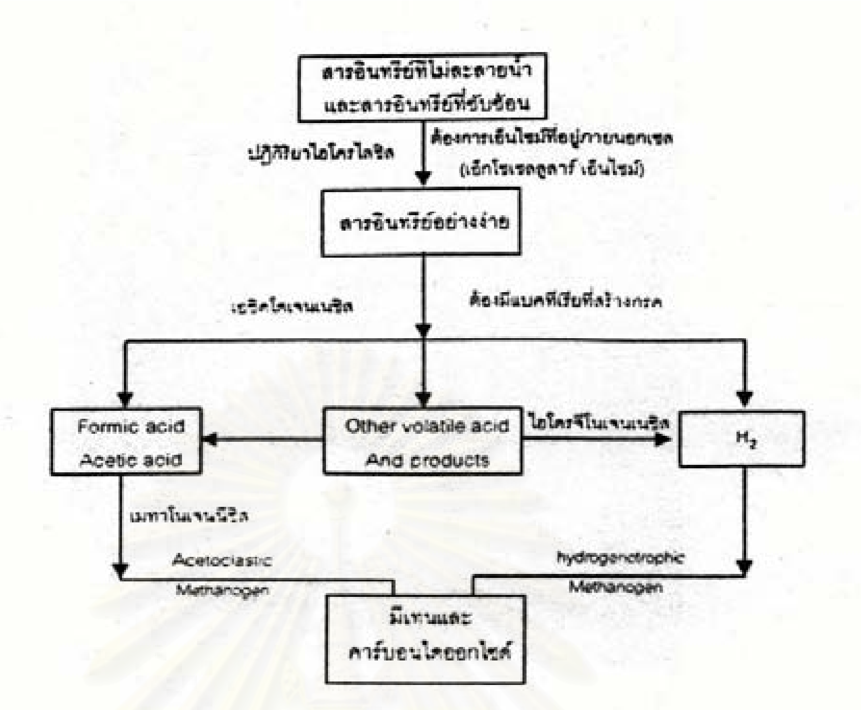
ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซีส (hydrolysis)

เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ลดขนาดของสารอินทรีย์เพื่อให้สามารถนำเข้าไปในเซลได้ เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เป็นต้น ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซล (extracellular enzyme)เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

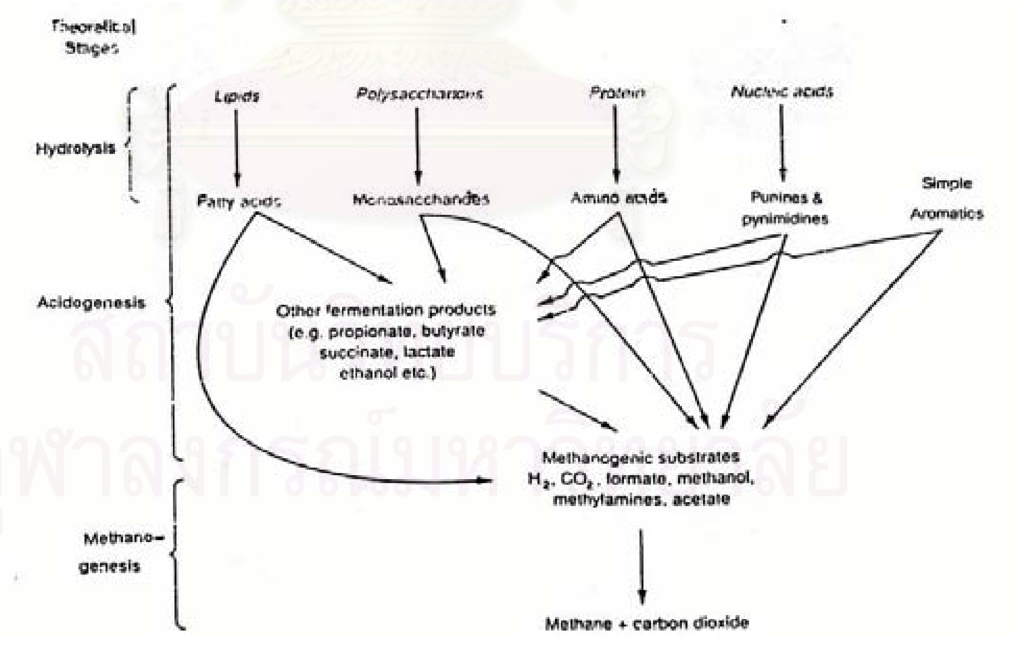
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (acidogenesis)

โมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของแบคทีเรีย โดยผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเตชั่น (fermentation) ซึ่งผลสุดท้ายจะมีทั้งสารที่อยู่ในรูปรีดิวส์และรูปออกซิไดส์ ผลิตผลที่เป็นรูปออกซิไดส์ส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอินทรีย์ระเหย (volatile acids) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ปฏิกิริยาในการสร้างกรดอินทรีย์เหล่านี้เรียกว่าเอซิดโดเจนนิซีส (acidogenesis) และแบคทีเรียที่รับผิดชอบเรียกว่าแบคทีเรียสร้างกรด ผลิตผลที่เป็นรูปรีดิวส์ เป็นสารอินทรีย์หลายประเภทที่มีปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของถังปฏิกรณ์ เช่น

- แบคทีเรียสร้างกรดบางชนิดสามารถใช้อิออนของไฮโดรเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนแทนสารอินทรีย์ ทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา ในกรณีเช่นนี้จะไม่มีผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน (มั่นสิน, 2536)



รูปที่ 2.2 วิถีการเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนของไขมัน
โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต (Metcalf และ Eddy, 1991)

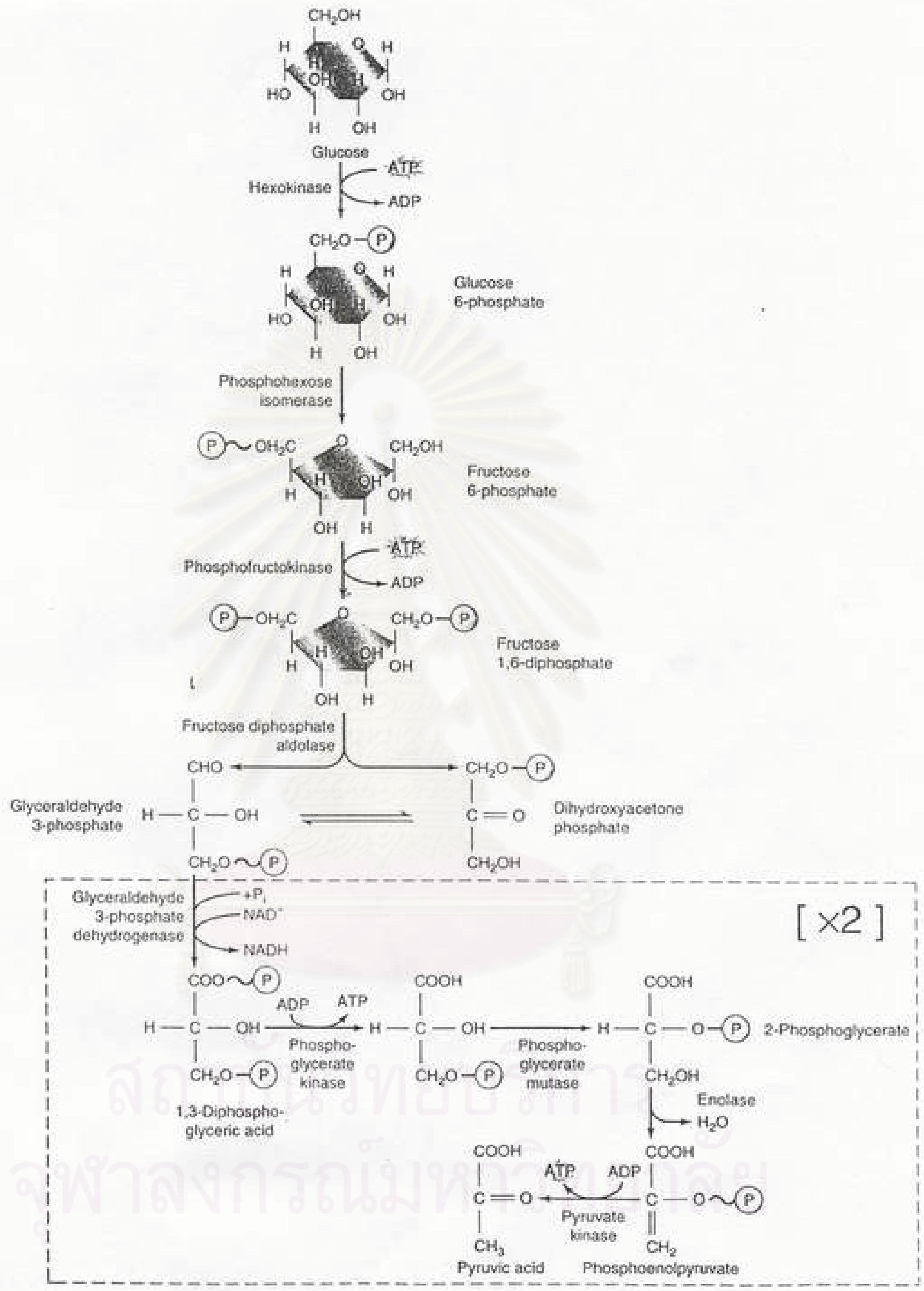
- แบคทีเรียบางตัวสามารถใช้กรดอินทรีย์ขนาดใหญ่หรือสารอินทรีย์อื่นในการสร้างกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยานี้สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่เรียกว่า ไฮโดรจีโนเจนนีซีส (hydrogenogenesis) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้ แต่ตัวที่สร้างกรดได้อาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน เพราะฉะนั้นแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนจึงเป็นแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจเรียกรวมได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน(non-mehanogenic bacteria) แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด(obligate anaerobes)

พบว่าไฮโดรเจนถูกใช้ในการรีดิวส์คาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นมีเทน ดังนั้นการอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียที่สร้างและไม่สร้างมีเทนจึงให้ประโยชน์ร่วมกัน แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนมอบกรดอะซิติกและสารอินทรีย์อย่างง่ายให้แก่แบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งในการสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปในเซล เพื่อใช้ไปเป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid) เช่น กรกอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลาย สารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นกับปัจจัย 2 ประการ คือ

- ชนิดของสับสเตรท
- ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

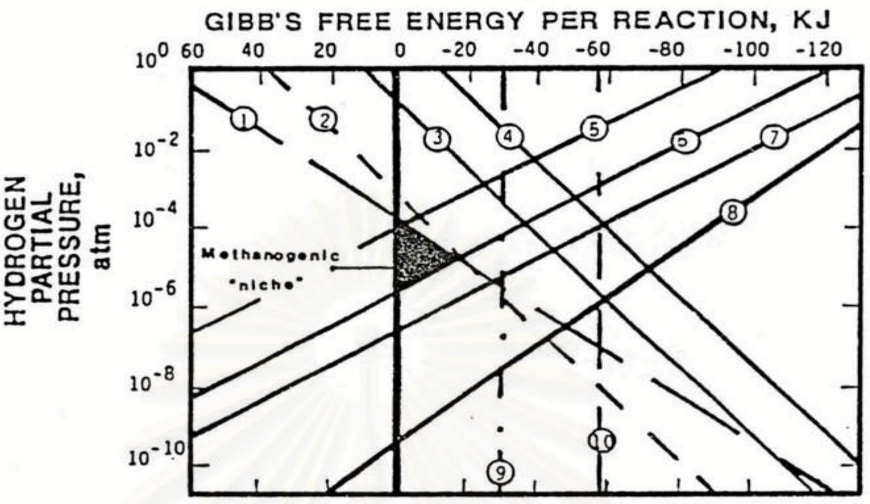
โดยความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจมีผลแปรตามหรือแปรผกผันต่อการผลิตกรดอะซิติกในระบบโดยสังเกตได้จาก Gibb's free energy ซึ่งหากมีค่าต่ำ(ติดลบ)แสดงว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ง่าย รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนและปฏิกิริยาแบบไร้อากาศของสารอาหาร (substrates) ต่างๆ ตัวอย่างเช่น น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิถี Embden – Meyerhof pathway (EMP) หรือ Glycolysis ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 2.3 วิถีไกลโคไลซิส (McKane และ Kandel, 1996)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนและปฏิกิริยาแบบไร้อากาศของสารอาหาร (substrates) ต่างๆ (Joseph และ Frederick, 1992)



Graphical representation of the hydrogen-dependent thermodynamic favorability of anaerobic reactions. Legend: (1) Propionic acid oxidation to acetic acid; (2) Butyric acid oxidation to acetic acid; (3) Ethanol oxidation to acetic acid; (4) Lactic acid oxidation to acetic acid; (5) Acetogenic respiration of bicarbonate (CO_2); (6) Methanogenic respiration of bicarbonate; (7) Respiration of sulfate to sulfide; (8) Respiration of sulfite to sulfide; (9) Methanogenic cleavage of acetic acid; and (10) SRB-mediated cleavage of acetic acid. Basis: acetic acid, 25 mM; propionic, butyric, lactic acids and ethanol, 10 mM; sulfate and sulfite, 5 mM; bicarbonate, 20 mM; and, methane, 0.7 atm

ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานอิสระสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ต่าง ๆของกระบวนการไร้อากาศ (Joseph และ Frederick, 1992)

Some Redox Half-Reactions Responsible for Anaerobic Microbial Conversion of Selected Substrates.

Oxidations (electron donating reactions)			ΔG_0, KJ
Propionate − Acetate:	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O$	$- CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$	+76.1
Butyrate − Acetate:	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O$	$-2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+48.1
Ethanol − Acetate:	$CH_3CH_2OH + H_2O$	$-CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+9.6
Lactate − Acetate:	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O$	$-CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$	−4.2
Acetate − Methane:	$CH_3COO^- + H_2O$	$-HCO_3^- + CH_4$	−31.0
Respirative (electron accepting reactions)			
HCO_3^- − Acetate:	$2HCO_3^- + 4H_2 + H^+$	$- CH_3COO^- + 4H_2O$	−104.6
HCO_3^- − Methane:	$HCO_3^- + 4H_2 + H^+$	$-CH_4 + 3H_2O$	−135.6
Sulfate − Sulfide:	$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+$	$-HS^- + 4H_2O$	−151.9
	$CH_3COO^- + SO_4^{2-} + H^+$	$-2HCO_3^- + H_2S$	−59.9
Nitrate − Ammonia:	$NO_3^- + 4H_2 + 2H^+$	$-NH_4^+ + 3H_2O$	−599.6
	$CH_3COO^- + NO_3^- + H^+ + H_2O$	$-2HCO_3^- + NH_4^+$	−511.4
Nitrate − Nitrogen gas:	$2NO_3^- + 5H_2 + 2H^+$	$-N_2 + 6H_2O$	−1120.5

สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ

กลูโคสจะถูกแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนดูดซึมเข้าไปย่อยสลายภายในเซลภายใต้กระบวนการทางขีวเคมีแบบ EMP (Embden – Meyerhof Patthway) กลูโคสจะถูกออกซิไดส์เป็นกรดไพรูวิก ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ NAD^+ + 2\ ADP + 2P \text{ ----------> } 2\ CH_3COCOOH + 2\ NADH + ATP \quad (1)$$

โคเอนไซม์ NAD^+ จะถูกใช้เป็นตัวนำอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และปลดปล่อย H^+ กลายเป็น NAD^+ กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ดังนี้

$$2\ NADH \text{ ----------> } 2\ NAD^+ + H_2 \quad (2)$$

ถ้าไฮโดรเจนที่อยู่น้ำมีความดันพาร์เชียลต่ำจะทำให้สมการ (2) สามารถเกิดจากซ้ายไปขวาได้เอง และกรดไพรูวิกจะถูกออกซิไดส์ต่อไปกลายเป็นอะซิทิลโคเอ(CH_3CoA) ดังนี้

$$2\ CH_3COCOOH + 2\ NAD^+ \text{ ----------> } 2\ CH_3CoA + 2\ CO_2 + 2\ NADH \quad (3)$$

อะซิทิลโคเอจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกพร้อมกับการสร้างATP ดังนี้

$$2\ CH_3CoA + 2\ ADP + 2\ P \text{ ----------> } CH_3COOH + 2\ ATP \quad (4)$$

เมื่อรวมสมการ (1) (3) และ (4) เข้าด้วยกัน จะได้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O + 4ADP + 4\ P \text{ ----------> } 2\ CH_3COOH + 2\ CO_2 + 4H_2 + 4ATP \quad (5)$$

ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำมากเท่านั้นและเมื่อกระบวนการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ผลิตมีเทนโดยแบคทีเรีย H_2 utilizer ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนชนิดหนึ่ง เป็นผลให้ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนมีค่าต่ำเสมอ

$$4\ H_2 + H_2CO_3 \text{ ----------> } CH_4 + 3\ H_2O \quad (6)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง

ถ้าหากไม่มี H_2 utilizer อาศัยอยู่ในถังย่อยไร้ออกซิเจน ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีการสะสมตัวจนกระทั่งความดันพาร์เชียลมีค่าสูง ทำให้การปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ไม่สามรถเกิดขึ้นเองได้ และวิธีการที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้คือการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้กลายเป็นกรดโพรพิโอนิกสามารถทำให้ NADH ปลดปล่อย H^+ ได้ดังนี้

$$CH_3COCOOH + 2\ NADH + ADP + P \text{ ----------> } CH_3CH_2COOH + 2\ NAD^+ + ATP + H_2O \quad (7)$$

และจากกลูโคส 1 โมลสามารถผลิตกรดไพรูวิกได้ 2 โมล ดังนั้นจะเหลือกรดไพรูวิกอีก 1 โมล ซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นอะซิทิลโคเอไปตามปกติดังนี้

$$CH_3COCOOH + NAD^+ \text{ ----------> } CH_3CoA + CO_2 + NADH \quad (8)$$

และหลังจากนี้ ถ้าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ การปลดปล่อย H^+ จาก NADH ก็สามารถดำเนินต่อไปได้ แต่ถ้าความดันพาร์เชียลมีค่าสูง การปลดปล่อย H^+ จะต้องเกิดขึ้นควบคู่กับการเปลี่ยนอะซิทิลโคเอให้เป็นกรดอะซิติก ดังนี้

$$CH_3CoA + NADH \text{ ----------> } CH_3COOH + H_2 + NAD^+ \quad (9)$$

เมื่อรวมสมการ (7) (8) และ (9) เข้าด้วยกัน จะได้สมการดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 3\ ADP + 3\ P \text{ ----------> } CH_3COOH + CH_3CH_2COOH + CO_2 + H_2 + 3\ ATP \quad (10)$$

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (acetogenesis)

แบคทีเรียอะซิโตเจนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) เป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง เนื่องจากการผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรทเฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลลามีน (methylamine) แบคทีเรียอะซิโตเจนิก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ภายใต้ภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพรพิโอนิก ตามลำดับ

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \text{ ----------> } CH_3COOH + CO_2 + 3H_3 \quad (11)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \text{ ----------> } 2CH_3COOH + H_3 \quad (12)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนที่มีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนที่มีความดันพาร์เชียลสูง

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (methanogenesis)

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนเจริญเติบโตเกิดได้ช้ามาก และยังเป็นเซลที่จำเพาะต่อชนิดอาหารมากและบอบบาง เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย หรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ภายนอกช่วงพีเอชระหว่าง 6.8 - 7.2 จะพบว่าสับสเตรทที่แบคทีเรียทุกตัวสามารถใช้ได้มีเพียงไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอร์มิกและมีเพียงตัวเดียวที่ใช้กรดอะซิติกและเมทานอลได้ แบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์หลายชนิดและสารอินทรีย์อื่นๆ ด้วย แต่แบคทีเรียที่สร้างมีเทนต้องการสารอินทรีย์บางชนิดอย่างเจาะจง กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้ ทำให้ต้องมีสารอีกจำนวนมากที่ตกค้างอยู่ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ระบบไร้ออกซิเจนมักไม่สามารถลดซีโอดีของน้ำเสียให้เหลือต่ำเท่ากับกรณีของระบบที่ใช้ออกซิเจน

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนอาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (hydrogenotrophic methanogen หรือ hydrogen utilizer) กล่าวคือ ได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจำนวนมากจากไฮโดรเจน แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสับสเตรทเพียงอย่างเดียวได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย

$$4H_2 + CO_2 \text{ ----------> } CH_4 + 2H_2O + 32.4 \text{ kcal} \quad (13)$$

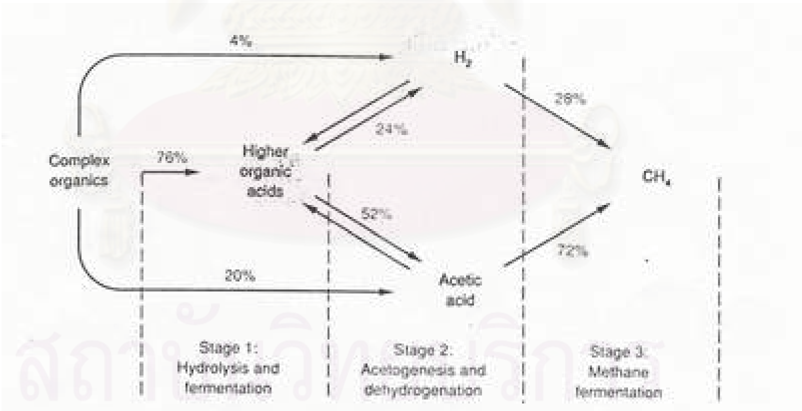
- แบคทีเรียสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetolastic methanogen) พบว่ามีเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติกดังนี้

$$CH_3COOH \text{ ---------->} \quad CH_4 + CO_2 + 6.71 \text{ kcal} \qquad (14)$$

แต่อย่างไรก็ดียังมีข้อสงสัยว่าปฏิกิริยา (14) นี้ จะสามารถให้พลังงานพอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลหรือไม่ (ทั้งนี้เพราะตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ อาจพิสูจน์ได้ว่า สมการ (14) ได้พลังงานไม่เพียงพอในการดำรงชีวิตของ) การเปลี่ยนอะซิเตทให้เป็นมีเทนอาจเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานดังนี้

$$CH_3COOH + 4 H_2 \text{ ---------->} \quad 2 CH_4 + 2 H_2O + 39.01 \text{ kcal} \qquad (15)$$

ในปฏิกิริยาอันนี้กรดอะซิติกเป็นสารตัวสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน พลังงานที่ได้สูงกว่าที่ได้จากสมการ (14) มาก และเชื่อว่าเพียงพอสำหรับการดำรงชีวิตของเซล



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนย้ายของพลังงานในกระบวนการไร้อากาศ (Metcalf และ Eddy, 1991)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 **ระบบยูเอเอสบี** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของระบบยูเอเอสบีได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในเวลาไม่นานนัก Lettinga และคณะ (1980) ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบีโดยการเลี้ยงให้จุลินทรีย์เกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่มหรือเม็ดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในการแยกน้ำเสียโดยที่ระบบนี้จะมีทางให้ของเสียที่จะนำไปหมักเข้าทางส่วนล่างสุดของบ่อโดยให้มีทางเข้าหลาย ๆ จุดกระจายตามพื้นที่หน้าตัดของบ่อ บริเวณส่วนลางสุดของถังยูเอเอสบีจะมีตะกอนจุลินทรีย์ (sludge)อย่างหนาแน่นอาจมีลักษณะเป็น Granular หรือ Floc บริเวณนี้ถูกเรียกว่า Sludge Bed ซึ่งเป็นชั้นตะกอนที่มีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้ดี (มีความเข้มข้น 40 - 100 กก. VSS / ลบ.ม. และ SVI น้อยกว่า 20 มล./ ก.) บริเวณเหนือชั้น Sludge Bed ซึ่งเป็นตะกอนแขวนลอย เรียกว่า Sludge Blanket ซึ่งมีคุณสมบัติในการตกตะกอนน้อยกว่าในชั้น Sludge Bed (มีความเข้มข้น 15 – 30 กก. VSS / ลบ.ม.) และที่ส่วนบนของถังปฏิกรณ์มี Gas - solid separator (GSS) เพื่อช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดและมีการสะสมของสลัดจ์ในส่วนล่างของถัง ทำให้มีอายุตะกอนสูง นอกเหนือจากนี้ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เมื่อลอยขึ้นสู่ส่วนบนของถังจะช่วยให้เกิดการกวนผสมภายในชั้นสลัดจ์

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบ ยูเอเอสบี

ข้อดี ได้แก่

1) สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบแบบไร้อากาศแบบอื่น

2) ใช้พลังงานเดินระบบต่ำเพราะไม่มีการเติมอากาศและไม่ใช้เครื่องจักรกล

3) ปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดจากระบบน้อยกว่าแบบเติมอากาศ ในระบบใช้ออกซิเจนสารอินทรีย์จะเปลี่ยนไปเป็นเซลจุลินทรีย์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ระบบไร้อากาศจะจะเปลี่ยนไปเป็นเซลจุลินทรีย์เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ และสลัดจ์ยังมีความคงตัวสูง สามารถทำ dewatering ได้ง่าย

4) ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบใช้ออกซิเจน

5) การก่อสร้างและควบคุมระบบสามารถกระทำได้ง่ายและมีราคาถูก

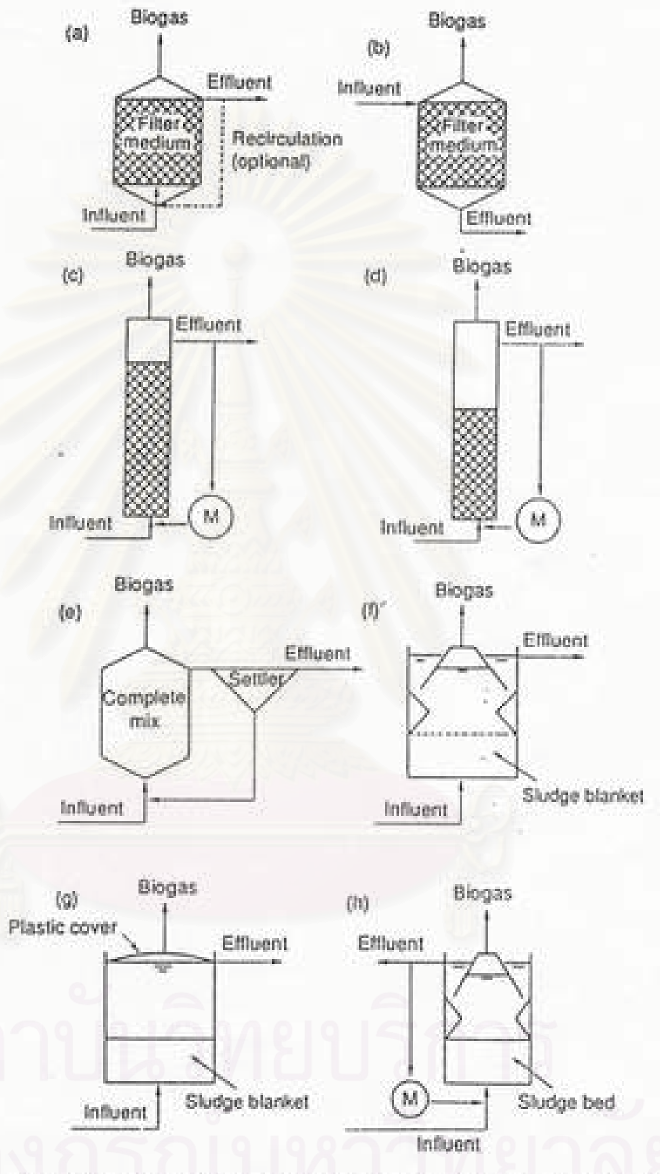
6) ก๊าซมีเทนที่ได้จากถังปฏิกรณ์สามารถเอาไปใช้เป็นพลังงานต่อได้

7) สามารถป้องกันมิให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบอื่น

8) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในระบบบำบัดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และในพื้นที่ชุมชนนอกเขตเมือง

9) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่มีปัญหา และการเริ่มต้นระบบใหม่สามารถกระทำได้ง่าย ระบบฟื้นตัวได้เร็ว จึงเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู

10) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่างได้ เช่น halogenated solvents



Different configurations of high rate or modern anaerobic waste water treatment systems. (a) Upflow anaerobic filter; (b) downflow anaerobic filter; (c) fluid bed; (d) expanded bed; (e) contact process; (f) upflow anaerobic sludge blanket (UASB) digester; (g) anaerobic fluid bed reactor (RALF); and (h) expanded granular sludge blanket (EGSB) digester

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.6 ระบบแบบไร้อากาศที่รับภาระบรรทุกสูง (high rate) ประเภทต่าง ๆ รวมทั้งระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ (Van Haandel และ Lettinga, 1994)

ข้อเสีย ได้แก่

1) ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ(start up)นานมาก และต้องเลี้ยงตะกอนให้จับตัวกันเป็นเม็ดระบบจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี

2) ต้องควบคุมปริมาณของตะกอนที่มีอยู่ในระบบให้เหมาะสม และเกิดการล้างออก (wash out) น้อยที่สุด

3) ควบคุมอัตราการผลิตก๊าซในถังปฏิกรณ์ให้เพียงพอต่อการผสมในชั้นสลัดจ์

4) แบคทีเรียในระบบมีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงพีเอชที่ค่อนข้างแคบ ประมาณ 6.5 – 7.2

5) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำ

6) ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างมาก

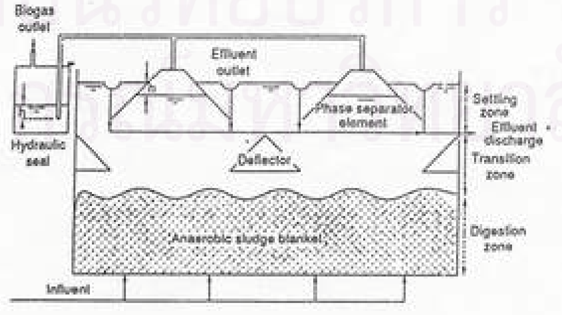
7) ระบบไร้อากาศไม่สามารถเป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้เนื่องจากยังคงมีสารตัวกลาง (intermediate) ต่าง ๆ เหลืออยู่ ทำให้น้ำทิ้งมักมีซีโอดีสูง

2.1.2 การทำงานของระบบ ยูเอเอสบี

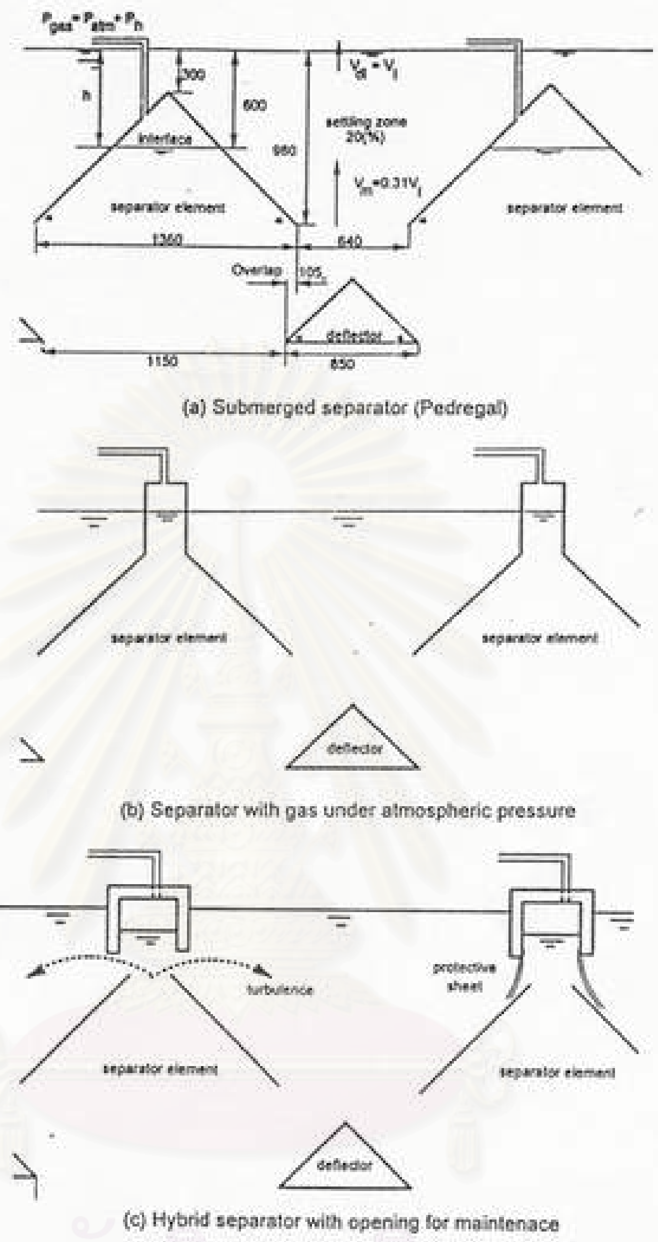
ลักษณะทั่วไปของถังยูเอเอสบี ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอก ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมกับระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) ที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์

2. ถังตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์(GSS)ประกอบด้วยแผ่นกั้นเอียงทำมุมประมาณ 45 – 60 องศา โดยมีจุดประสงค์เพื่อ ทำหน้าที่แยกของเหลว ก๊าซ และตะกอนจุลินทรีย์ และยังทำหน้าที่ป้องกันการหลุดออกมาจากถังปฏิกรณ์ของตะกอนจุลินทรีย์ GSS ที่ใช้ในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชุมชนดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี (Van Haandel และ Lettinga, 1994)



Examples of the design of a GLS separator in the UASB reactors constructed at (a) Pedregal, (b) Cali and (c) Jeremias, Brazil

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.8 รายละเอียดของ GSS ที่ใช้ในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศต่าง ๆ (Van Haandel และ Lettinga, 1994)

การทำงานของระบบยูเอเอสบี จะต้องทำการเติมเชื้อจุลชีพเข้าสู่ถังยูเอเอสบีก่อน และรักษาสภาพแวดล้อมในถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสมต่อการเกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge bed) ซึ่งจะมีความเข้มข้นประมาณ 40 –100 กก. VSS /ลบ.ม. ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นและเกิดการรวมตัวกันโดยกลุ่มของแบคทีเรียจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) ซึ่งมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีลักษณะที่แตกต่างกันโดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียที่ถูกบำบัดและเชื้อจุลชีพที่เอามาเลี้ยงเพื่อเริ่มต้น (start up) ระบบ

น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ผ่านระบบป้อนน้ำเสีย ระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านและเกิดการสัมผัสกับชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดเซลของแบคทีเรีย และก๊าซชีวภาพต่าง ๆ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากความเร็วของน้ำเสียที่ไหลขึ้นประกอบกับก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอยและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ และเมื่อน้ำเสียไหลขึ้นไปยังส่วนบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ GSS น้ำเสียจะเกิดการปะทะกับแผ่นกั้นและก๊าซที่เกาะมากับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออกโดยไหลไปยังส่วนบนออกไปตามท่อไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์และไหลล้นออกไปนอกถังปฏิกรณ์ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักและตกลงกลับไปยังชั้นของตะกอนด้านล่าง การที่ระบบประสบความล้มเหลวในการบำบัดสาเหตุส่วนใหญ่เนื่องมาจากการที่ไม่สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นได้มากเพียงพอ และเกิดการล้างออก (wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ออกไปพร้อมกับน้ำทิ้ง

2.3.3 ประเภทของ Granular Sludge ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี (Lettinga และคณะ, 1994 อ้างถึงใน สมพงษ์, 2536)

ลักษณะของ Granular Sludge ที่เกิดขึ้นในระบบยูเอเอสบีขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (Seed Sludge) ส่วนประกอบของน้ำเสีย ตลอดจนการเริ่มต้นขบวนการแบบไร้อากาศและสิ่งแวดล้อมที่เริ่มต้น Granular Sludge อาจมีหลายชนิดดังนี้

2.3.3.1 Sarcina Granules เป็นชนิดที่มีจุลชีพรูปร่างกลม เกาะกันเป็นกลุ่ม เป็นส่วนใหญ่ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียที่มีอะซิติกเข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ล.

Granular ชนิดนี้มักมีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 6.5 มม.) จึงถูกชะล้างออกได้ง่าย และยังเป็นชนิดที่มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ

2.3.3.2 Spinky Granular เป็นชนิดที่มีความยาวมากกว่า 1 มม. มีความหนาน้อยกว่า 0.5 มม. ประกอบด้วย $CaCO_3$ มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งข้าวโพด

2.3.3.3 Filamentous เป็นจุลชีพที่มีรูปร่างเป็นแท่งต่อกันเป็นสายยาวประกอบด้วย *Methanotrix* ชนิดที่เป็นเส้น Granular ชนิดนี้ สร้างขึ้นจากน้ำเสียที่มีแต่ VFA (Volatile fatty acid)

2.3.3.4 Rod ลักษณะเป็นรูปกลมประกอบด้วย *Methanotrix* ชนิดที่เป็นเส้นรวมกันประมาณ 5 เซล พบในถังหมักที่บำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันและโรงงานน้ำตาล

โครงสร้างของ Granular Sludge ประกอบด้วย *Methanotrix* Aggregates Rod เป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วย *Methanotrix* ที่เป็นเส้นสายล้อมรอบดังแสดงในรูปที่ 2.8

2.4 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดจุลชีพ (granules)

Guiot และ คณะ (1992) กล่าวว่าความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลชีพที่สามารถตกตะกอนได้ดี เม็ดจุลชีพที่เกิดขึ้นมีข้อดีดังนี้คือ

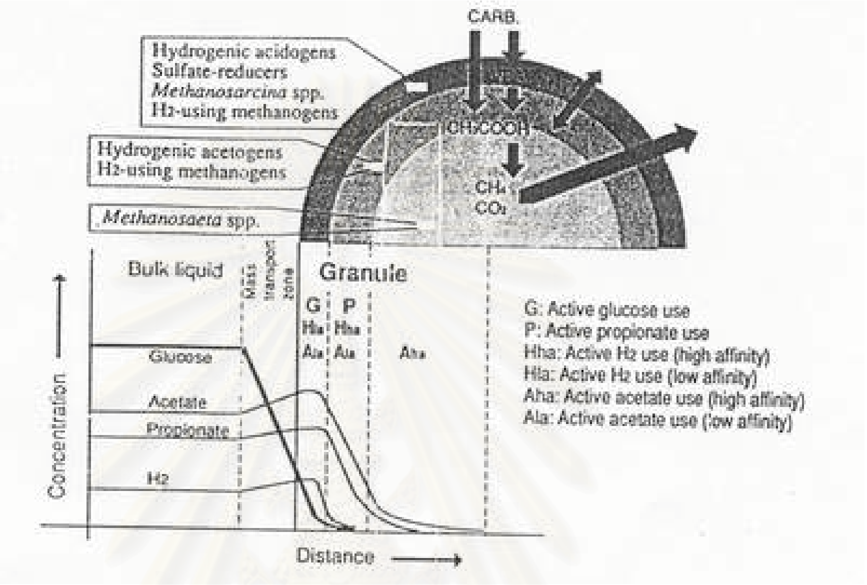
- มีความหนาแน่นสูง
- เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลาง (media) จึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถังปฏิกรณ์
- เม็ดจุลชีพมีอัตราส่วนของแบคทีเรียต่อปริมาตรที่สูงมาก

การศึกษาโครงสร้างของเม็ดจุลชีพในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscopy) พบว่ามีโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 3 ชั้น เช่น เม็ดจุลชีพที่พบในการทดลองซึ่งใช้น้ำตาลซูโครส พบกลุ่มแบคทีเรียแบ่งเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนี้คือ

ชั้นนอก ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่ม ได้แก่ Hydrogenic acidogens Sulfate reducers *Methanosarcina* และ H2-utilizing methanogens

ชั้นกลาง ได้แก่ Hydrogenics acetogens และ H2-utilizing methanogens เช่น *Methanosarcina* *Methanococcales* และ *Methanospirillum*

ชั้นใน เป็นแบคทีเรียประเภท Aceticlastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น *Methanosaeta*



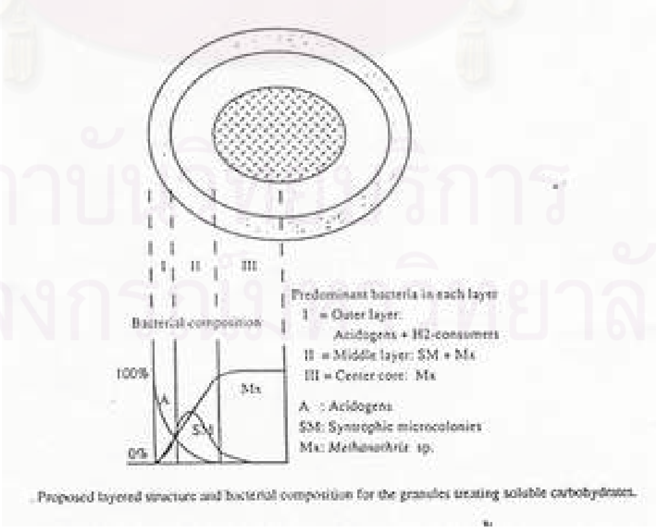
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเม็ดจุลชีพในระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียกลูโคส(Guiot และคณะ, 1992)

แบคทีเรียกลุ่ม H2-utilizing methanogens ในชั้นกลางและชั้นนอกมีความแตกต่างกันคือ กลุ่มแบคทีเรียชั้นนอกมีความชอบที่จะใช้ substrate ที่ต่ำกว่า (low affinity หรือมีค่า Ks สูง) กลุ่มแบคทีเรียชั้นกลาง และแบคทีเรียกลุ่ม Aceticlastic ที่อยู่ชั้นในมี affinity ที่สูงกว่า (ค่า Ks ต่ำ) แบคทีเรียกลุ่ม Aceticlastic ในชั้นกลาง การเกิดเม็ดจุลชีพ (Granulation) เป็นโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียแต่ละชนิด โดยเฉพาะในแกนกลางของเม็ดจุลชีพซึ่งเป็น Aceticlastic methanogens (ซึ่งส่วนใหญ่เป็น *Methanosaeta*) เป็นส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนโดยอาศัย substrate ได้แก่ อะซิเตทซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มชั้นนอกและชั้นกลาง โดยทั้งนี้ *Methanosaeta* เป็นแบคทีเรียที่มีค่า affinity สูงมากที่สุด (Ks ต่ำมากที่สุด) ในกลุ่มแบคทีเรีย Aceticlastic methanogens ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของ *Methanosaeta* ในสภาวะที่ข้อจำกัดของการแพร่กระจายอะซิเตทมายังแกนกลางของเม็ดจุลชีพ

อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าไม่พบโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของแบคทีเรียในเม็ดจุลชีพที่บำบัดน้ำเสียประเภทโพรพิโอเนท เอทานอล และน้ำเสียประเภทที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (non-carbohydrate) โดยเฉพาะน้ำเสียประเภทโพรพิโอเนท พบแบคทีเรียกลุ่ม propionate oxidizing acetogens กระจายอยู่ทั่วเม็ดจุลชีพ (Fang และคณะ, 1994)

โครงสร้างและขนาดของชั้นแบคทีเรียในแต่ละชั้นขึ้นกับอัตราการย่อยสลาย substrates และการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดจุลชีพ ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต ที่ผิวนอกสุดของเม็ดจุลชีพพบว่ากลุ่ม acidogens จะมีปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะนอกเหนือไปจากความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าสูงบริเวณรอบนอก (bulk liquid) แล้ว ยังเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ acidogenesis ที่มีค่าสูงกว่า acetogenesis และ methanogenesis อะซิเตทที่ถูกผลิตจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดจุลชีพต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.10

ในกรณีที่เป็นน้ำเสียประเภทโปรตีนหรือกรดอะมิโน เช่นกลูตาเมต ขั้นตอน acidogenesis จะเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (rate limiting step) ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการย่อยสลายและการแพร่กระจายที่ช้าของกลูตาเมต ทำให้มีการแพร่กระจายของสารอาหารอย่างทั่วถึงทั้งเม็ดจุลชีพ ซึ่งส่งผลให้แบคทีเรียมีลักษณะเหมือนกันทั่วทั้งเม็ดจุลชีพ และไม่เกิดโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของกลุ่มแบคทีเรีย (Fang และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต (Fang และคณะ, 1994)

2.4.1 ความสำคัญของ Extracellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ดจุลชีพ (Granulation) (Schmidt และ Ahring, 1995)

Extracellular Polymers (ECP) เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปในธรรมชาติและเป็นพื้นฐานสำคัญของโครงสร้างเม็ดจุลชีพ ECP ของเซลแบคทีเรียเป็นสารที่มีโครงสร้างที่มีส่วนประกอบหลักเป็น polysaccharide ซึ่งห่อหุ้มอยู่รอบนอกชั้นเมมเบรนของเซลแกรมลบ (Gram-negative cells) และ peptidoglycan สำหรับเซลแกรมบวก (Gram-positive cells) ECP เป็นสารที่เกิดได้จากหลายทาง เช่น การสลายตัวของเซล หรือสารอินทรีย์ที่ถูกขับทิ้งออกมาจากเซล ECP ประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ของ saccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก โดยหน้าที่ของ ECP จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเซลแบคทีเรีย ECP มีความสามารถในการดักจับสารอาหารละลาย (soluble nutrients) และยังเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะกับเซลอื่นด้วย

มีรายงานวิจัยหลายงานรายงานว่าแบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดจุลชีพถูกล้อมรอบด้วย ECP และเป็นที่ยอมรับว่าในกระบวนการรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลชีพจะมี ECP เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มีรายงานว่าพบปริมาณ ECP อยู่ในเม็ดจุลชีพมีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ VSS ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์สลัดจ์ วิธีการสกัดแยก ECP และวิธีการวิเคราะห์ ECP ECP ที่พบในเม็ดจุลชีพมักประกอบด้วย โปรตีน และ polysaccharide เป็นส่วนใหญ่ โดยมีอัตราส่วนของโปรตีนต่อ polysaccharide เท่ากับ 2 : 1 ถึง 6 : 1 และยังมีส่วนประกอบของไขมันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02 – 0.05 เปอร์เซ็นต์ VSS สารที่เป็นส่วนประกอบใน ECP จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสลัดจ์ โดยทั่วไปแบคทีเรียที่กระจายตัวในน้ำเสีย (Dispersed bacteria) มักจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบและเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างเซล แต่ ECP ที่ห่อหุ้มรอบผิวเซลจะส่งผลให้เซลเหล่านั้นเกิดการรวมตัวเนื่องจากมีส่วนที่เป็นประจุบวกและเกิดการดูดติดกันดังแสดงในรูปที่ 2.11 อย่างไรก็ตาม ปริมาณ ECP ที่มากเกินไปสามารถส่งผลต่อการเกิดเม็ดจุลชีพ เนื่องจากเกิดการผลักกันของประจุบวก

รูปที่ 2.11 บทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของแบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

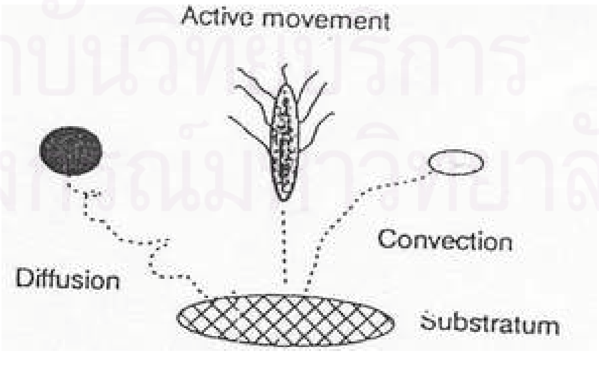
ปริมาณ ECP ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่เม็ดจุลชีพเจริญเติบโต พบว่าความเข้มข้น ECP ในช่วงอุณหภูมิ thermophilic มีค่าต่ำกว่าในช่วง mesophilic และยังขึ้นกับประเภทของน้ำเสียด้วย มีรายงานว่าส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งสกัดจากเม็ดจุลชีพมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมธาตุเหล็กและ yeast extract ลงไปในน้ำเสีย และเกิดผลตรงกันข้ามเมื่อไม่ได้ทำการเติมเหล็ก การเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะทำให้มีปริมาณ extracellular polysaccharide ซึ่งทำให้ความสามารถในการยึดเกาะของเซลเพิ่มขึ้น และยังมีรายงานว่าปริมาณของโปรตีนและ polysaccharide ใน ECP ที่ลดลง ถูกพบในระบบยูเอเอสบีที่เปลี่ยนแปลงจากการบำบัดน้ำเสียประเภทน้ำตาลมาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมอะซิเตท โพรพิโอเนท และบิวทิเรท และยังพบปริมาณไขมันที่สูงขึ้นในเม็ดจุลชีพอีกด้วย

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่า ECP เป็นผลผลิตที่เกิดจากแบคทีเรียจำเพาะกลุ่มหนึ่งหรือแบคทีเรียทุกชนิดในสลัดจ์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลผลิตซึ่งเป็น ECP โดยเฉพาะ polysaccharide เป็นผลผลิตเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic และ acetogenic น้อยมาก และแบคทีเรียกลุ่ม acidogenic เป็นกลุ่มที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อผลผลิต ECP ที่เกิดขึ้น

2.4.2 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดจุลชีพ (Granulation) (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนการเกิดเม็ดจุลชีพสามารถอธิบายได้โดยขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Transport การเคลื่อนไหวของเซลด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ไปจับตัวกับอนุภาคเฉื่อยหรือเซลแบคทีเรียอื่น กลายเป็นอนุภาคพื้นฐาน (substratum) ด้วยวิธีการต่าง ๆได้แก่ การแพร่กระจาย (Brownian motion) การพัดพา (convective) โดยของเหลว ก๊าซ การตกตะกอน หรือ การเคลื่อนไหวของเซลโดย flagella

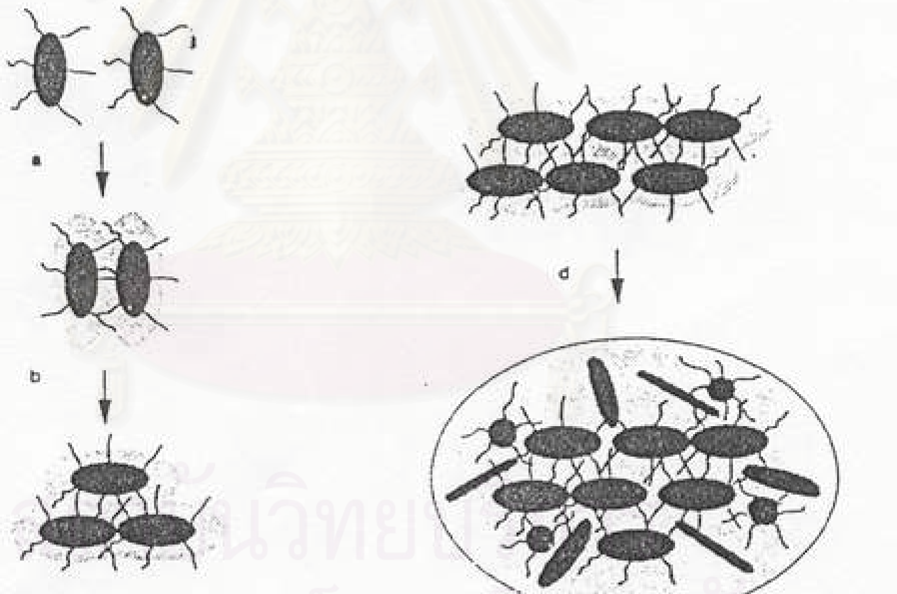


รูปที่ 2.12 กลไกการเคลื่อนไหวต่าง ๆที่มีผลต่อการรวมตัวของเซลแบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนที่ 2 Reversible adsorption การดูดติดของเซลแบคทีเรียกับ substratum ซึ่งอาจเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรืออนุภาคของแข็งเฉื่อย โดยแรงทางฟิสิกส์ – เคมี ซึ่งสามารถเกิดการแยกตัวหรือหลุดออกไปได้อีกครั้ง การดูดยึดเป็นผลมาจากแรงทางประจุไฟฟ้า (ionic strength)

ขั้นตอนที่ 3 Irreversible adhesion ด้วยพันธะแข็งแรงของโพลิเมอร์ (ECP) การเกาะยึดของเซลเข้ากับ substratum ซึ่งเซลมีโอกาสที่จะหลุดออกจากเม็ดจุลชีพได้ยากมาก ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ECP ถูกผลิตขึ้นมาก่อนหรือหลังการเกาะยึดของเซล (adhesion)

ขั้นตอนที่ 4 Multiplication หรือการแบ่งเซลของแบคทีเรียที่อยู่ในชั้น ECP โดยเซลที่แบ่งตัวใหม่ยังคงถูกกักอยู่ในชั้น ECP และเกิดการเพิ่มขนาดของเม็ดจุลชีพ และนอกจากนี้ยังเกิดจากการดักเซลใหม่ที่อยู่ในน้ำเสียเข้ามาจับตัวในเม็ดจุลชีพ



(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.

รูปที่ 2.13 กลไกของการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลโดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดจุลชีพ (Schmidt และ Ahring, 1995)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.3 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Holshoff และคณะ (1993) (อ้างถึงใน ณรงค์ศักดิ์, 2539) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกตจากพฤติกรรมตะกอนจุลินทรีย์ และได้กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.วัน)

เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อได้ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ขั้นตะกอนด้านล่างจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นตะกอน และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ รวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (filamentous organisms) ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

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

ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยเนื่องมาจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้มีปริมาณก๊าซมากขึ้น ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากยังคงอยู่ในระบบและรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มม. ซึ่งถือได้ว่าเป็นการคัดเลือกพันธุ์ของระบบ

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

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีมากกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อระบบผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้ว ระบบจะสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาอาจรับได้ถึง 50 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.วัน

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ ยูเอเอสบี

2.5.1 อุณหภูมิ (Temperature)

ระบบยูเอเอสบี สามารถทำงานในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 2 ช่วง คือ

- ช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) ในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส
- ช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) ในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 20 - 45 องศาเซลเซียส

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) จะมีอัตราการย่อยสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) แต่มักจะให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) มากกว่าในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมากกว่า ดังนั้น การรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 องศาเซลเซียสจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก

2.5.2 พีเอช

แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogens) มีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด โดยที่ขั้นตอนนี้จะเกิดได้ดีที่ช่วงพีเอช 6.5 - 8.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (Acidogens) ยังสามารถทำงานได้ดีที่พีเอช 6.0 –6.5 นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน โดยที่ค่าพีเอชดังกล่าวจะส่งผลต่อรูปอิออนของสารต่าง ๆ เช่น volatile fatty acid NH_3 และ H_2S ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน

2.5.3 ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีควรจะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในรูปของกรดอะซิติกประมาณ 200 - 400 มก./ล. อัตราการการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกรด โดยที่ระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่า 1, 000 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์การเพิ่มอย่างรวดเร็วจะแสดงถึงการเสียสมดุลย์กับระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชะลอตัวของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ชนิดของกรดอินทรีย์ก็ถือว่ามีความสำคัญ เช่นกรดโพรพิโอนิกสูงกว่า 1,000 มก./ล. จะทำให้เกิดปัญหาทั้งความเป็นพิษของกรดชนิดนี้และระดับพีเอชที่ต่ำลง

2.5.4 ระดับสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต

สภาพด่างบอกให้ทราบถึงกำลังบัพเฟอร์ (buffer capacity) ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ถ้ากำลังบัพเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงได้อย่างรวดเร็วและมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทน ระดับสภาพด่างที่จะทำให้มีกำลังบัพเฟอร์ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียที่มีความเข้นข้นสูงก็มีโอกาสที่จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ดังนั้นกำลังบัพเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่ม

ขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศควรมีสภาพด่างประมาณ 1,500 – 2,000 มก./ล. และนอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญคือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหย ในรูปกรดอะซิติกต่อระดับของสภาพด่างไบคาร์บอเนต (มก./ล.ของ $CaCO_3$) ระบบมีกำลังบัพเฟอร์สูงเมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าพีเอชของระบบกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.5.5 โออาร์พี (ORP)

โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) โดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะวัดค่าโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรตและวัดค่าโออาร์พีมีค่าลบในน้ำเสียที่ไร้ออกซิเจน โออาร์พีจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดค่าโออาร์พีมีค่าบวกมากๆ แสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี สำหรับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีและมีค่าโออาร์พีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300 - 500 มิลลิโวลท์

2.5.6 ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย (Substrate)

สารอาหารในน้ำเสีย เกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิดกันมีอัตราการย่อยสลายที่ช้าเร็วต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

2.5.7 สารอาหารที่จำเป็น (Nutrients)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนข้อดีประการหนึ่งคือ มีเซลจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริมเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD : N : P = 100 : 1.1 : 0.2 หรือ COD : N : P = 350 : 5 : 1 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD ต่อ N ยังมีผลต่อลักษณะเม็ดอีกด้วย โดยทำให้เม็ดมีลักษณะเป็นปุยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวสูงถึง 100 : 10

แบคทีเรียผลิตมีเทนยังต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ (trace element) มิฉะนั้นระบบอาจไม่ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้เช่น เหล็ก โคบอลท์ นิเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นการลำบากเนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่าง ๆ ตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยการเติม Yeast Extract

2.5.8 สารพิษ (Toxic)

น้ำเสียที่จะนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศจะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ถ้าหากสารเหล่านี้มีปริมาณน้อยก็จะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ ได้แก่

- พิษของกรดไขมันระเหย

กรดไขมันระเหยในปริมาณสูงในระบบจะส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชซึ่งลดค่าลงอยู่ในช่วงที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

- พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ คือโปรตีนหรือยูเรีย โดยทั้งนี้ไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังสมการที่ 3.

$$NH_4^+ \;\text{---->}\; NH_3 + H^+$$

ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา โดยที่ NH_3 จะยับยั้งการทำงานและเป็นพิษมากกว่า NH_3^+

- พิษของซัลไฟด์

พิษของซัลไฟด์เกิดขึ้นได้เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณซัลไฟด์มากหรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือเกิดการย่อยโปรตีนซัลไฟด์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยทั้งนี้สารประกอบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำ ขึ้นกับอิออนบวกที่รวมอยู่ โดยถ้ารวมตัวกับโลหะหนักก็จะอยู่ในรูปของตะกอน ส่วนที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ที่ไม่ใช่ออกซิเจนสามารถทนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีความเข้มข้นถึง 50 ถึง 100 มก./ล. แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษ การลดพิษซัลไฟด์ทำได้โดยการตกตะกอนซัลไฟด์หรือการแยกซัลไฟด์ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

- พิษของอิออนและโลหะหนัก

อิออนหรือโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงเกินปริมาณหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อระบบได้ อิออนที่สำคัญได้แก่ Na^{+} K^{+} Mg^{2+} Ca^{2+} และ S^{2-} อิออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ นอกจากนี้อิออนบวกที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อจุลชีพน้อยกว่าอิออนที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 2 ถึง 10 เท่า

ส่วนพิษของโลหะหนักได้แก่ แมงกานีส แคดเมียม สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของอิออน พิษของโลหะหนักจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่มีอยู่ในน้ำเสียเพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะหนัก อย่างไรก็ตามอิออนต่าง ๆ นี้บางชนิดจำเป็นต้องมีในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อเป็นสารอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

- พิษของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของจุลชีพแบบไร้ออกซิเจน สารพวกนี้ได้แก่ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่น เมทานอล ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้ สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้จุลชีพคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มก./ล. ก็ตาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 **ระบบอีจีเอสบี** (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB)

ระบบยูเอเอสบีทั่วไปถูกออกแบบมาสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของน้ำเสียในระดับกลางถึงระดับสูง แต่ไม่นานมานี้ได้มีความพยายามที่จะใช้ระบบยูเอเอสบีสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น น้ำเสียจากโรงงานที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1,000 มก./ล. และน้ำเสียชุมชน แต่อย่างไรก็ตามก็ได้พบปัญหาจากการใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ

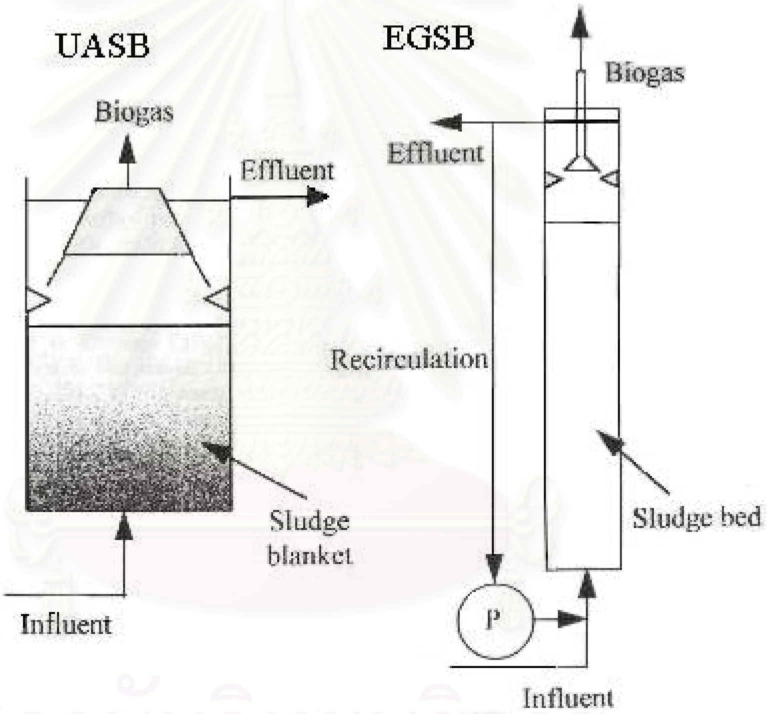
ปัญหาที่เกิดขั้นกับระบบยูเอเอสบี เนื่องมาจากสาเหตุหลัก 2 ประการ (Kato และคณะ, 1994) ได้แก่

1) <u>ลักษณะของน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นที่ต่ำมาก</u> ค่าความเข้มข้นของซีโอดีที่ต่ำมากของน้ำเสียที่เข้าระบบ ทำให้ระดับความเข้มข้นของสารอาหาร (substrate) ในถังปฏิกรณ์มีค่าต่ำมาก และเมื่อพิจารณาจากสมการของโมโนด์ จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกลุ่มจุลชีพที่เกิดขั้นในขณะนั้นมีค่าต่ำกว่าในช่วงที่เหมาะสมมาก ได้มีการรายงานค่า Ks (half velocity constant) ของ acetolastic methanogenesis ในกลุ่มเม็ดจุลินทรีย์ว่ามีค่าอยู่ในช่วง 30 – 200 มก.ซีโอดีต่อลิตร

ค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ต่ำมากจะส่งผลต่อปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตซึ่งมีปริมาณต่ำมาก และยังมีผลต่อการกวนผสมในชั้นสลัดจ์ที่ไม่เพียงพอ และการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและจุลชีพที่ไม่ทั่วถึง ดังนั้นปฏิกิริยาของระบบจะดำเนินไปในสภาวะที่ต่ำกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดความสามารถของระบบจึงไม่ใช่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์(organic loading)เหมือนในกรณีของระบบแบบไร้อากาศที่บำบัดน้ำเสียความเข้มข้นระดับปานกลางถึงสูงอีกต่อไป แต่เป็นค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (hydraulic load) สูงสุดที่ระบบยังสามารถดำเนินไปได้โดยไม่เกิดการล้างออก (wash out) ของเม็ดจุลินทรีย์เนื่องจากการขยายตัวของชั้นสลัดจ์

2) <u>ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย</u> ทั้งนี้พบว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำมักจะมีค่าออกซิเจนละลายในปริมาณหนึ่ง และอาจจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนซึ่งเป็นกลุ่ม strictly anaerobes

ระบบยูเอเอสบีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา คือ ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed) ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการสัมผัสกันของน้ำเสีย (substrate) และจุลชีพด้วยการทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์และการกวนผสมที่ทั่วถึง โดยระบบนี้มีปัจจัยที่สำคัญคือความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์สูงกว่าระบบยูเอเอสบีทั่วไป ทั้งนี้ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์สามารถเพิ่มได้โดยการติดตั้งระบบเวียนกลับน้ำทิ้ง (recirculation) ถังปฏิกรณ์ของระบบอีจีเอสบีมีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างค่อนข้างมาก ระบบการเวียนกลับส่งผลให้ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงถึง 5 - 6 ม./ ชม. ในขณะที่ระบบยูเอเอสบี ทั่วไปมีค่าความเร็วการไหลอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 ม./ ชม. หรือต่ำกว่า (Kato และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.14 แผนผังส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบีและอีจีเอสบี โดย P คือ เครื่องสูบเวียนกลับ (Seghezzo และคณะ, 1998)

ระบบอีจีเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบชั้นของเม็ดสลัดจ์ (granules) คล้ายกับระบบยูเอเอสบีแต่แตกต่างกันที่ระบบนี้มีการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ทั้งชั้นหรือขยายตัวบางส่วน และความคงตัวของระบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกตะกอนและความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดสลัดจ์ (granules) ในขณะที่ความเร็วการไหลเป็นปัจจัยที่ควบคุมเพื่อให้มีการผสมที่ดี

ระหว่างน้ำเสียกับจุลชีพ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยนี้อาจส่งผลต่อการล้างออก (wash out) ของสลัดจ์ด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้เกิดความสมดุลระหว่างการกวนผสมที่เพียงพอและการรักษาปริมาณสลัดจ์ในระบบ ปัจจุบันข้อมูลการศึกษาระบบอีจีเอสบีสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำยังมีอยู่น้อยมาก (Kato และคณะ, 1994)

คุณสมบัติของระบบอีจีเอสบี (Seghezzo และคณะ, 1998)

---

1. ค่าความเร็วการไหลสูงอยู่ในช่วงประมาณ 4 – 10 ม./ซม. และภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ ยูเอเอสบี โดยสูงถึง 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

2. ชั้นของสลัดจ์มีการขยายตัว

3. มีความเหมาะสมในการการบำบัดน้ำเสียที่เจือจางหรือมีความเข้มข้นต่ำ

4. สลัดจ์มีลักษณะเป็นเม็ด (granules) อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี

5. ลักษณะการกวนผสมต่างจากระบบยูเอเอสบี กล่าวคือ เนื่องจากค่าความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์ (Vup) สูง และปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างน้ำเสียและชั้นสลัดจ์

6. ความดันของสลัดจ์บริเวณชั้นล่างมีค่าสูงในกรณีที่ถังปฏิกรณ์สูงมาก แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบและการเจริญเติบโตของจุลชีพ

7. สลัดจ์ชนิดฟลอค (flocculent sludge) จะถูกล้างออก (wash out) จากระบบ

8. ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ค่อนข้างต่ำ

ถังปฏิกรณ์ในระบบอีจีเอสบีมีคุณสมบัติในการรับภาระบรรทุกที่สูงใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดส์โดยที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางของแข็ง (media) (Zoutberg และ Frankin, 1996) ระบบอีจีเอสบีมีคุณสมบัติในการถ่ายเทมวลสาร (mass tranfer) ที่ดีกว่าระบบยูเอเอสบี (Kato และคณะ, 1994) และเหมาะที่จะใช้ในกรณีที่มีอัตราการเกิดก๊าซที่ต่ำและการผสมที่ไม่เพียงพอ เช่นในกรณีของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ (Psychrophiles) ระบบ อีจีเอสบีสามารถที่จะใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษที่ความเข้มข้นสูง ๆ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ (Zoutberg และ Frankin, 1996) สามารถบำบัดน้ำเสียประเภท long chain fatty acid ที่ภาระ

บรรทุกข์สารอินทรีย์สูงถึง 30 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี 85 - 95 เปอร์เซ็นต์ (Rinzema และคณะ, 1993) และเหมาะสมที่จะใช้บำบัดที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ๆ ด้วย (Seghezzo และคณะ, 1998) นอกจากนี้การดำเนินระบบอีจีเอสบีสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของชั้นสลัดจ์ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับการทดลองระบบยูเอเอสบีในห้องปฏิบัติการที่มีอัตราการเกิดก๊าซสูง (Kato และคณะ, 1994)

Kato และคณะ (1994) กล่าวว่าระบบอีจีเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำเนื่องจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพที่ต่ำในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังจะพบได้จากรายงานการวิจัยระบบยูเอเอสบีทั่วไปที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งไม่สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ค่าซีโอดีในน้ำเสียซึ่งมีค่าต่ำจะส่งผลต่อระดับของ substrate ที่ต่ำลงเรื่อย ๆตามขั้นความลึกในเม็ดจุลชีพ ทำให้เม็ดจุลชีพนั้นมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือย่อยสลาย substrate ที่ต่ำ สมการของโมโนด์ได้แสดงว่าอัตราการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอาหาร (substrate) อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับค่า Ks ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคุณลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียต่อสารอาหารนั้น ๆ Kato ได้ แบ่งค่า Ks ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. **Intrinsic Ks** เป็นค่า Ks ที่แท้จริงซึ่งแสดงถึงการถ่ายเทของมวลสาร (substrate) เข้าไปยังเซลล์ของแบคทีเรียที่มีลักษณะการเจริญเติบโตในน้ำเสียแบบกระจาย(dispersed bacterial cells) ในสภาพที่เซลล์แบคทีเรียมีการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์

2. **Apparent Ks** เป็นค่า Ks ปรากฏที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทของมวลสารผ่าน biofilm ที่ห่อหุ้มอยู่รอบนอกของกลุ่มเซลล์แบคทีเรียหรือเม็ดจุลชีพ (granules)

Apparent Ks จะมีค่าสูงกว่า Intrinsic Ks เนื่องจากพบว่ามีข้อจำกัดหรืออุปสรรคในการถ่ายเทมวลสารผ่าน biofilm ของเม็ดจุลชีพมากกว่าใน dispersed bacterial cells ดังนั้นจะพบว่ามีความเข้มข้นของสารอาหารที่ต่ำลงเรื่อย ๆ ตามความลึกในเม็ดจุลชีพ และไม่มีอาหารที่เพียงพอต่อจุลชีพที่อยู่ในชั้นในของเม็ดจุลชีพ และแบคทีเรียที่อยู่ชั้นลึก ๆ ซึ่งขาดอาหารจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นโพรงว่างบริเวณแกนกลางของเม็ดจุลชีพ ส่งผลให้เกิดการ wash out ของเม็ดจุลชีพจากการที่มีก๊าซสะสมตัวอยู่ภายในและนอกจากนี้โครงสร้างเม็ดจุลชีพที่จับตัวกันหลวมๆ ยังสามารถเกิดการแตกสลายเนื่องจากความปั่นป่วนทางชลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ได้

การที่จะทำให้มีสารอาหารที่เพียงพอต่อจุลชีพ จำเป็นที่จะต้องเกิดอัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้น biofilm ได้เร็วกว่าอัตราการย่อยสลายอาหารโดยจุลชีพในเม็ดจุลชีพ ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ จำเป็นที่จะต้องมีการกวนผสมที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหลในชั้นสลัดจ์และส่งผลให้ค่า Apparent Ks มีค่าต่ำลง ความปั่นป่วนดังกล่าวในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงเกิดขึ้นได้โดยปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตในขณะที่ระบบอีจีเอสบี ทำได้โดยการปรับอัตราการสูบเวียนกลับเพื่อเพิ่มความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์

Dolfing (1985) กล่าวว่าในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ กลุ่มจุลชีพจะต้องถูกรักษาไว้ในถังปฏิกรณ์เป็นระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลให้กลุ่มจุลชีพรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดชั้น biolayer ที่หนาแน่น ซึ่งชั้น biolayer เหล่านี้จะเป็นตัวที่ทำให้สารอาหารไม่สามารถกระจายเข้าไปยังชั้นลึก ๆได้ เนื่องจากเกิดการต้านทานการถ่ายเทมวลสาร (mass tranfer resistance) ปรากฏการณ์นี้จะมีผลกระทบที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมในถังปฏิกรณ์ ค่า gradient ของความเข้มข้นใน biolayer อธิบายโดยใช้สมการของ Fick (Fick’s first law)

$$F = -\phi D\, dC/dx$$

F คือ flux ของมวลสาร หรือ substrate

ϕ คือ ความพรุนของ biolayer

D คือ diffusion coefficient

dC/dx คือ gradient ของ subsrate ใน biolayer

สมการนี้ได้อธิบายว่า flux ของสารอาหารที่ผ่าน biolayer ขึ้นอยู่กับ gradient ของความเข้มข้นและยังขึ้นกับปฏิกิริยาจำเพาะกับขนาดรูปร่างของ biolayer ดังนั้นแบคทีเรียที่อยู่ในชั้นในจะได้รับ substrate ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าที่ผิวเม็ดจุลชีพ ส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารอาหารซึ่งอธิบายโดยสมการโมโนด์ว่า ความเร็วของการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับความเข้มข้นของสารอาหารมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเข้มข้นของสารอาหารมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าค่า Ks เพราะฉะนั้น mass transfer resistance จึงเป็นปัจจัยสำคัญในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารอาหารมีค่าใกล้เคียง Ks หรือ ต่ำกว่า หรือเมื่อ gradient ของความเข้มข้นสารอาหารใน biolayer อยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นนี้ และได้สรุปว่า mass tranfer resistance ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1) ความเข้มข้นของสารอาหาร
2) ค่า Ks ของแบคทีเรียสำหรับประเภทของ substrate นั้น
3) ความหนาของ biolayer พบว่า mass tranfer resistance จะไม่มีผลต่อ biofilm ที่มีค่าต่ำกว่า 1 มม.
4) ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดใน biolayer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 การศึกษาที่ผ่านมา

2.7.1 การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและน้ำเสียชุมชนด้วยระบบยูเอเอสบี

2.7.1.1 ช่วงอุณหภูมิต่ำ

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ได้มีการทดลองที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ตั้งแต่ปี 1976

Lettinga และคณะ (1983) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบยูเอเอสบี ในเนเธอร์แลนด์ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ปริมาตร 120 ลิตร โดยใช้ granular sludge จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลเป็นหัวเชื้อ เวลากักน้ำเสีย 12 ชม. ระยะเวลาในการทดลอง 17 เดือน ในช่วงอุณหภูมิ 18 - 20 องศาเซลเซียส น้ำเสียชุมชนมีค่าซีโอดี 248 - 581 มก./ล. พบว่าประสิทธิภาพในการลดซีโอดีมีค่า 72 เปอร์เซ็นต์ และลดบีโอดีได้ 62 เปอร์เซ็นต์

ต่อมาได้ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ยูเอเอสบีขนาด 120 ลิตร เช่นเดิมและเวลาเก็บกักเท่ากับ 32 - 40 ชม. แต่ได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 12 -18 องศาเซลเซียส ซีโอดีน้ำเสียชุมชนอยู่ในช่วง 420 - 920 มก./ล. และใช้หัวเชื้อเป็น digested sewage sludge มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 48 - 70 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าบีโอดีได้ 30 - 45 เปอร์เซ็นต์ ช่วงเวลาในการดำเนินระบบ 3 เดือน และได้ทำการใช้สลัดจ์ชนิดเดียวกันบำบัดน้ำเสียชุมชนในถัง ยูเอเอสบี ขนาด 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ซีโอดีน้ำเสียชุมชน 520 - 590 มก./ล. ใช้เวลาเก็บกัก 9 ชม ทดลองเป็นเวลา 1 เดือน สามารถลดซีโอดีได้ 57 - 79 เปอร์เซ็นต์ และลดบีโอดีได้ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์

Fernandes และคณะ (1985) ศึกษาระบบยูเอเอสบี ขนาด 12.4 ลิตร ที่บำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีเท่ากับ 50 - 80 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลากัก 3 -12 ชม. โดยการคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส

de Man และคณะ (1986) อ้างถึงใน Seghezzo และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนในถังยูเอเอสบี หลายขนาดได้แก่ 0.120 0.240 6 และ 20 ลบ.ม. และได้ทำการสรุปว่าระบบยูเอเอสบี ซึ่งบำบัดน้ำเสียซึ่งมีค่าซีโอดี 500 - 700 มก./ล. ดำเนินระบบในช่วงอุณหภูมิ 12 -18 องศาเซลเซียส เวลาเก็บกัก 7-12 ชม. มีประสิทธิภาพในการ

บำบัดซีโอดี และบีโอดีได้ 40 - 60 เปอร์เซ็นต์ และ 50 - 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาในการทดลอง 12 เดือน

Ruiz และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งทำการบำบัดน้ำเสียจากเมืองคอรุนญ่า ประเทศสเปน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 2 ชุด ขนาดชุดละ 2 ลิตร น้ำเสียมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 693 มก./ล. โดยชุดที่ 2 ทำการติดตั้ง sludge digester ซึ่งรับสลัดจ์มาจากวาล์วระบายชั้นสลัดจ์ของถังปฏิกรณ์ และทำหน้าที่ย่อยสลายของแข็งที่สะสมในสลัดจ์ ก่อนที่จะเวียนกลับเข้าไปในระบบยูเอเอสบีอีกครั้ง ถังชุดแรกเมื่อทำการเดินระบบที่เวลาเก็บกัก 24 ชม. พบว่า ประสิทธิภาพในการลดซีโอดีและของแข็งแขวนลอย มีค่าสูงกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการลดเวลากักเป็น 5 ชม. พบว่าประสิทธิภาพในการลดซีโอดีและของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 53 เปอร์เซ็นต์ และ 63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

2.7.1.2 ช่วงอุณหภูมิสูง

Barbosa และ Sant´ Anna (1989) อ้างถึงใน สมพงษ์ (2536) ได้รายงานการศึกษาการทำงานของระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นระยะเวลา 9 เดือน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 120 ลิตร บำบัดน้ำเสียชุมชนที่มี่ความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 627 มก./ล. และบีโอดีเฉลี่ย 357 มก./ล. ในช่วงอุณหภูมิ 19 -28 องศาเซลเซียส โดยการเริ่มต้นระบบโดยไม่ใช้หัวเชื้อและระบบใช้เวลากักเท่ากับ 4 ชม.ตลอดการทดลอง หลังจากที่ทำการเดินระบบไปประมาณ 1 เดือนเริ่มสังเกตเห็นกลุ่มแบคทีเรียที่จับตัวกันเป็นเม็ดกลม (granules) โดยเฉพาะในช่วงท้ายของการทดลองพบว่ามีขนาดถึง 8 มม. หลังจากที่ได้เริ่มต้น (start up)ระบบในเดือนที่ 5 ระบบมีประสิทธิภาพในการลดซีโอดีและบีโอดีเท่ากับ 74 เปอร์เซ็นต์ และ 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Lalit Kumar Agrawal (1991) ได้ทำการทดลองระบบยูเอเอสบี ขนาดถังปฏิกรณ์ 140 ลิตร สูง 4 เมตร โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 500 มก./ล. ใช้เวลากัก 8 - 24 ชม. พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.56 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน อัตราการผลิตก๊าซ 128 ลิตร / กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ระยะเวลาในการทดลอง 6 เดือน

สมพงษ์ (2536) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ระบบยูเอเอสบี แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 24.4 ลิตร สูง 3 ม. บำบัดน้ำเสียชุมชนจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่เพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาเก็บกักน้ำจาก 4.5 - 24 ชม. ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.22 - 1.59 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน และความเร็วไหลขึ้นระหว่าง 0.13 - 0.69 ม./ชม. โดยใช้ตะกอนหัวเชื้อจากบ่อเกรอะในการเริ่มต้นระบบในปริมาณ 6.1 กก./ลบ.ม. ระบบได้ใช้เวลาในการปรับสภาพจนถึงสภาวะคงที่หลังจากระบบเริ่มต้นเป็นเวลา 3 เดือน ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย ได้ 76.4 - 88.1 76.9 - 92.9 และ 59.7 - 84.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าที่เวลากักน้ำ 12 - 24 ชม. ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และสามารถทำให้ค่าบีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าต่ำกว่า 20 และ 30 มก./ล. ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกักน้ำต่ำกว่า 9 ชม. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจะลดลงเมื่อเวลากักน้ำสั้นลง ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบมีค่าระหว่าง 25.6 - 101.3 ล./ กก. ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบ โดยมีส่วนประกอบมีเทน 52 - 68.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชั้นตะกอนพบว่ามีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ เฉลี่ย 19 กก./ลบ.ม. โดยมีความสูงชั้นตะกอน 0.55 - 0.70 ม.

Chernicharo และ Machado (1998) ได้ทำการศึกษาระบบซึ่งประกอบไปด้วยระบบยูเอเอสบีและติดตั้งตามด้วยระบบ ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF) 2 ชุดซึ่งต่อขนานกัน และต่างรับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบยูเอเอสบี โดยถังกรองไร้อากาศ ชุดที่ 1 จะมีรูปแบบการไหลย้อนขึ้น (upflow) และชุดที่ 2 เป็นการไหลลง (downflow) ระบบยูเอเอสบีมีขนาด 416 ลิตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. สูง 4.5 ม. เวลากักอยู่ในช่วง 4-6 ชม. ความเร็วการไหลขึ้นเท่ากับ 0.99 - 1.49 ม./ชม. ระบบทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งรับน้ำเสียมาจากระบบรวบรวมน้ำเสียของเมืองเบโล เฮอริซอนเต ประเทศบราซิล น้ำเสียมีค่าซีโอดีรวม 640 มก./ล. ซีโอดีละลาย 239 มก./ล. และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 202 มก./ล. จากผลการศึกษาเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าระบบ ยูเอเอสบี/ถังกรองไร้อากาศ มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีและบีโอดีอยู่ในช่วง 85 - 95 เปอร์เซ็นต์ และมีซีโอดีในน้ำทิ้งเท่ากับ 60 - 90 มก./ล. บีโอดีต่ำกว่า 40 มก./ล. และของแข็งแขวนลอยมีค่าต่ำกว่า 25 มก./ล. โดยระบบยูเอเอสบีมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ตลอดการทดลอง และของแข็งแขวนลอยที่ออกจากยูเอเอสบีมีค่าระหว่าง 16 - 36 มก./ล.

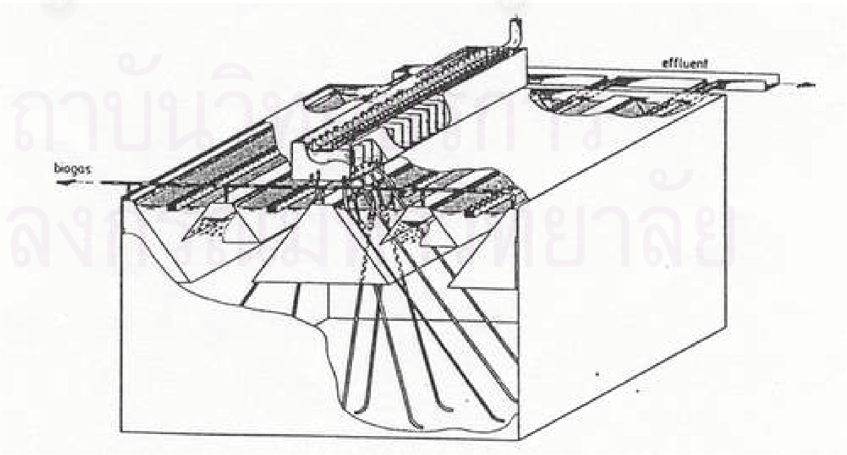
Krispa Shankar Singh (1992) ได้ทำการศึกษาต่อจาก Lalit Kumar Agrawal โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 500 มก./ล. ใช้เวลากัก 3 - 6 ชม. พบว่ามีประสิทธิภาพในการ

กำจัดซีโอดี 92 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลากัก 3 ชม. ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน อัตราการผลิตก๊าซ 141 ลิตร / กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ระยะเวลาในการทดลอง 6 เดือน

Gnanadipathy และ Polpasert (1993) อ้างถึงใน Seghezzo และคณะ (1998) ได้ทำการทดลองระบบยูเอเอสบี บำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยเลือกหัวเชื้อจากสลัดจ์หลายชนิดรวมทั้งการทดลองที่ไม่ใช้หัวเชื้อด้วย เวลากักเท่ากับ 3 -12 ชม. และดำเนินระบบเป็นเวลา 4 เดือน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดีเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ และสรุปว่าการเริ่มต้นระบบโดยไม่ใช้หัวเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสไม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีพอเหมือนกับระบบที่ใช้หัวเชื้อของสลัดจ์จากบ่อ facultative pond หรือ digested sludge

2.7.2 การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบยูเอเอสบีในระดับ Pilot และ fullscale plant

Louwe Kooijmans และ Van Velsen (1986) รายงานประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียที่เมืองคาลี ประเทศโคลัมเบีย ซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี ขนาด 64 ลบ.ม. ดำเนินระบบที่อุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส โดยใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อ น้ำเสียชุมชนเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 267 มก./ล. และเวลาเก็บกัก 6 - 8 ชม. ดำเนินระบบเป็นเวลา 9 เดือน โดยมีจุดกระจายน้ำเสียที่ทางเข้าระบบ 1 จุด ต่อ พื้นที่ 4 ตร.ม. พบว่าสามารถลดซีโอดีและบีโอดีได้ 75 - 82 เปอร์เซ็นต์ และ 75 - 93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการลดของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 70 - 80 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.15 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 64 ลบ.ม. ที่เมืองคาลี โคลัมเบีย (Louwe Kooijmans และ Van Velsen, 1986)

Draaijer และคณะ (1992) ได้รายงานการศึกษาเป็นระยะเวลา 12 เดือนในระบบยูเอเอสบีซึ่งใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นโครงการร่วมระหว่างอินเดียและเนเธอร์แลนด์ โดยได้ทำการออกแบบและก่อสร้างในปี 1985 ที่เมืองกานปูร์ ประเทศอินเดีย และได้เริ่มดำเนินระบบตั้งแต่เดือนเมษายนปี 1989 โรงบำบัดสามารถบำบัดน้ำเสีย 5,000 ลบ.ม.ต่อวัน โดยถังปฏิกรณ์มีขนาด 1,200 ลบ.ม. ทำการเริ่มระบบโดยไม่ใช้หัวเชื้อ ซีโอดีของน้ำเสียเท่ากับ 563 มก./ล. ระยะเวลาในการ start up ระบบ เท่ากับ 10 สัปดาห์ เวลากัก 6 ชม. ประสิทธิภาพในการลด ซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 74 75 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเพื่อให้ผ่านมาตราฐานน้ำทิ้งของอินเดีย (บีโอดี 30 มก./ล.) ได้ทำระบบ post treatment ขึ้น และพบว่าอุณหภูมิในช่วงฤดูหนาวไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพระบบ ยกเว้นแต่ปริมาณก๊าซที่ลดลงในช่วง 3 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส

Schellinkhout และ Collazos (1992) ได้ทำการทดลองในระดับ pilot scale เป็นระยะเวลา 4 ปี ของระบบยูเอเอสบีขนาด 35 ลบ.ม. ต่อขนานกัน 2 หน่วย และตามด้วย facultative pond ขนาดพื้นที่ 107 ตร.ม. โดยการกำหนดเวลาเก็บกัก 5 - 19 ชม. สามารถลดซีโอดีได้ 66 - 72 เปอร์เซ็นต์ ลดบีโอดี ได้ 79 - 80 เปอร์เซ็นต์ และลดของแข็งแขวนลอยได้ 69 - 70 เปอร์เซ็นต์

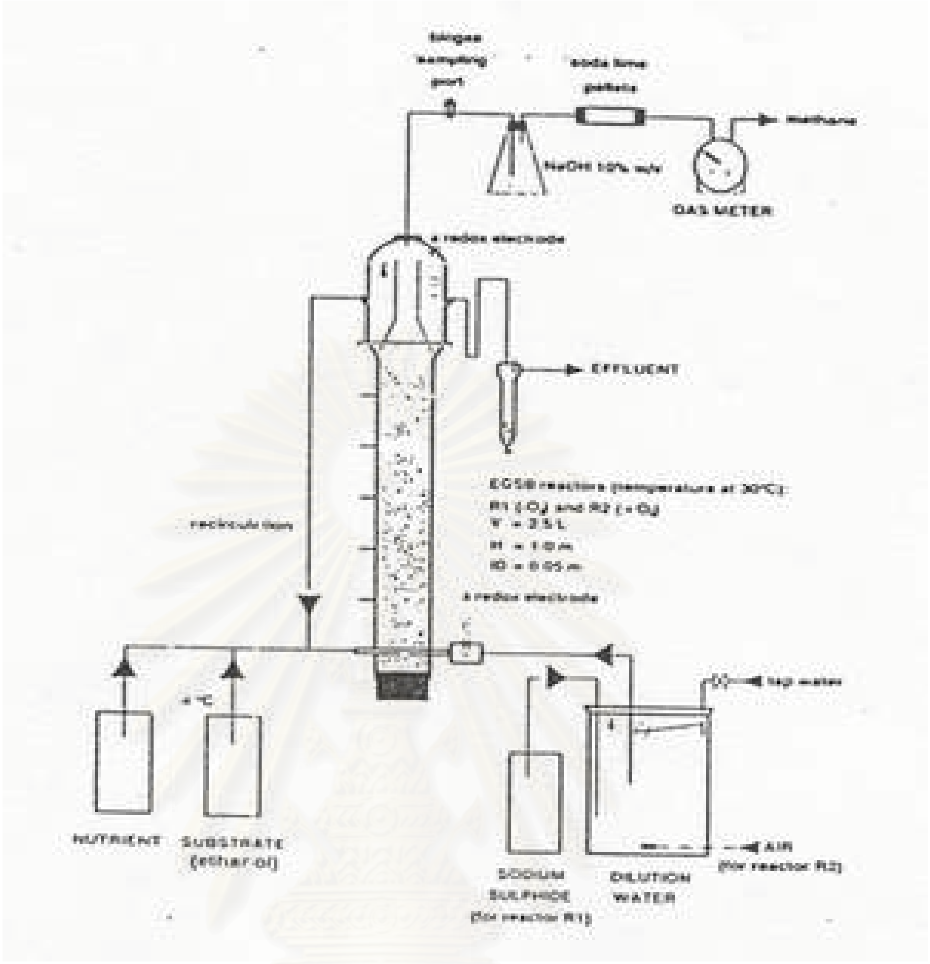
และได้นำข้อมูลจากงานทดลองนี้เป็นต้นแบบในการสร้างระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ บูคารามันกา โคลัมเบีย โดยเริ่มทำการเริ่มต้นระบบ (start up) เมื่อเดือนตุลาคม 1990 โดยระบบบำบัดนี้ถูกออกแบบมาสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนปริมาณ 31,000 ลบ.ม. ต่อวัน น้ำเสียมีค่าซีโอดี 360 มก./ล. ใช้ถังยูเอเอสบี 2 ถังขนาดถังละ 3,360 ลบ.ม. ขนานกันและตามด้วย facultative pond จากการศึกษา 3 ปี เวลาเก็บกัก 5 ชม. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี เท่ากับ 70 - 77 เปอร์เซ็นต์ โดยถังยูเอเอสบีมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 45 - 60 เปอร์เซ็นต์

Kiriyama และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพระบบยูเอเอสบีซึ่งบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยติดตั้ง membrane module เพื่อทำหน้าที่รักษาปริมาณสลัดจ์เพื่อช่วยให้เกิดไฮโดรไลซิส โดยน้ำเสียจะถูกทำปฏิกิริยาในส่วนนี้ก่อนที่จะไหลต่อไปยังถังยูเอเอสบี หัวเชื้อที่ใช้เป็น Digested sludge ทดลองกับน้ำเสียซีโอดีเฉลี่ย 300 มก./ล. อัตราการไหล 240 ลบ.ม./วัน ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.4 - 2.0 กก. ซีโอดี / ลบ.ม. -วัน ประสิทธิภาพในการลดซีโอดี 70 - 80 เปอร์เซ็นต์

Haskoning (1996) อ้างถึงใน Seghezzo และคณะ (1998) ได้รายงานการศึกษาโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองมีร์ซาปูร์ อินเดีย ซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี และมีระบบ pond ซึ่งมีเวลากัก 1 วันเป็น post treatment เป็นโครงการร่วมทางด้านวิศวกรรมวิ่งแวดล้อมและสุขาภิบาลของอินเดียและเนเธอร์แลนด์ภายใต้ Ganga Action plan ดำเนินการระบบตั้งแต่ เดือนเมษายน 1994 ระยะเวลาที่ทำการศึกษา 13 เดือน อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงในช่วง 18 องศาเซลเซียสในฤดูหนาว จนถึง 32 องศาเซลเซียสในฤดูร้อน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบยูเอเอสบีเท่ากับ 0.95 กก.ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน และใน polishing pond เท่ากับ 0.13 กก.ซีโอดี /ลบ.ม.-วัน โดยในบ่อนี้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยจนน้ำทิ้งผ่านมาตรฐานของ Ganga Action plan (บีโอดี 30 มก./ล.และแข็งแขวนลอย 50 มก./ล.) ระยะเวลากักในยูเอเอสบีเท่ากับ 8 ชม. ขนาดถัง ยูเอเอสบี 12,000 ลบ.ม. ค่าซีโอดีน้ำเสียเข้าเฉลี่ย 1,183 มก./ล. ประสิทธิภาพในการลดซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 81 86 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ประสิทธิภาพในยูเอเอสบีในการลดซีโอดี เท่ากับ 51 - 63 เปอร์เซ็นต์ และบีโอดีเท่ากับ 53 - 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.7.3 การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำและน้ำเสียชุมชนด้วยระบบอีจีเอสบี

Kato และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบีในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังอีจีเอสบี ขนาด 2.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยทดลองกับน้ำเสียซึ่งเป็นเอทานอลความเข้มข้นต่ำ 2 ค่า คือ ซีโอดีประมาณ 600 และ 200 มก./ล. ได้ทำการแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด โดยแต่ละชุดเป็นถังอีจีเอสบีขนาดเดียวกันและน้ำเสียประเภทเดียวกัน โดยการทดลองชุดที่ 2 ทำการเติมอากาศในถังน้ำเข้าเพื่อควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนประมาณ 3.8 มก./ล. ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของออกซิเจนที่มีต่อการทำงานของระบบ การทดลองชุดแรกได้เริ่มต้นดำเนินระบบที่ซีโอดีน้ำเข้าประมาณ 600 มก./ล. และทำการเปลี่ยนค่าเวลาเก็บกัก พบว่าประสิทธิภาพในการลดซีโอดีมีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.1 กก.ซีโอดี /ลบ.ม.-วัน เวลากัก 2 ชม. และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงซีโอดีน้ำเข้าเป็น 100 - 200 มก./ล. พบว่าประสิทธิภาพในการลดซีโอดีสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ สูงถึง 12 กก.ซีโอดี /ลบ.ม.-วัน เวลากัก 0.5 ชม. ส่วนในการทดลองชุดที่ 2 ให้ผลการลดค่าซีโอดีที่ใกล้เคียงกับชุดที่ 1 และสรุปว่าระบบอีจีเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดีต่ำกว่า 200 มก./ล. ได้ที่ช่วงเวลากักต่ำกว่า 2 ชม. และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเสียเล็กน้อย ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 2.16 แผนผังของระบบอีจีเอสบี ขนาด 2.5 ลิตร 2 ชุดซึ่งมีส่วนประกอบเหมือนกัน โดยที่ R1ไม่มีการเติมออกซิเจนในน้ำเสีย และ R2 ทำการเติมออกซิเจน (Kato และคณะ, 1994)

Rebac และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบีในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังอีจีเอสบี ขนาด 4.3 ลิตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถัง 5 ซม. ที่อุณหภูมิอากาศ 10 องศาเซลเซียส โรงใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานเบียร์ และใช้น้ำเสียเป็น กรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid) ที่เจือจางจนมีความเข้มข้นประมาณ 1,000 มก./ล. ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 12 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน และเวลากักน้อยกว่า 1 ชม. ระยะเวลาในการทดลอง 240 วัน หลังจากวันที่ 120 มีประสิทธิภาพในการลดซีโอดี 80 - 96 เปอร์เซ็นต์

Van der Last และ Lettinga (1992) รายงานการทดลองระบบอีจีเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 120 ลิตร ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานเยื่อกระดาษ ถังปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 ซม. สูง 4 ม. ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนจากหมู่บ้านในเมือง Bennekom ซึ่งมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 350 มก./ล. ในช่วงฤดูร้อน และ 250 มก./ล. ในช่วงฤดูฝน และทำการปรับอัตราการสูบน้ำเวียนกลับให้ความเร็วการไหลอยู่ในช่วง 5 - 7 ม./ชม. ในช่วงฤดูร้อนที่เวลาเก็บกัก 2 ชม. พบว่าสามารถลดซีโอดีละลายได้เฉลี่ย 45 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสูงสุดถึง 84 เปอร์เซ็นต์ และเฉลี่ย 27 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงฤดูฝน และสามารถลดซีโอดีรวมได้เฉลี่ย 29 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสูงสุด 69 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับระบบยูเอเอสบีและอีจีเอสบีที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน (Seghezzo และคณะ, 1998)

Application of upflow anaerobic reactors to sewage treatment. If not indicated otherwise experiments were conducted in UASB reactors

Place	Vol. (m^3)	Temp (°C)	Influent concentration (mg l⁻¹)			Inoculum	HRT (h)	Removal efficiencies in the reactor (%)			Start-up (months)	Period (months)	Reference
			COD	BOD (COD_{sol})	TSS			COD	BOD (COD_{sol})	TSS			
South Africa	0·008	20	500	(148)	NP	Active sludge	24	90	(49)	60–65	1	1	Pretorius, 1971
Netherlands	0·030	21	520–590	(73–75)	NP	Digested sewage sludge	9	57–79	(50–60)	30–70	NP	1	Lettinga *et al.*, 1983b
Netherlands	0·120	12–18	420–920	(55–95)	NP	Digested sewage sludge	32–40	48–70	(30–45)	90	NP	3	Lettinga *et al.*, 1983b
Netherlands	0·120	18–20	248–581	(163–376)	NP	Granular sludge	12	72	(62)	NP	NP	17	Lettinga *et al.*, 1983b
Netherlands	0·120	7–18	100–900	53–474	10–700*	Granular sludge	4–14	45–72	(38–59)	50–89	NP	12	de Man *et al.*, 1986
Netherlands	6	10–18	100–900	53–474	10–700*	Granular sludge	9–16	46–60	(42–48)	55–75	NP	12	de Man *et al.*, 1986
Netherlands	20	11–19	100–90	53–474	10–700*	Granular sludge	6·2–18	31–49	(23–46)	NP	NP	12	de Man *et al.*, 1986
			150–5500	43–157	50–400*								
Colombia	64	25	267	95	NP	Digested cow manure	6–8	75–82	75–93	70–80	6	9	Louwe Kooijmans & van Velsen, 1986; Lettinga *et al.*, 1987
Netherlands	0·120	12–20	190–1180	(80–300)	NP	Granular sludge	7–8	30–75	(20–60)	NP	NP	NP	de Man *et al.*, 1988
Netherlands	0·116	12–20	150–600	(70–250)	NP	Granular sludge	2–3	NP	(20–60)	NP	NP	NP	de Man *et al.*, 1988 (EGSB reactor)
Mexico	0·110	12–18	465	NP	154	Adapted aerobic sludge	12–18	65	NP	73	NP	> 12	Monroy *et al.*, 1988
Brazil	0·120	19–28	627	357	376	None	4	74	78	72	4	9	Barbosa & Sant'Anna, 1989
Italy	336	7–27	205–326	55–153	100–250	None	12–42	31–56	40–70†	55–80†	NP	12	Collivignarelli *et al.*, 1991; Maaskant *et al.*, 1991
India	1200	20–30	563	214	418	None	6	74	75	75	2·5	12	Draaijer *et al.*, 1992
Netherlands	120	> 13	391	(291)	-	Granular sludge	2–7	16–34	(20–51)	None	NP	35	van der Last & Lettinga, 1992
Netherlands	205	16–19	391	(291)	-	Self cultivated on sand	1·5–5·8	≧ 30	(≧ 40)	None	NP	33	van der Last & Lettinga, 1992 (EGSB reactor)
Colombia	35	NP	NP	NP	NP	NP	5–19	66–72	79–80	69–70	NP	48	Schellinkhout & Collazos, 1992
Netherlands	1·2	13·8	976	454	641 *	Digested sewage sludge	44·3	33	50	47·0*	NP	28	Bogte *et al.*, 1993 (UASB-septic-tank)
Netherlands	1·2	12·9	821	467	468 *	Digested sewage sludge	57·2	3·8	14·5	5·8*	NP	24	Bogte *et al.*, 1993 (UASB-septic-tank)
Netherlands	1·2	11·7	1716	640	1201 *	Granular sludge	202·5	60	50	77·1*	NP	13	Bogte *et al.*, 1993 (UASB-septic-tank)
Indonesia	0·86	NP	NP	NP	NP	NP	360	90–93	92–95	93–97	NP	60	Lettinga *et al.*, 1993 (UASB-septic-tank, black water)
Indonesia	0·86	NP	NP	NP	NP	NP	34	67–77	up to 82	74–81	NP	60	Lettinga *et al.*, 1993 (UASB-septic-tank, grey + black water)
Thailand	0·030	30	450–750	NP	NP	Different sludges	3–12	90	NP	NP	> 2	4	Gnanadipathy & Polprasert, 1993
Brazil	120	18–28	188–459	104–255	67–236	Granular sludge	5–15	60	70	70	> 2	24	Vieira & Garcia, 1992
Colombia	3360	24	380	160	240	None	5·0	45–60	64–78	≧ 60	> 6	> 36	Schellinkhout & Osorio, 1994
Brazil	67·5	16–23*	402	515	379	Digested sludge	7·0	74	80	87	NP	14	Vieira *et al.*, 1994
Netherlands	0·200	15.8	650	346	217	Digested sludge	3·0	37–38	26·6	83	None	5	Wang, 1994 (HUSB reactor)
Netherlands	0·120	15·8	397	254	33	Granular sludge	2·0	27–48	(32–58)	NP	None	3	Wang, 1994 (EGSB reactor)
Puerto Rico	0·059	≃20	782	352	393	Digested sludge	6–24	57·8	NP	76·9	≧ 4	16	Tang *et al.*, 1995
India	12000	18–32	1183	454	1000	NP	8	51–63	53–69	46–64	5	13	Haskoning, 1996a; Tare *et al.*, 1997
India	6000	18–32	404	205	362	NP	8	62–72	65–71	70–78	5	11	Haskoning, 1996b; Tare *et al.*, 1997
Brazil	477	NP	600	NP	303	Non adapted sludge	13	68	NP	76	2	> 7	Chernicharo & Borges, 1997

NP: not provided; $_{sol}$: soluble; ": air temperature; *: expressed as COD; †: obtained at temperatures of 15–20°C, HRT of 12 h and V_{up} of 0·58 m h⁻¹.

บทที่ 3
แผนการทดลองและวิจัย

การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาค่าเวลากัก (HRT) และ ความเร็วการไหลขึ้น (Upflow Loading Velocity, ULV) ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงค่าเวลากัก ต่อประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชมชนจากอาคารสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการ

ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา ได้แก่

- เวลากักซึ่งมี 2 ค่า ดังนี้ คือ 2 และ 6 ชั่วโมง โดยกำหนดความเร็วไหลขึ้นคงที่เท่ากับ 0.5 เมตร/ชม.
- ความเร็วการไหลขึ้นของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ ในการทดลองที่ทำการศึกษาผลของความเร็วการไหลขึ้น กำหนดเวลากักคงที่เท่ากับ 2 ชม. แล้วเปลี่ยนแปลงความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 3.5 6.5 10.0 และ 12.0 เมตร/ชม. โดยการปรับอัตราการสูบของเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ แผนการดำเนินการดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ

การทดลองที่	ถังปฏิกรณ์ที่	เวลากัก (ชั่วโมง)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)	อัตราการสูบน้ำเสีย (ลิตร/วัน)	อัตราการสูบน้ำเวียนกลับ (ลิตร/วัน)
1	1	6.0	0.64	0.5	8.0	16
2	2	2.0	1.92	0.5	24.0	0
3	1	2.0	1.92	3.5	24.0	144
4	2	2.0	1.92	6.5	24.0	288
5	2	2.0	1.92	10.0	24.0	456
6	1	2.0	1.92	12.0	24.0	552

3.2 การเตรียมน้ำเสีย

3.2.1 ส่วนประกอบน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ใช้น้ำเสียชุมชนในถังพักน้ำเสียจากอาคารเรียน 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งรับน้ำเสียรวมจากห้องน้ำในอาคาร และทำการเตรียมน้ำเสียใส่ในถังพักน้ำเสียของระบบทุกวันเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเสียเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากการถูกแบคทีเรียในถังย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแต่ละครั้งลักษณะสมบัติน้ำเสียทั้งทางเคมีและชีวภาพไม่แตกต่างกันมากนัก สามารถสรุปช่วงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนจากอาคารเรียนที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ช่วงค่า
ซีโอดี	120 - 160 มก. / ลิตร
บีโอดี	60 - 80 มก. / ลิตร
พีเอช	7.6 - 8.4
สภาพด่างทั้งหมด	270 - 370 มก./ล.$CaCO_3$
อุณหภูมิ	25 - 28 องศาเซลเซียส
ทีเคเอ็น	40 - 80 มก. / ลิตร
ของแข็งแขวนลอย	20 - 60 มก. / ลิตร
ออกซิเจนละลาย (DO)	0.3 - 0.7 มก./ลิตร

จากตารางที่ 3.2 พบว่าน้ำเสียชุมชนนี้มีอัตราส่วนค่าบีโอดีต่อซีโอดีที่มีค่าประมาณ 0.5 - 0.6 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำ มีช่วงค่าพีเอช ที่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบประกอบกับมีธาตุอาหารได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มากพอจึงไม่จำเป็นต้องปรับแต่งคุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบแต่อย่างใด

3.2.2 วิธีการเตรียมน้ำเสีย

การเตรียมน้ำเสียในแต่ละวัน โดยการเตรียมน้ำเสียในถังพลาสติก ขนาด 100 ลิตร และล้างทำความสะอาดเศษตะกอนบริเวณก้นถังพักน้ำเสียประมาณ 1-2 สัปดาห์ต่อครั้ง และไม่ได้ทำการเติมสารเคมีเพื่อใช้ในการปรับสภาพน้ำเสียแต่อย่างใด

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.3.1 ถังพักน้ำเสีย

ใช้ถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร

3.3.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบและเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ

ถังปฏิกรณ์ อีจีเอสบี 1 ชุดจะประกอบไปด้วยเครื่องสูบ 2 ตัว ได้แก่ เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 1 ตัว และเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ 1 ตัว โดยที่น้ำเสียชุมชนจะถูกสูบเข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่องจากถังพักน้ำเสียไปยังทางเข้าของแบบจำลองถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี ในขณะเดียวกันที่ทางเข้าจุดเดียวกันนี้ก็จะมีน้ำเสียที่ถูกสูบด้วยเครื่องสูบเวียนกลับแบบต่อเนื่องเพื่อทำหน้าที่เพิ่มความเร็วไหลขึ้น (ULV) ในถังปฏิกรณ์ เครื่องสูบน้ำเสียทั้ง 2 ตัวนี้เป็นเครื่องสูบแบบรีดสาย (Peristaltic pump) และเครื่องสูบเวียนกลับใช้ Diaphram pump

3.3.3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ อีจีเอสบี

ใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการเป็นท่ออะคริลิกใสเบอร์ 603 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 50 มม. จำนวน 2 ชุด ประกอบด้วยส่วนย่อยสลายสูง 1.00 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. และส่วนตกตะกอนซึ่งเป็นอุปกรณ์ท่อพีวีซี สูง 0.30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ส่วนตกตะกอนและส่วนย่อยสลายถูกแยกด้วยชุดตกตะกอน (GSS) ซึ่งทำจากกรวยพลาสติกตัดปลายเบอร์ 4 และทำการติดตั้งวาล์วเก็บตัวอย่างตะกอนข้างถังปฏิกรณ์ตามความสูงจำนวน 6 ตำแหน่ง รายละเอียดของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 3.2

3.3.4 อุปกรณ์วัดก๊าซ

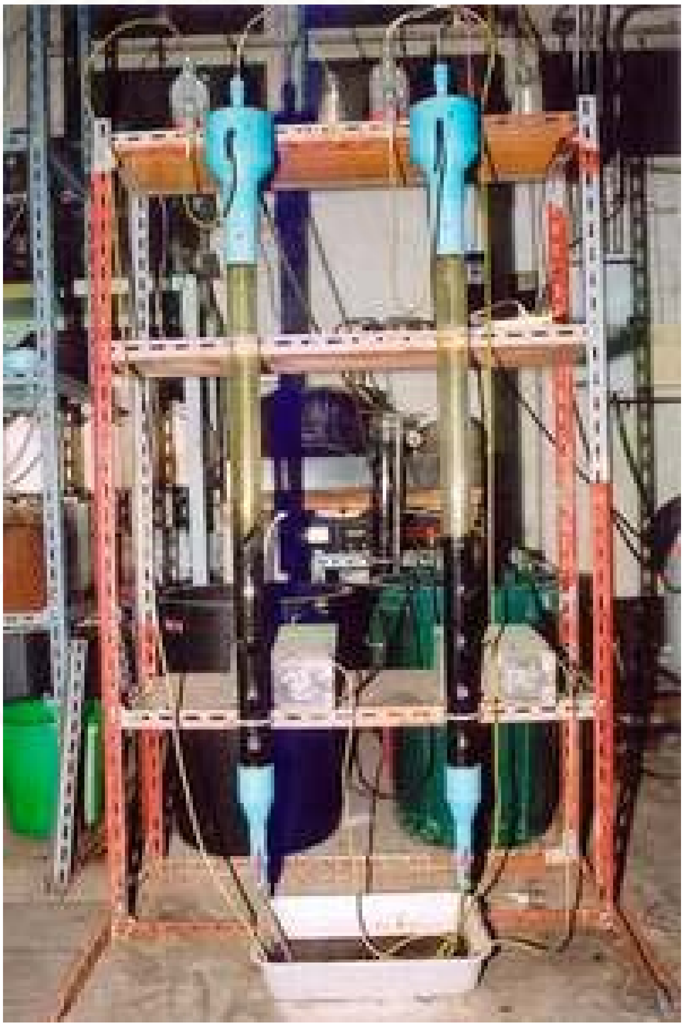
อุปกรณ์วัดก๊าซมีจำนวน 2 ชุด ทำงานโดยใช้ใช้หลักการแทนที่น้ำ โดยมีหลอดแทนที่น้ำทำจากทำจากหลอดพลาสติกขนาด 50 มล. บรรจุน้ำเต็มหลอดโดยทำการปรับพีเอชน้ำให้ต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลอดแทนที่น้ำต่อกับสายนำก๊าซที่ออกจากถังปฏิกรณ์ โดยก๊าซจะไปแทนที่น้ำที่บรรจุในหลอดแทนที่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน

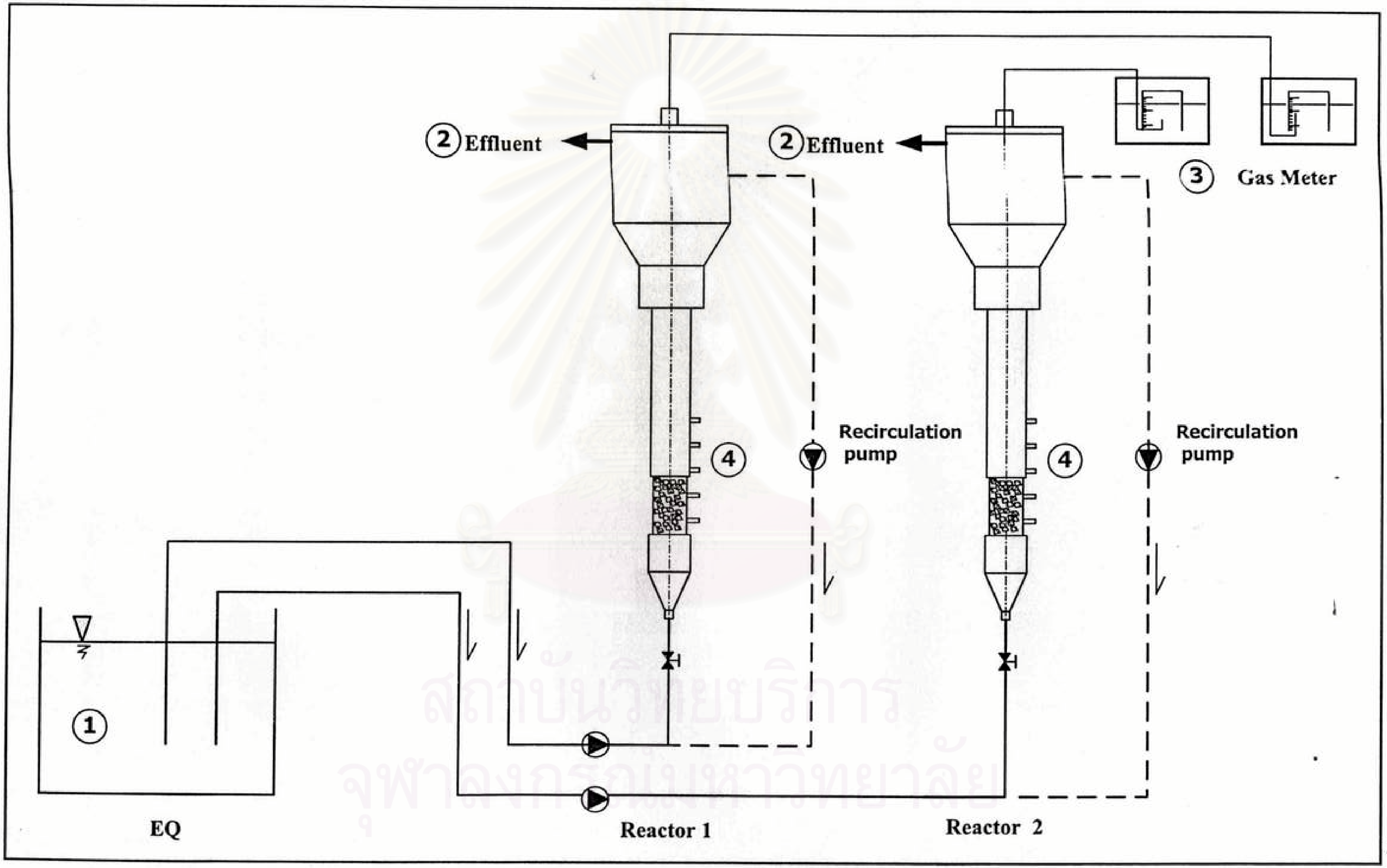
การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงานของระบบอีจีเอสบี แสดงในรูปที่ 3.1 โดยทำการเริ่มต้น (start up) และการดำเนินระบบของถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุดพร้อมกัน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ P1 สูบน้ำเสียจากถังเก็บน้ำเสียส่งเข้าไปยังทางเข้าของถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี และเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ P2 สูบน้ำเสียเวียนกลับมายังทางเข้าซึ่งเป็นจุดเดียวกัน

2) น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ อีจีเอสบีจะไหลล้นต่อไปยังถังเก็บน้ำทิ้ง ก๊าซในระบบจะไหลผ่านชุดตกตะกอน (GSS) ไปยังอุปกรณ์วัดก๊าซ

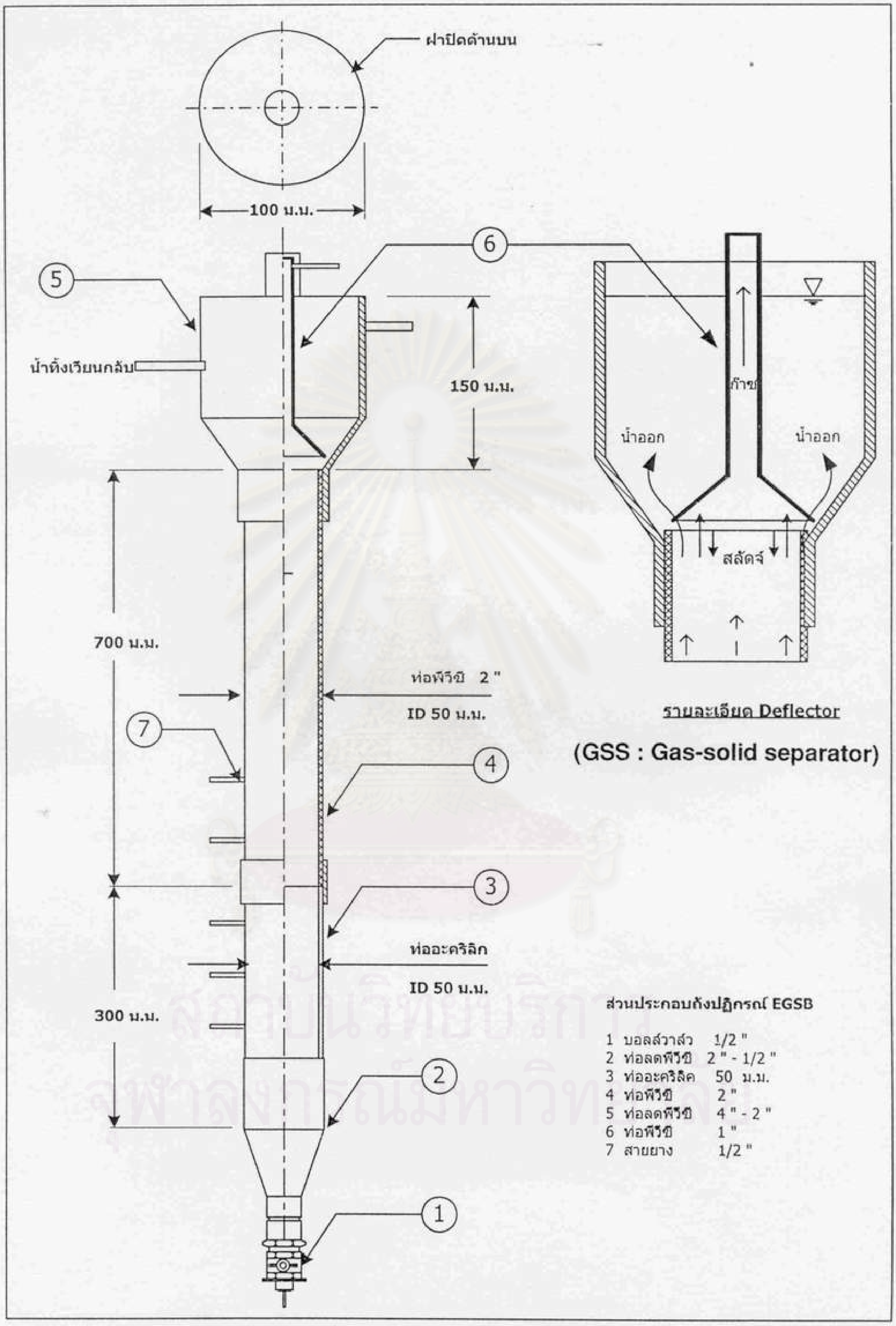


รูปที่ 3.1 การติดตั้งถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการทำงานของระบบอีจีเอสบี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

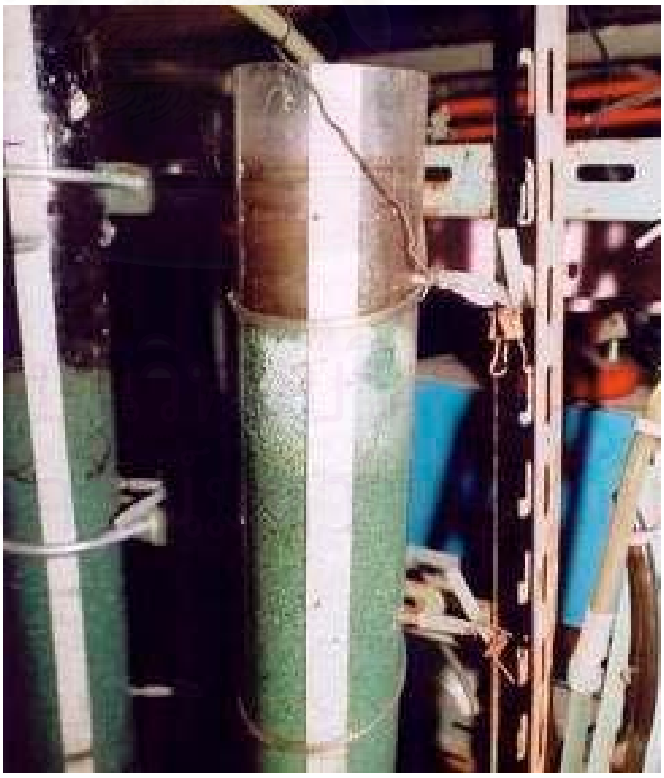


รูปที่ 3.3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ EGSB

3) การปรับตัวของสลัดจ์ในระบบโดยการเติมแอนแอโรบิกสลัดจ์ลงถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุด ในปริมาณ 35% ของความสูงคอลัมน์หรือ 35ซม. จากนั้นทำการสูบน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. เพื่อทำการปรับสภาพสลัดจ์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำที่อัตราการสูบ 8 ลิตร/วันเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เนื่องจากเป็นแอนแอโรบิกสลัดจ์ที่สภาพเป็นเม็ดสมบูรณ์จึงใช้เวลาในการปรับตัวจนเกิดปฏิกิริยากับน้ำเสียในเวลาสั้น ๆ

4) เริ่มต้นการทดลองโดยเติมน้ำเสียชุมชนในถังพักและปรับอัตราการไหลในถังปฏิกรณ์ชุดที่1 และ 2 และทำการปรับความเร็วไหลขึ้นในคอลัมน์ตามแผนการทดลอง ดังตารางที่ 3.1 เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในชั้นสลัดจ์และเกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างเม็ดสลัดจ์กับสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยปรับอัตราการสูบเวียนกลับของ Recirculation Pump

5) ในการทดลองสุดท้ายได้เพิ่มการติดตั้งถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์โดยการต่อท่อสายยางน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีเข้ากับบริเวณด้านบนถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์ โดยให้การไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์เป็นแบบจมน้ำและควบคุมระดับน้ำที่บริเวณปลายสายยางที่เป็นจุดน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์รับน้ำออกจากระบบอีจีเอสบี

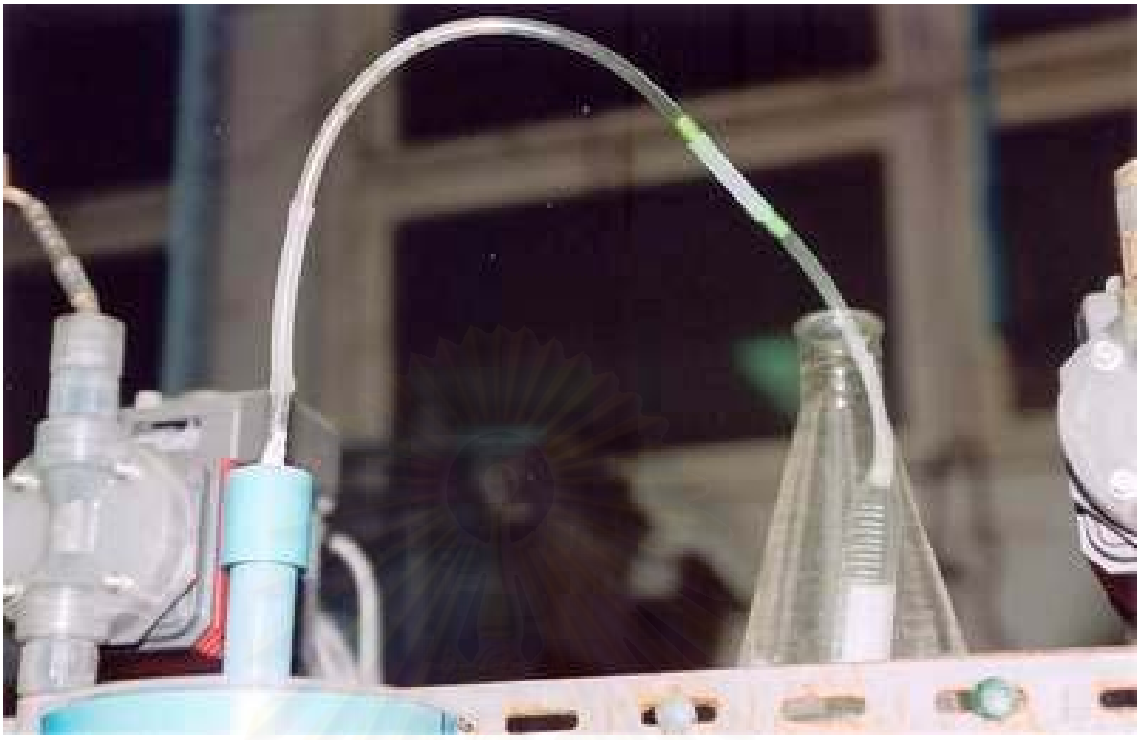
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง			
		ทางน้ำเข้า	ทางน้ำออก	อุปกรณ์วัดก๊าซ	วาล์วเก็บตัวอย่าง
1. ซีโอดี	Close reflux	ก	ก	-	-
2. บีโอดี 5 วัน	Azide Modification	ค	ค	-	-
3. ของแข็งแขวนลอย	Standard method	ก	ก	-	-
4. กรดไขมันระเหย	วิธีไตเตรต	ก	ก	-	-
5. พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	ก	ก	-	-
6. อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	ก	ก	-	-
7. โออาร์พี	เครื่องวัดโออาร์พี	ก	ก	-	-
8. สภาพด่างทั้งหมด	วิธีไตเตรต	ก	ก	-	-
9. ปริมาณก๊าซทั้งหมด	เครื่องวัดแบบแทนที่น้ำ	-	-	ข	-
10. ทีเคเอ็น	Kjeldahl method	ค	ค	-	-
11. ซัลไฟด์ทั้งหมด	Iodometric method	ข	ข	-	-
12. การกระจายขนาดสลัดจ์	Particle Size Analyser	-	-	-	ง
13. ชนิดแบคทีเรีย	FISH	-	-	-	ง
14. โครงสร้างเม็ดสลัดจ์	SEM	-	-	-	ง

<u>หมายเหตุ</u> ก เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 3 ครั้ง
ข เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง
ค เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ง เก็บตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดชุดการทดลอง



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดก๊าซ

3.6 การควบคุมการทดลอง

ในการทดลองนี้สิ่งที่ต้องควบคุมและปฏิบัติได้แก่

1) การเตรียมและป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่กำหนดในแต่ละช่วง

2) การทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั่งการอุดตันภายในท่อสายยางตลอดจนการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การดำเนินการวิจัย

การเริ่มต้นระบบบำบัดในงานวิจัยนี้ใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากท่ออะคริลิคใสจำนวน 2 ชุดแต่ละชุดมีการติดตั้งอุปกรณ์เหมือนกันทุกประการดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในตอนต้นของการทดลอง ได้ทำการเลี้ยงเชื้อในถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีโดยเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นเป็นเชื้อตะกอนจากชุดการทดลองถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเส้นก๋วยเตี๋ยวซึ่งเป็นเชื้อที่คุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมาก่อน โดยเป็นเชื้อแบคทีเรียไร้อากาศที่มีลักษณะจับตัวเป็นเม็ด (granular sludge) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 - 3 มม. และแบบฟลอค (flocculent sludge) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแบบเม็ด และได้คัดขนาดของเชื้อแบคทีเรียโดยการตกตะกอนและเลือกเฉพาะเม็ดแบคทีเรียที่มีขนาดใหญ่ตกตะกอนได้เร็วทั้งนี้เพื่อให้การเดินระบบสามารถปรับตัวต่อสภาพความเร็วการไหลที่สูงได้ดี เริ่มต้นเดินระบบโดยใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร ความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. อัตราการไหล 8 ลิตรต่อวัน เวลากักน้ำประมาณ 6 ชม เหมือนกันในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุด เป็นเวลาประมาณ 1 เดือน เพื่อให้เชื้อที่นำมาเลี้ยงปรับตัวเข้ากับน้ำเสียที่ความเข้นข้นต่ำ โดยในระหว่างนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงและเสถียรภาพของระบบ แต่ผลในช่วงนี้ไม่ได้นำมาแสดงเนื่องจากใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้และควบคุมการทำงานของระบบเท่านั้น ระบบใช้เวลาไม่นานนักในการเข้าสู่สภาวะที่คงที่เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ย่อยได้ง่าย จากนั้นจึงได้นำน้ำเสียชุมชนจากอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเสียค่อนข้างสม่ำเสมอ ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุด การทดลองในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดใช้น้ำเสียในถังพักน้ำเสียถังเดียวกันและได้เปลี่ยนแปลงขนาดของอุปกรณ์เก็บก๊าซทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการทดลองเริ่มต้น (start up) ระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายที่ความเข้มข้นประมาณ 500 มก./ล. มีปริมาณก๊าซที่เกิดเล็กน้อยโดยสามารถเก็บค่าได้อย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากที่ได้ดำเนินการปรับเข้าสู่การทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำเสียชุมชนความเข้มข้นซีโอดี 100 – 150 มก./ล. มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นเป็นบางครั้งและมีปริมาณน้อยมาก ผู้วิจัยคาดว่าอาจจะเป็นเพราะการเปลี่ยนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำลงทำให้ปริมาณก๊าซลดลงจึงได้ทำการเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำโดยดัดแปลงหลอดทดลองขนาด 20 มล. ต่อสายเชื่อมกับท่อระบายก๊าซจากระบบ

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประมาณ 13 เดือน โดยได้เริ่มต้นการทดลองตั้งแต่เดือนมกราคม 2545 ถึง มกราคม 2546 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 หลังจากการทดลองในชุดสุดท้ายเสร็จสิ้นลงได้ทำการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนที่เหลือในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีโดยทำการทดลองในชุดการทดลองระบบอีจีเอสบีชุดสุดท้าย โดยใช้ซีโอไลต์ทำการบำบัดไนโตรเจนให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคาร

ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนการทำวิจัย

ลำดับการทดลอง	2545												2546	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
การเริ่มต้น (start up) เลี้ยงเชื้อในระบบ	▬													
การทดลองช่วงที่ 1 (ความเร็ว 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 และ 6 ชม.)		▬	▬	▬										
การทดลองช่วงที่ 2 (เวลากัก 2 ความเร็ว 3.5 และ 6.5 ม./ชม.)					▬	▬	▬							
การทดลองช่วงที่ 3 (เวลากัก 2 ความเร็ว 10.0 และ 12.0 ม./ชม.)							▬	▬	▬	▬				
การทดลองบำบัดไนโตรเจนด้วยระบบอีจีเอสบี+ซีโอไลต์										▬	▬	▬	▬	

ก) ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.   ข) ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.1 ระดับชั้นสลัดจ์ที่ขยายตัวเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงเวลากัก

4.2 ผลการทดลอง

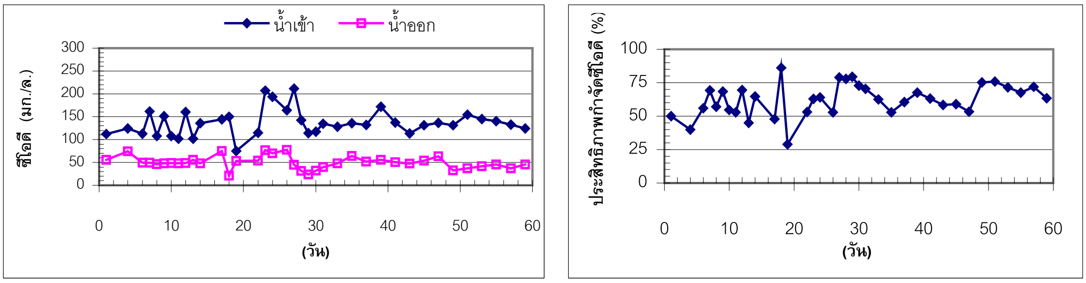
4.2.1 การศึกษาผลของเวลากักที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ (ชุดการทดลองที่ 1)

ชุดการทดลองนี้กำหนดค่าความเร็วการไหลขึ้นคงที่เท่ากับ 0.5 ม./ชม. ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุด และกำหนดเวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. ในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การทดลองในชุดนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบถึงผลของเวลากักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบในสภาพที่มีความเร็วไหลขึ้นต่ำ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว (steady state)

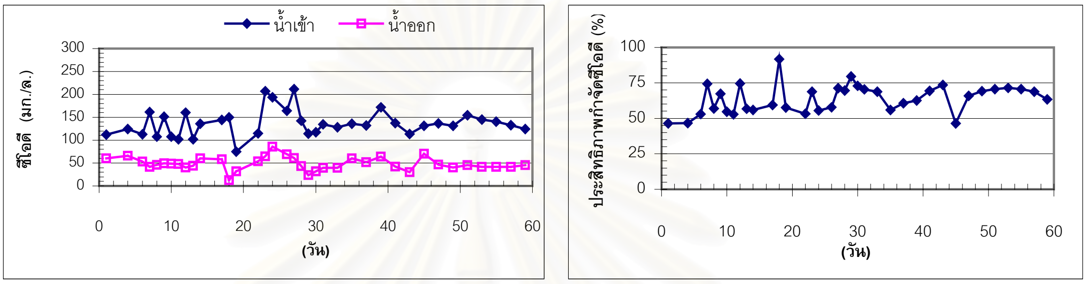
1) ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 139 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากันคือ 45 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากันคือ 67 เปอร์เซ็นต์ ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ค่าซีโอดีในน้ำเข้าเนื่องจากเป็นน้ำเสียในถังพักถังเดียวกันและน้ำที่ออกมีค่าซีโอดีเฉลี่ยในช่วงคงตัวเท่ากันจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเท่ากันจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง และเนื่องจากน้ำเสียที่ต้องเติมใหม่ทุกวันทำให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียมีค่าใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมาก โดยข้อมูลซีโอดีน้ำเข้าตลอดช่วงการทดลองพบว่าค่อนข้างสม่ำเสมอเนื่องจากพฤติกรรมการใช้น้ำในอาคารส่วนใหญ่มากจากห้องน้ำซึ่งมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วงระหว่าง100 – 200 มก./ล. จากรูปที่ 4.2 ค่าซีโอดีน้ำออกมีค่าแปรปรวนในช่วงแรกเนื่องจากระบบต้องทำการปรับตัวให้คุ้นเคยกับน้ำเสียและสภาวะความเร็วที่กำหนดให้และใช้เวลาประมาณ 1 เดือนระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงตัว สาเหตุที่ระบบสามารถปรับตัวได้เร็วเพราะน้ำเสียชุมชนจากอาคารดังกล่าวเป็นน้ำเสียประเภทย่อยง่ายแม้จะดำเนินระบบโดยภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันก็ยังให้ผลการทำงานที่เหมือนกัน



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



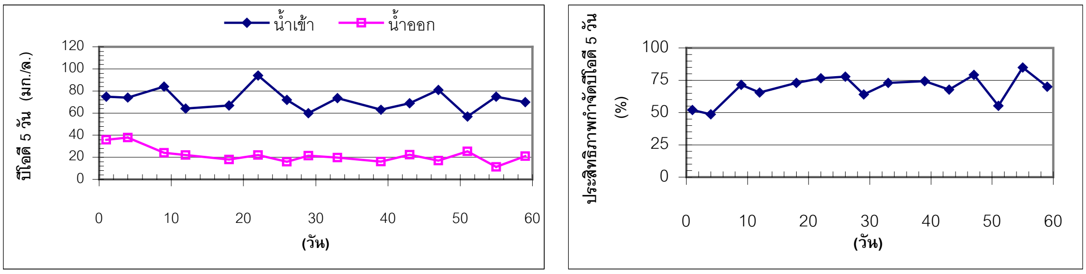
(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 1

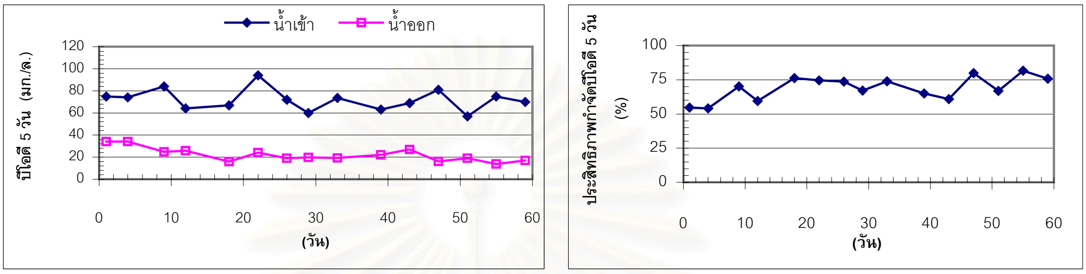
2) บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าบีโอดี 5 วันเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 72 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าบีโอดี 5 วันเฉลี่ยเท่ากันคือ 20 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 84 และ 85 ตามลำดับ ค่าบีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และจากช่วงสภาวะคงตัวได้ทำการวัดค่าบีโอดี 5 วัน ละลาย ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าบีโอดี 5 วัน (ละลายเฉลี่ยเท่ากันคือ 10 มก./ล. จะเห็นได้ว่าค่าบีโอดี 5 วันในน้ำออกและประสิทธิภาพการกำจัดเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าซีโอดีรวมทั้งค่าที่แปรปรวนในช่วงแรกเนื่องมาจากในระหว่างการปรับตัวของระบบมีของแข็งแขวนลอยบางส่วนได้หลุดออกเนื่องจากไม่สามารถอยู่ในสภาพความเร็ว 0.5 ม./ชม. ได้ ทำให้ค่าบีโอดี 5 วัน (ทั้งหมด)มีค่าสูงในช่วงแรก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดในทั้ง 2 การทดลองใกล้เคียงกันมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.3 บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันในการทดลองที่ 1

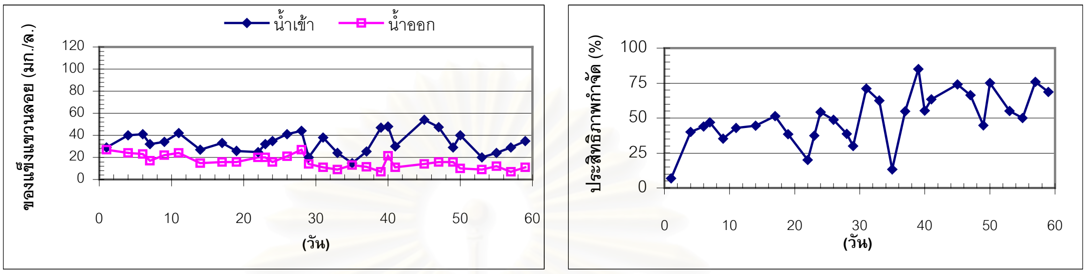
3) ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักเท่ากับ 34 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 12 และ 11 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเท่ากันคือ 64 เปอร์เซ็นต์ ค่าของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.4

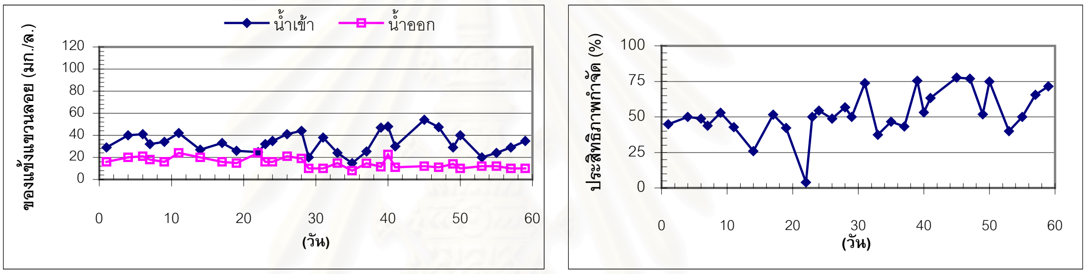
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งที่น้ำเสียซึ่งมาจากห้องน้ำรวมน่าจะมีค่าของแข็งแขวนลอยในปริมาณมากทั้งนี้เพราะขึ้นอยู่กับสภาพการรับน้ำของถังพักน้ำเสียในอาคารจริง โดยในอาคารดังกล่าวน้ำเสียรวมจะลงมาสู่ถังพักโดยจะมีผนังกั้นตะกอนที่ลอยอยู่ผิวบนและส่วนที่เป็นน้ำเสียจะไหลลอด โดยสามารถสังเกตได้จากการที่มีชั้นของตะกอนลอย (scum) หนาประมาณ 1 ฟุตบริเวณชั้นบนของถังพักน้ำเสียและชั้นตะกอนลอยเหล่านี้จะไม่ถูกสูบเข้าไปยังระบบบำบัดแต่จะถูกสูบระบายออกไปทิ้งโดยผู้ดูแลระบบปีละ 2 ครั้ง พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 20 – 50 มก./ล. และเมื่อพิจารณาสัดส่วนที่เป็นของแข็งที่ย่อยสลายได้ยากมีสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 10 และค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยใน

น้ำออกค่อนข้างต่ำและมีค่าเท่ากับค่าของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ซึ่งแสดงว่าน่าจะเป็นเซลของแบคทีเรียที่หลุดออกไปจากระบบ การปรับตัวของระบบในช่วงแรกมีความแปรปรวนเนื่องจากการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยบางส่วนที่เป็นแบบฟลอค (floc) ที่ไม่สามารถอยู่สภาพความเร็วที่สูงถึง 0.5 ม./ชม.ได้



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

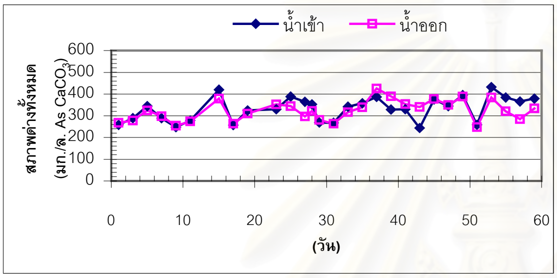
รูปที่ 4.4 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลองที่ 1

4) สภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยง่าย

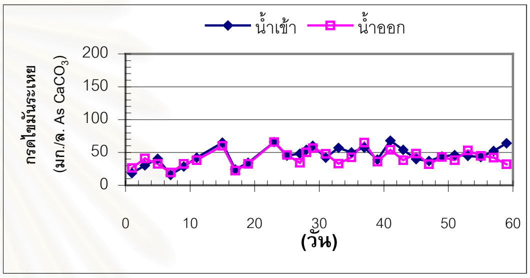
สภาพด่างทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยในน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 341 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 337 และ 338 มก./ล. ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ข้อมูลสภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียชุมชนที่แท้จริงและไม่ได้ทำการเติมบัพเฟอร์ให้กับระบบ ดังนั้นสภาพด่างทั้งหมดในน้ำนี้จึงเป็นสภาพด่างจริงในน้ำเสีย จากข้อมูลค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวจะเห็นว่าสภาพด่างทั้งหมดมีค่าลดลงเล็กน้อยและมีค่าใกล้เคียงกันในการทดลองทั้ง 2 ชุด สาเหตุที่สภาพด่างทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดมีปริมาณน้อยและนอกจากนี้การที่สารอินทรีย์

ไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียก็มีส่วนให้เกิดสภาพด่างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพด่างทั้งหมดลดลงเพียงเล็กน้อยหรือบางครั้งอาจจะทำให้สภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกมีค่ามากกว่าน้ำเข้า

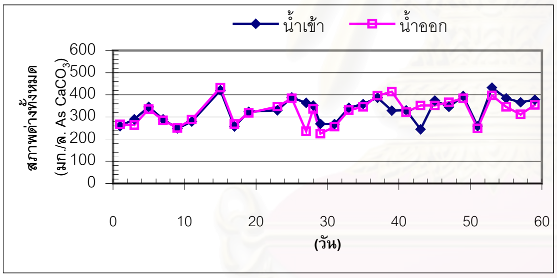
ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าเฉลี่ยในน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 50 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 44 และ 40 มก./ล. ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ข้อมูลปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 ปริมาณกรดไขมันระเหยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไปเพียงเล็กน้อย



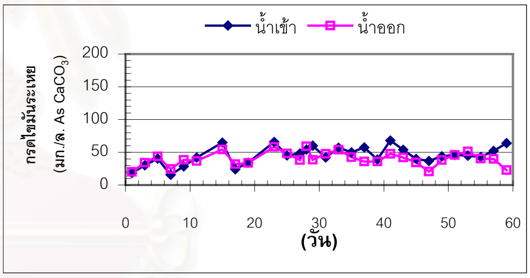
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.5 สภาพด่างทั้งหมดในการทดลองที่ 1

รูปที่ 4.6 ปริมาณกรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5) พีเอชและอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมด

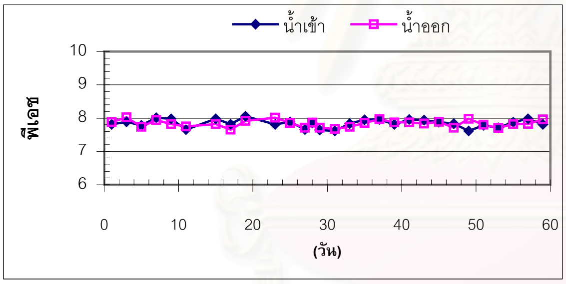
ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 7.83 ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.83 และ 7.84 พีเอชตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าพีเอชน้ำเสียและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะมีการนำกรดไขมันระเหยไปใช้ของแบคทีเรียแบบไร้อากาศแต่เนื่องจากปริมาณที่นำไปใช้มีน้อยมากจึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงพี

เอชเพียงเล็กน้อยและมีค่าพีเอชในน้ำออกมากกว่าสภาพพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.5 แต่อย่างไรก็ตามพีเอชที่มากกว่าเล็กน้อยไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบโดยสังเกตได้จากสภาวะคงตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

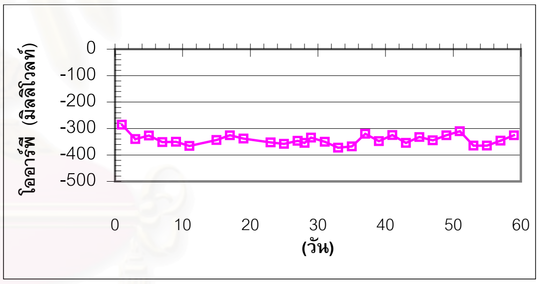
เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของระบบที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าดังนี้คือ 0.133 และ 0.123 ซึ่งแสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่เหมาะสมคือน้อยกว่า 0.4 จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของพีเอชไม่แตกต่างอย่างชัดเจนนัก

6) อุณหภูมิ

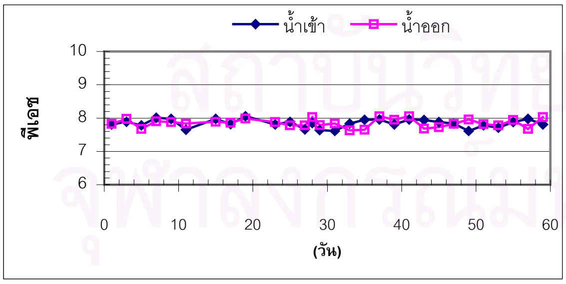
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 26.4 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 26.5 และ 26.4 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำเสียและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมากและต่างอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง mesophilic



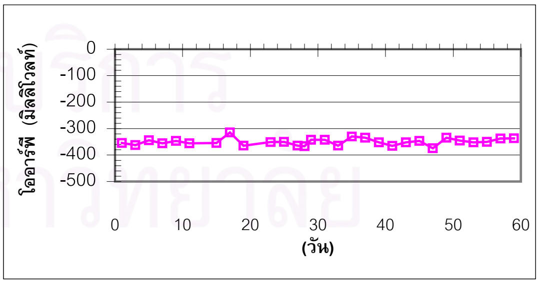
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.7 พีเอชในการทดลองที่ 1

รูปที่ 4.8 โออาร์พีในการทดลองที่ 1

7) โออาร์พี

จากตารางที่ 4.2 ค่าโออาร์พีเฉลี่ยของน้ำออกจากชุดถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 6 ชม. เท่ากับ -342 มิลลิโวลท์ ในขณะที่ชุดการทดลองที่เวลากัก 2 ชม. มีลักษณะคล้ายกันคือมีค่าเฉลี่ยโออาร์พีเท่ากับ -347 มิลลิโวลท์ ซึ่งต่ำกว่า -300 มิลลิโวลท์ แสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้อากาศได้อย่างดี โออาร์พีตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สังเกตได้ว่าถึงแม้น้ำเสียชุมชนซึ่งมีค่าซีโอดีต่ำและอาจจะมีออกซิเจนบางส่วนในน้ำเสียแต่ก็ไม่ได้ทำให้ปฏิกิริยาแบบไร้อากาศโดยรวมในระบบลดประสิทธิภาพแต่อย่างใด

8) ปริมาณก๊าซทั้งหมดและสัดส่วนก๊าซ

ปริมาณก๊าซทั้งหมดจากชุดถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 6 ชม. และ 2 ชม. ต่างมีปริมาณน้อยมากแม้จะได้ทำการดัดแปลงขนาดของเครื่องเก็บก๊าซให้มีขนาดเล็กลงจนสามารถวัดก๊าซซึ่งมีปริมาณน้อยได้แต่ก็ไม่ปรากฏว่ามีก๊าซเกิดขึ้นแต่อย่างใด สาเหตุจากข้อจำกัดของอุปกรณ์เองและส่วนหนึ่งเนื่องมาจากปริมาณซีโอดีที่กำจัดต่อวันมีปริมาณที่ต่ำมากทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดละลายออกไปพร้อมกับน้ำออกดังจะอธิบายเพิ่มในหัวข้อ 4.7

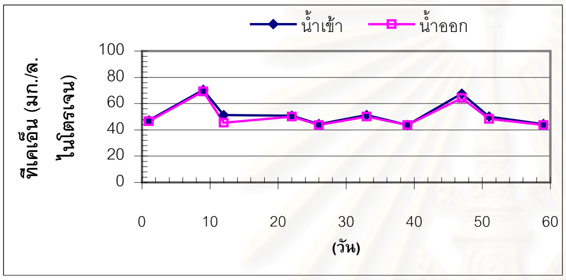
9) ทีเคเอ็น

ค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 50 มก./ล.ในเทอมของ ไนโตรเจน ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยเท่ากันคือ 49 มก./ล.ในเทอมของ ไนโตรเจน ทีเคเอ็นตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.9

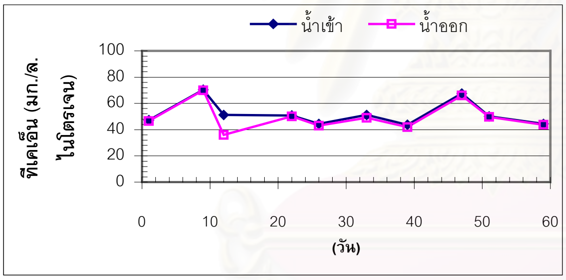
จะเห็นได้ว่าทีเคเอ็นน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมากถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะเป็นสารอาหาร (nutrient) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียแต่เนื่องจากแบคทีเรียแบบไร้อากาศมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณทีเคเอ็นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นสิ่งอธิบายได้ว่าระบบอีจีเอสบีซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศไม่สามารถบำบัดไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

10) ซัลไฟด์

ค่าซัลไฟด์เฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักมีค่าเท่ากับ 2.8 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเท่ากับ 6 และ 2 ชม. มีค่าซัลไฟด์เฉลี่ยเท่ากับ 0.6 และ 0.7 มก./ล. ซัลไฟด์ตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ระบบมีการกำจัดซัลไฟด์ได้บางส่วนโดยที่ซัลไฟด์น้ำออกสัมพันธ์กับปริมาณซัลไฟด์น้ำเข้า ซัลไฟด์ที่ถูกกำจัดอาจจะถูกจับกับอิออนของโลหะในชั้นสลัดจ์หรือระเหยออกมาระหว่างน้ำออกไหลออกมาสู่บรรยากาศภายนอก

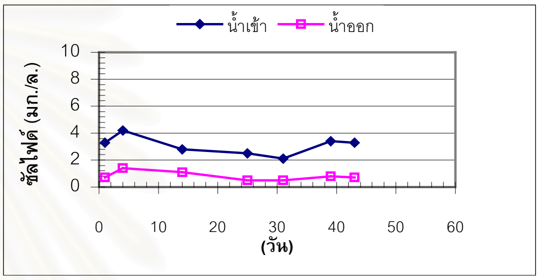


(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.

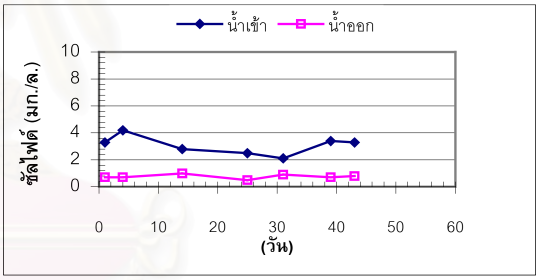


(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.9 ทีเคเอ็นในการทดลองที่ 1



(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 6 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.10 ซัลไฟด์ในทดลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่วัดในระบบจากการศึกษาผลของเวลากัก (ชุดการทดลองที่ 1)

ตัวแปรที่วัด			เวลากัก 6 ชม ความเร็ว 0.5 ม./ชม.		เวลากัก 2 ชม ความเร็ว 0.5 ม./ชม.	
			น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก
พีเอช (pH)		เฉลี่ย	7.83	7.83	7.83	7.84
	n = 16	SD.	0.12	0.10	0.12	0.15
อุณหภูมิ (Temperature)		เฉลี่ย	26.4	26.5	26.4	26.4
(องศาเซลเซียส)	n = 16	SD.	1.4	1.3	1.4	1.3
โออาร์พี (ORP)		เฉลี่ย		-342		-347
(มิลลิโวลท์)	n = 16	SD.		19		12
ซีโอดี (COD)		เฉลี่ย	139	45	139	45
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 19	SD.	22	11	22	12
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		เฉลี่ย		67		67
(%)	n = 19	SD.		8		7
ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด		เฉลี่ย		0.75		2.24
(กรัม/วัน)	n = 19	SD.		0.18		0.43
บีโอดี 5 วัน (BOD_5) ทั้งหมด		เฉลี่ย	72	20	72	20
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 13	SD.	10	4	10	4
บีโอดี 5 วัน (BOD_5) ละลาย		เฉลี่ย		10		10
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 3	SD.		3		1
ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน (ทั้งหมด)		เฉลี่ย		84		85
(%)	n = 3	SD.		6		4
สภาพด่างทั้งหมด		เฉลี่ย	341	337	341	338
(มิลลิกรัม/ลิตร $CaCO_3$)	n = 16	SD.	55	50	55	55
กรดไขมันระเหย (VFA)		เฉลี่ย	50	44	50	40
(มิลลิกรัม/ลิตร $CaCO_3$)	n = 16	SD.	9	10	9	9
อัตราส่วนกรดไขมันระเหย		เฉลี่ย		0.133		0.123
ต่อสภาพด่างทั้งหมด	n = 16	SD.		0.032		0.040
ของแข็งแขวนลอย (SS)		เฉลี่ย	34	12	34	11
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 9	SD.	11	3	11	1
ของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ (VSS)		เฉลี่ย	32	12	32	11
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 9	SD.	11	3	11	1
ปริมาณก๊าซทั้งหมด		เฉลี่ย		0		0
(ลิตร/วัน)	n = 13	SD.		0		0
ทีเคเอ็นไนโตรเจน (TKN)		เฉลี่ย	50	49	50	49
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 7	SD.	8	7	8	8
ซัลไฟด์ (Sulfide)		เฉลี่ย	2.8	0.6	2.8	0.7
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 4	SD.	0.6	0.2	0.6	0.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การศึกษาผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ(ชุดการทดลองที่ 2)

ชุดการทดลองนี้กำหนดค่าเวลากักคงที่เท่ากับ 2 ชม. ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดโดยกำหนดการทดลองเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกกำหนดความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 3.5 และ 6.5 ม./ชม. และใช้น้ำเสียในถังพักเดียวกันและช่วงที่ 2 กำหนดความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 10.0 และ12.0 ม./ชม. (โดยการทำการเปลี่ยนค่าความเร็วไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์ชุดเดิมจากที่มีความเร็ว 3.5 เป็น 12.0 ม./ชม. และ 6.5 เป็น10.0 ม./ชม.) และใช้น้ำเสียในถังพักเดียวกัน การทดลองในชุดนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบถึงผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว (steady state)

1) ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 184 และ 156 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 54 57 61 และ 62 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 70 68 59 และ 58 ตามลำดับ ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ค่าซีโอดีในน้ำเข้าเป็นน้ำเสียในถังพักถังเดียวกันและเนื่องจากน้ำเสียที่ต้องเติมใหม่ทุกวันทำให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียมีค่าใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากโดยน้ำเสียในถังพักซึ่งมี 2 ช่วงการทดลองพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยข้อมูลซีโอดีน้ำเข้าตลอดช่วงการทดลองทั้งสองพบว่าค่อนข้างสม่ำเสมอเนื่องจากพฤติกรรมการใช้น้ำในอาคารส่วนใหญ่มากจากห้องน้ำซึ่งมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วงระหว่าง 100 – 200 มก./ล. เหมือนกับในชุดการทดลองที่ 1 จากรูปที่ 4.12 ค่าซีโอดีน้ำออกมีค่าแปรปรวนเล็กน้อยในช่วงแรกเนื่องจากระบบต้องทำการปรับตัวให้คุ้นเคยกับสภาวะความเร็วที่กำหนดให้และใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงตัว สาเหตุที่ระบบสามารถปรับตัวได้เร็วเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 เพราะน้ำเสียชุมชนจากอาคารดังกล่าวเป็นน้ำเสียประเภทย่อยง่ายภายใต้การดำเนินระบบโดยภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ใกล้เคียงกันหมดในทุกช่วงค่าความเร็ว และเป็นสิ่งที่แสดงว่าระบบมีความสามารถในการปรับตัวได้ดีแม้จะทำงานในสภาพที่ความเร็วไหลขึ้นสูง

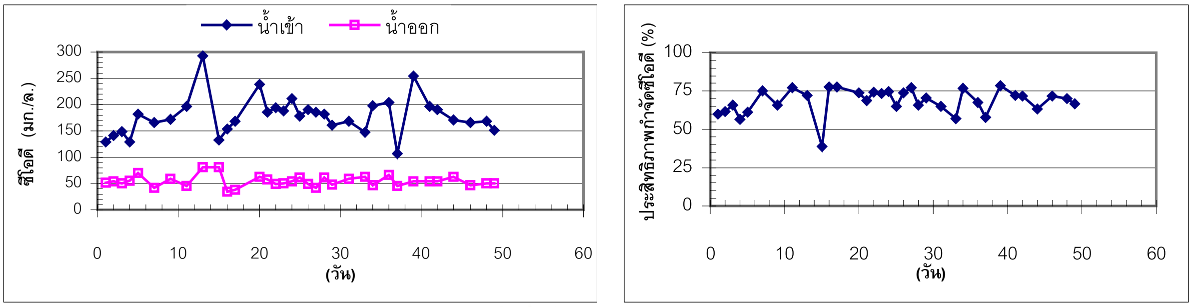
ก) เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม.

ข) เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม.

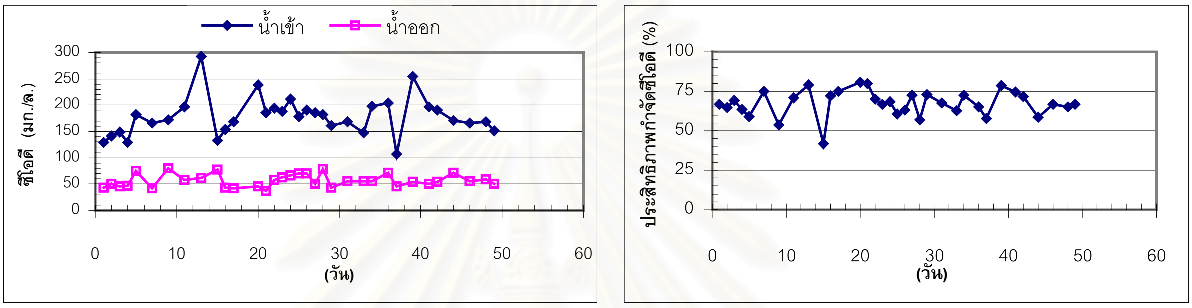
ค) เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม.

ง) เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.

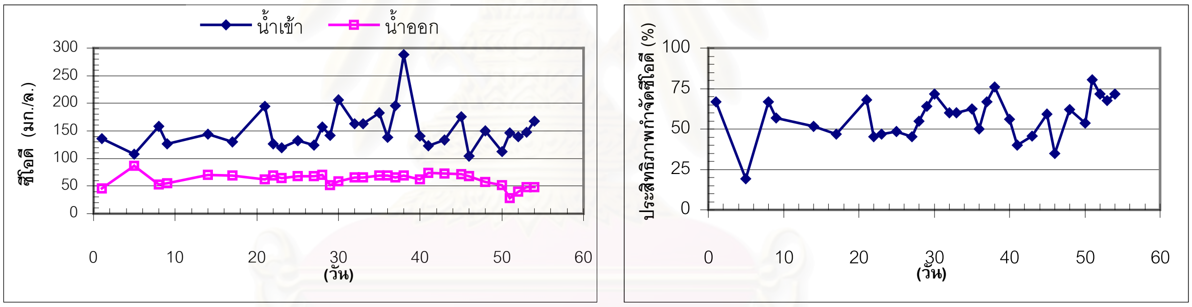
รูปที่ 4.11 ระดับชั้นสลัดจ์ที่ขยายตัวเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วไหลขึ้น



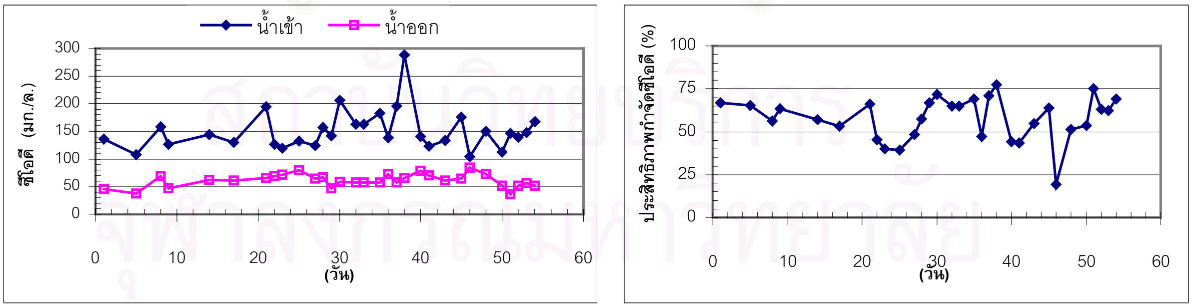
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

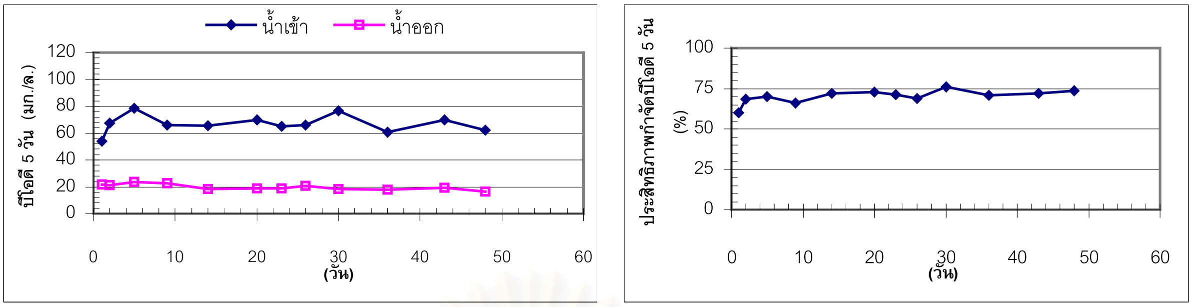


(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

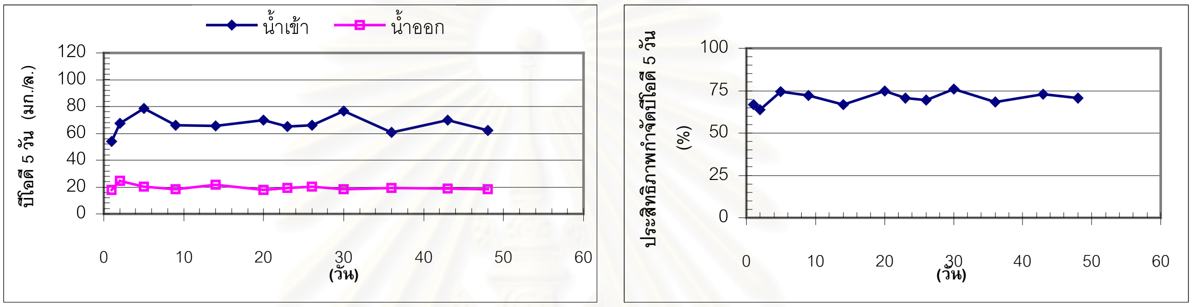


(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

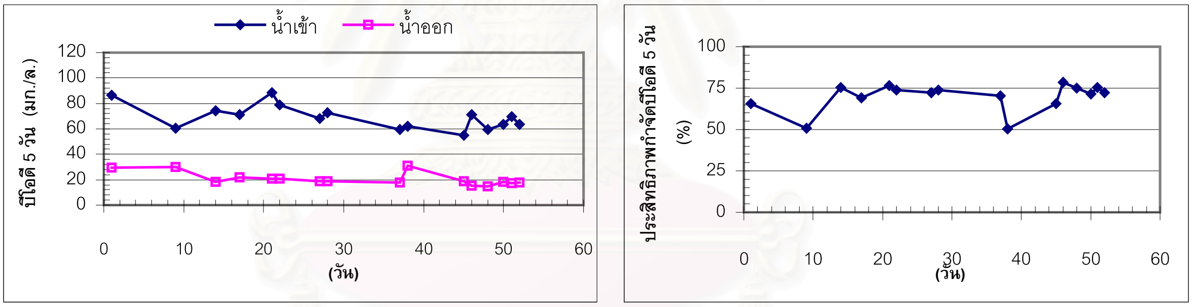
รูปที่ 4.12 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 2



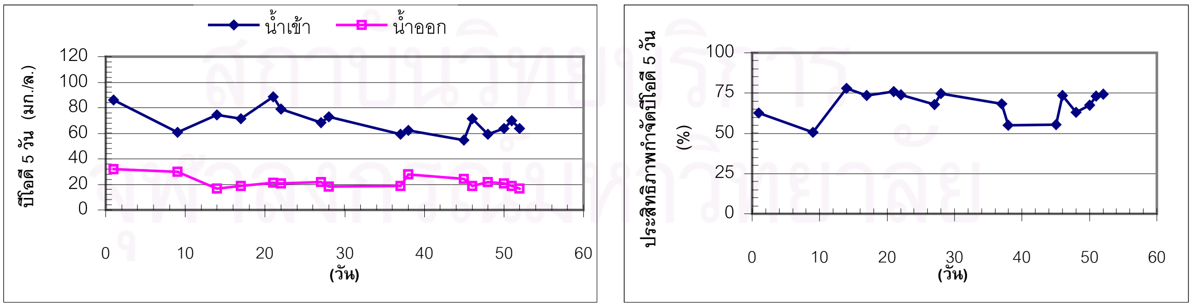
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.13 บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันในการทดลองที่ 2

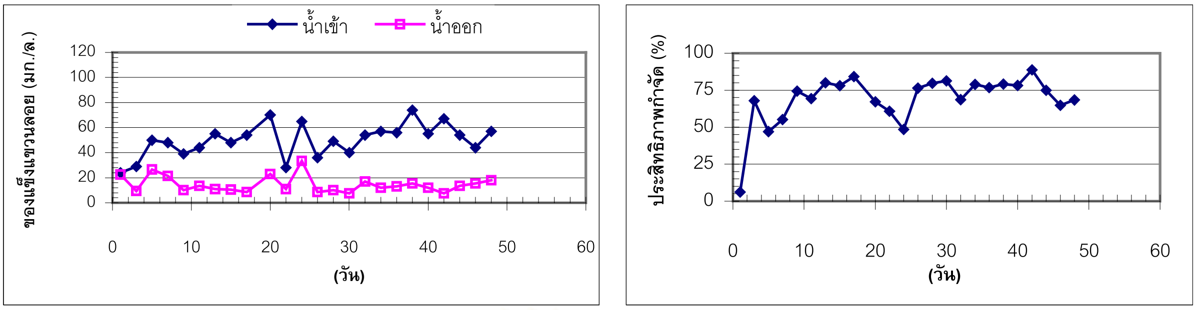
2) บีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าบีโอดี 5 วันเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 67 และ 64 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 12.0 ม./ชม. มีค่าบีโอดี 5 วันเฉลี่ยเท่ากับ 19 19 19 และ 21 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 82 82 85 และ 83 ตามลำดับ ค่าบีโอดี 5 วันและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วันเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และจากช่วงสภาวะคงตัวได้ทำการวัดค่าบีโอดี 5 วัน ละลาย ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 12.0 ม./ชม. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11 12 10 และ 11 มก./ล. จะเห็นได้ว่าค่าบีโอดี 5 วันในน้ำออกและประสิทธิภาพการกำจัดเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าซีโอดีรวมทั้งค่าที่แปรปรวนในช่วงแรกเนื่องมากจากในระหว่างการปรับตัวของระบบมีของแข็งแขวนลอยบางส่วนได้หลุดออกเนื่องจากไม่สามารถอยู่ในสภาพความเร็วต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นได้ ทำให้ค่าบีโอดี 5 วัน (ทั้งหมด)มีค่าสูงในช่วงแรก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดในทั้ง 2 การทดลองไม่มีความแตกต่างกัน

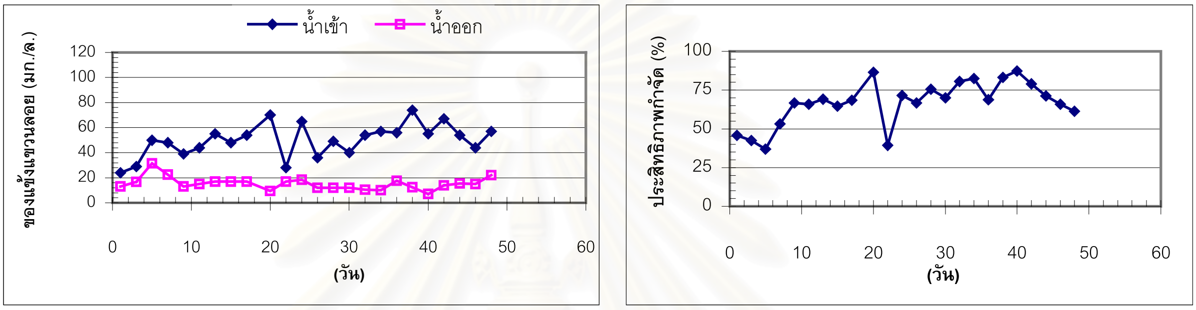
3) ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัด

ค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 58 และ 35 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 13 14 11 และ 10 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 76 และ 75 ตามลำดับ ค่าของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.14

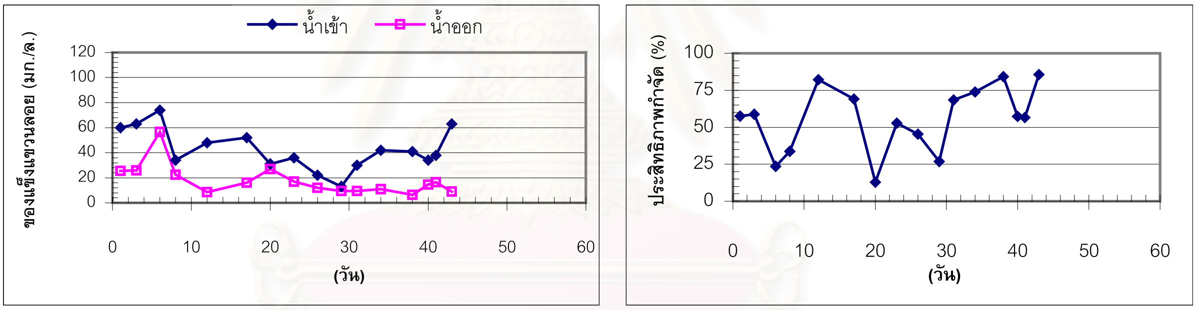
ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าน้ำเสียซึ่งมาจากห้องน้ำรวมน่าจะมีค่าของแข็งแขวนลอยในปริมาณมากทั้งนี้เพราะขึ้นอยู่กับสภาพการรับน้ำของถังพักน้ำเสียในอาคารจริงดังเช่นในการทดลองชุดที่ 1 ซึ่งชั้นของตะกอนลอย (scum) หนาประมาณ 1 ฟุตบริเวณชั้นบนของถังพักน้ำเสียของอาคารจะไม่ถูกสูบเข้าไปยังระบบบำบัดทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังพักมีค่าค่อนข้างต่ำ พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 20 – 70 มก./ล. ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 1 มากนัก ส่วนที่เป็นของแข็งที่ย่อยสลายได้ยากมีสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 10 และค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยในน้ำออกค่อนข้างต่ำและมีค่าเท่ากับค่าของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ซึ่งแสดงว่าน่าจะเป็นเซลของแบคทีเรียที่



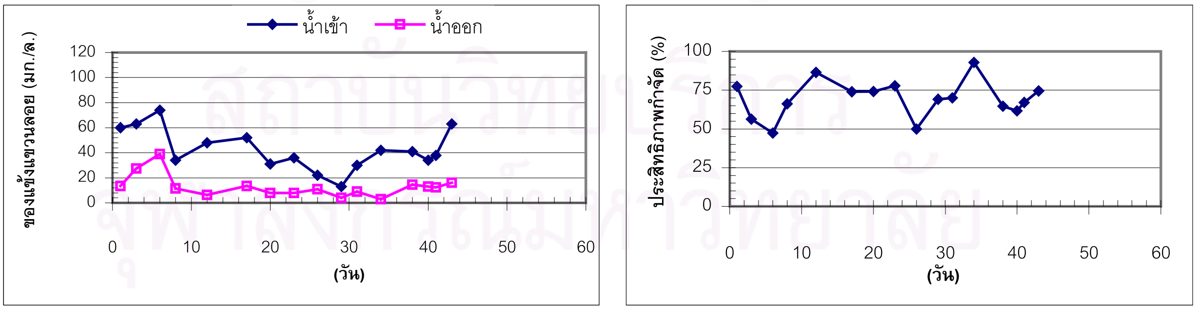
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



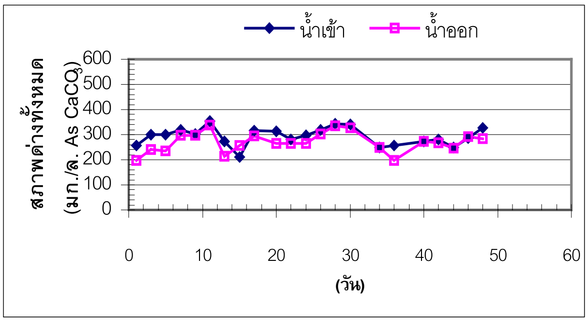
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



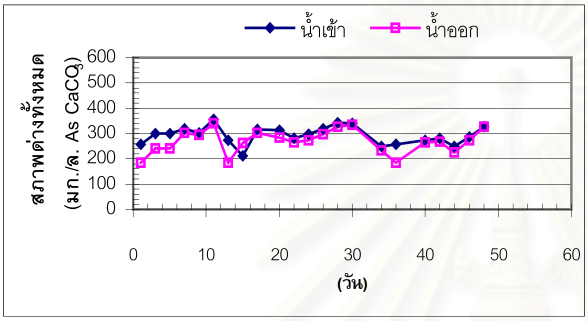
(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

รูปที่ 4.14 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลองที่ 2

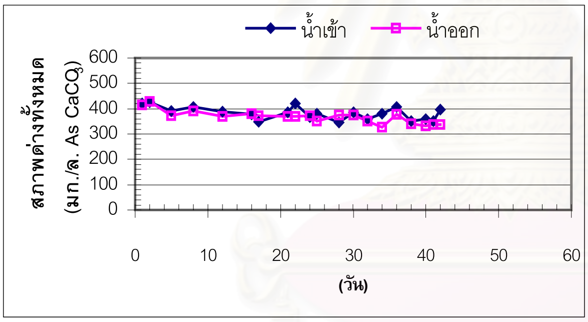
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



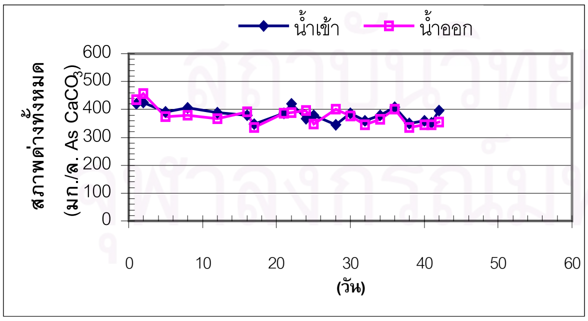
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



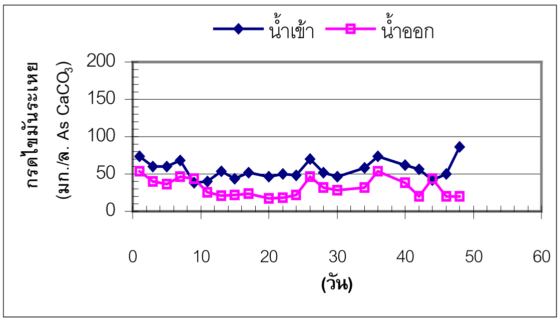
(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม



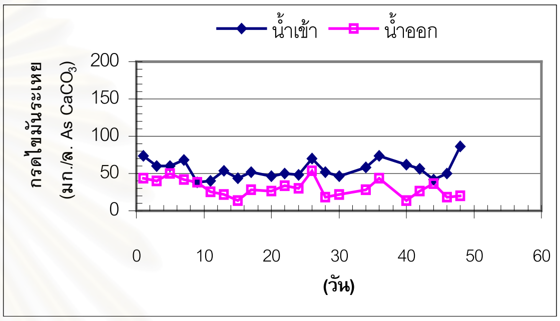
(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

รูปที่ 4.15 สภาพด่างทั้งหมด

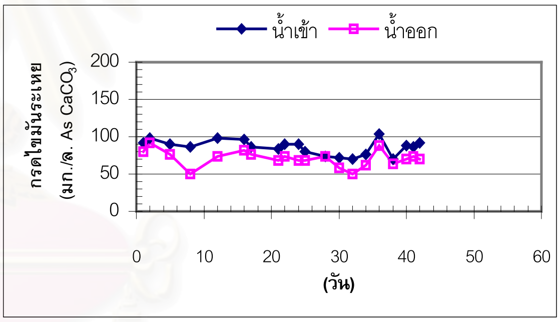
ตลอดการทดลองที่ 2



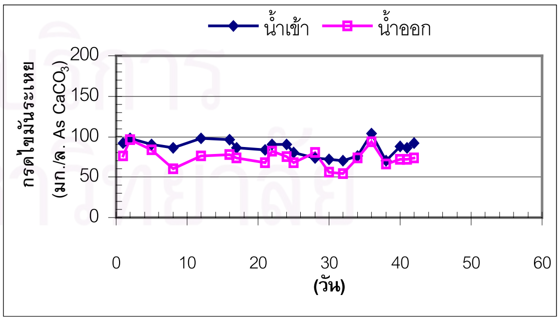
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม



(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

รูปที่ 4.16 ปริมาณกรดไขมันระเหย

ตลอดการทดลองที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลุดออกไปจากระบบ การปรับตัวของระบบในช่วงแรกมีความแปรปรวนเนื่องจากการหลุดออกของของแข็งแขวนลอยบางส่วนที่เป็นแบบฟลอค (floc) ที่ไม่สามารถอยู่สภาพความเร็วที่สูงขึ้นได้

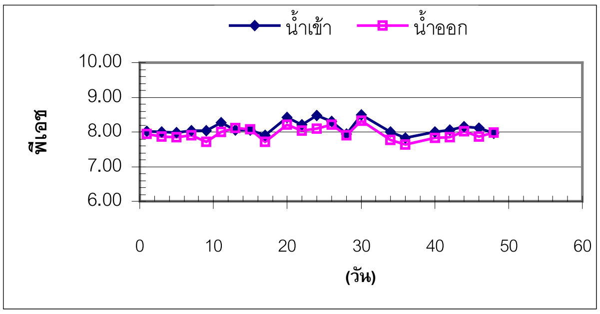
4) สภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยง่าย

สภาพด่างทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยในน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 293 และ 376 มก./ล. ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าสภาพด่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 274 273 355 และ 368 มก./ล.ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ข้อมูลสภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียชุมชนที่แท้จริงและไม่ได้ทำการเติมบัพเฟอร์ให้กับระบบ ดังนั้นสภาพด่างทั้งหมดในน้ำนี้จึงเป็นสภาพด่างจริงในน้ำเสีย จากข้อมูลค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวจะเห็นว่าสภาพด่างทั้งหมดมีค่าลดลงเล็กน้อยและมีค่าใกล้เคียงกันในการทดลองทุกชุด สาเหตุที่สภาพด่างทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดมีปริมาณน้อยและนอกจากนี้การที่สารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียก็มีส่วนให้เกิดสภาพด่างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพด่างทั้งหมดลดลงเพียงเล็กน้อยหรือบางครั้งอาจจะทำให้สภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกมีค่ามากกว่าน้ำเข้า

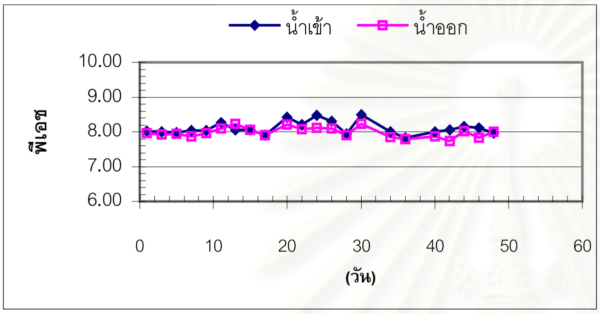
ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเฉลี่ยในน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 57 และ 83 มก./ล. ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยเท่ากับ 30 28 68 และ 72 มก./ล.ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ข้อมูลปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไปเพียงเล็กน้อย

5) พีเอชและอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด

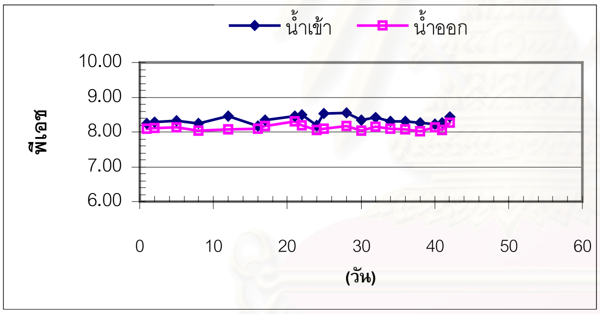
ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 8.15 และ 8.37 ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.98 7.98 8.13 และ 8.14 ตามลำดับ พีเอชตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าพีเอชน้ำเสียและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะมีการนำกรดไขมันระเหยง่ายไปใช้ของแบคทีเรีย



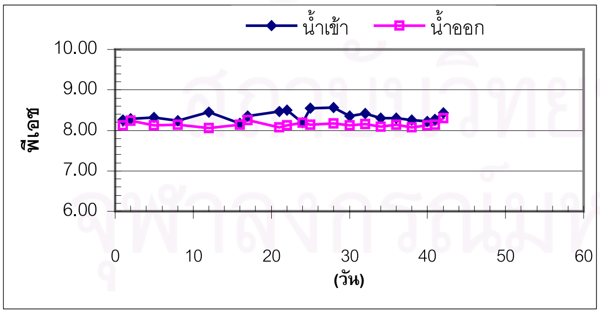
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

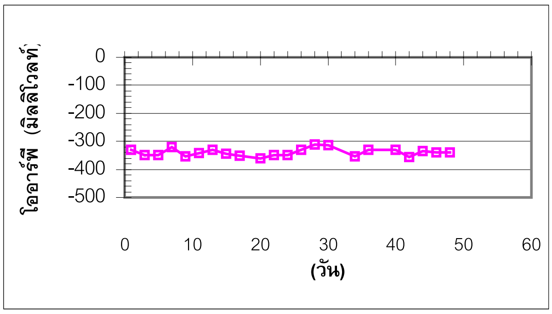


(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.เวลากัก 2 ชม.

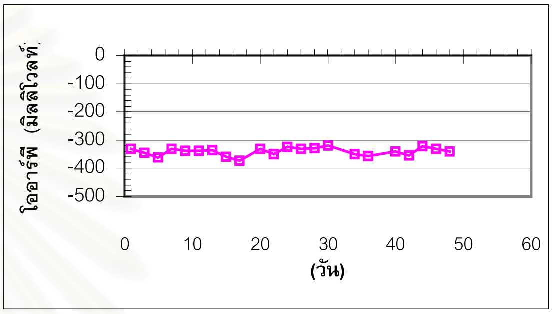


(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

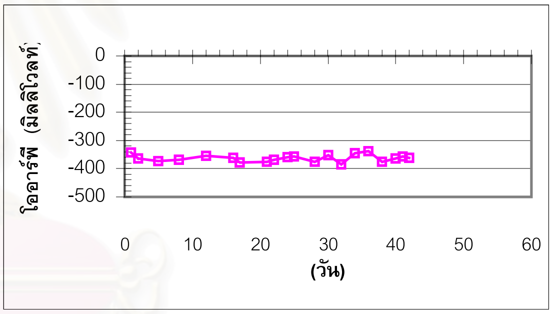
รูปที่ 4.17 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 2



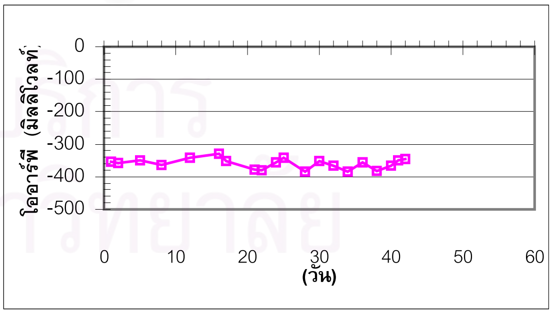
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.เวลากัก 2 ชม



(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

รูปที่ 4.18 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบไร้อากาศแต่เนื่องจากปริมาณที่นำไปใช้มีน้อยมากจึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชเพียงเล็กน้อยและมีค่าพีเอชในน้ำออกมากกว่าสภาพพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.5 แต่อย่างไรก็ตามพีเอชที่มากกว่าเล็กน้อยไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบโดยสังเกตได้จากสภาวะคงตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างทั้งหมดของระบบที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 12.0 ม./ชม. มีค่าดังนี้คือ มีค่าดังนี้คือ 0.114 0.110 0.193 และ 0.195 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าระบบมีกำลังบัพเฟอร์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่เหมาะสมคือน้อยกว่า 0.4 จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของพีเอชไม่แตกต่างอย่างชัดเจนนัก

6) อุณหภูมิ

ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 28.1 และ 27.8 ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.7 27.6 27.4 และ 27.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำเสียและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมากและต่างอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง mesophilic

7) โออาร์พี

จากตารางที่ 4.3 ค่าโออาร์พีเฉลี่ยของน้ำออกจากชุดถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าโออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ -338 -337 -362 และ -364 มิลลิโวลท์ ตามลำดับ ซึ่งสังเกตว่าทุกการทดลองมีค่าต่ำกว่า -300 มิลลิโวลท์ แสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้อากาศได้อย่างดี โออาร์พีตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.18 สังเกตได้ว่าถึงแม้น้ำเสียชุมชนซึ่งมีค่าซีโอดีต่ำและอาจจะมีออกซิเจนบางส่วนในน้ำเสียแต่ก็ไม่ได้ทำให้ปฏิกิริยาแบบไร้อากาศโดยรวมในระบบลดประสิทธิภาพแต่อย่างใด

8) ปริมาณก๊าซทั้งหมดและสัดส่วนก๊าซ

ปริมาณก๊าซทั้งหมดจากชุดถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่ทุกค่าความเร็วการไหลขึ้นต่างมีปริมาณน้อยมากแม้จะได้ทำการดัดแปลงขนาดของเครื่องเก็บก๊าซให้มีขนาดเล็กลงจนสามารถวัดก๊าซซึ่งมีปริมาณน้อยได้แต่ก็ไม่ปรากฏว่ามีก๊าซเกิดขึ้นแต่อย่างใด สาเหตุจากข้อจำกัดของอุปกรณ์

เองและส่วนหนึ่งเนื่องมาจากปริมาณซีโอดีที่กำจัดต่อวันมีปริมาณที่ต่ำมากทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดละลายออกไปพร้อมกับน้ำออกดังจะอธิบายเพิ่มในหัวข้อ 4.7

9) ทีเคเอ็น

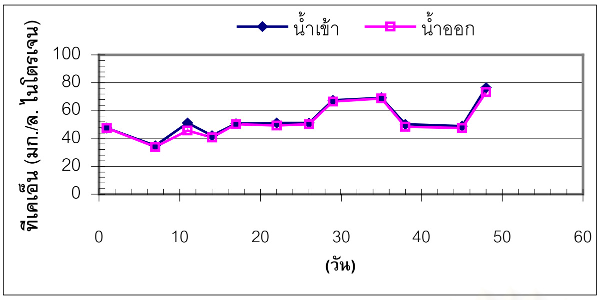
ค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 59 และ 76 มก./ล. ในเทอมของ ไนโตรเจนตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยเท่ากับ 58 58 74 และ 74 มก./ล. ในเทอมของ ไนโตรเจน ตามลำดับ ทีเคเอ็นตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.19

จะเห็นได้ว่าทีเคเอ็นน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันน้อยมากถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะเป็นสารอาหาร(nutrient)ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียแต่เนื่องจากแบคทีเรียแบบไร้อากาศมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณทีเคเอ็นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นสิ่งอธิบายได้ว่าระบบอีจีเอสบีซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศไม่สามารถบำบัดไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

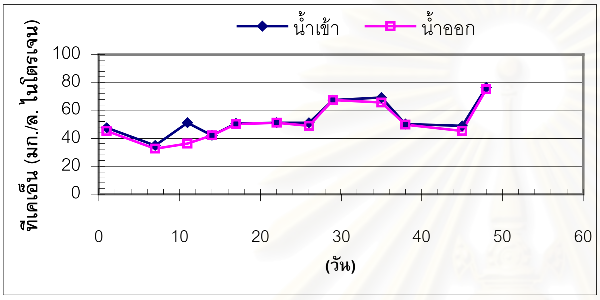
10) ซัลไฟด์

ค่าซัลไฟด์เฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนที่เตรียมในถังพักช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 3.0 และ 4.7 ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบในถังปฏิกรณ์ที่ความเร็วไหลขึ้น 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. มีค่าซัลไฟด์เฉลี่ยเท่ากับ 1.0 0.8 1.0 และ 1.4 มก./ล ตามลำดับ ซัลไฟด์ตลอดการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ระบบมีการกำจัดซัลไฟด์ได้บางส่วนโดยที่ซัลไฟด์น้ำออกสัมพันธ์กับปริมาณซัลไฟด์น้ำเข้า ซัลไฟด์ที่ถูกกำจัดอาจจะถูกจับกับอิออนของโลหะในชั้นสลัดจ์หรือระเหยออกมาระหว่างน้ำออกไหลออกมาสู่บรรยากาศภายนอก

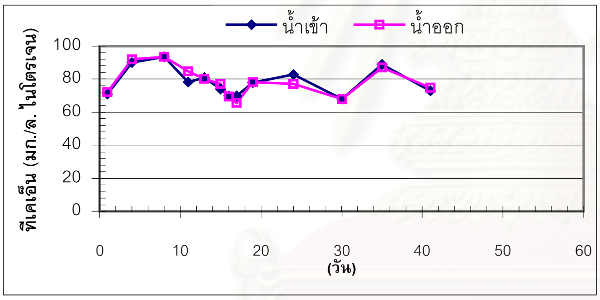
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



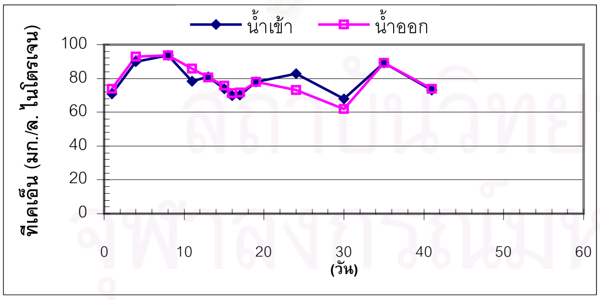
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.

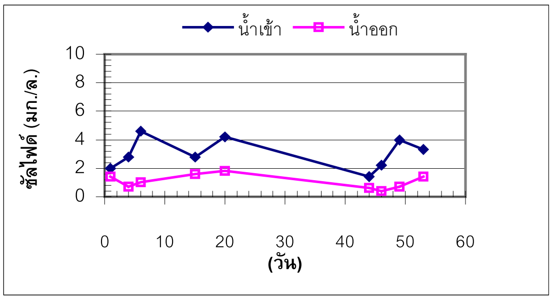


(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

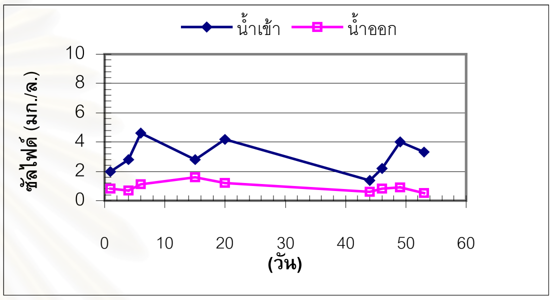


(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

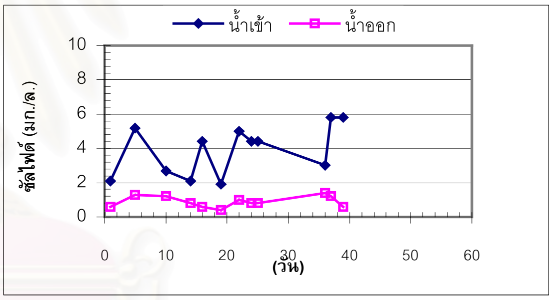
รูปที่ 4.19 ค่าทีเคเอ็นตลอดการทดลองที่ 2



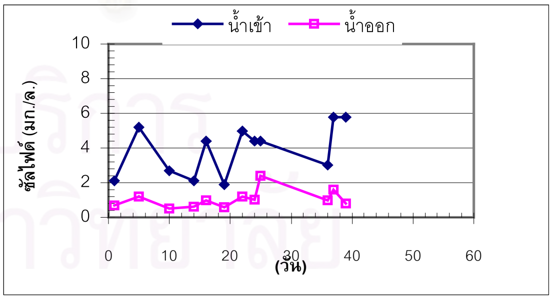
(ก) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ข) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม.



(ค) ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม



(ง) ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. เวลากัก 2 ชม

รูปที่ 4.20 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่วัดในระบบจากการศึกษาผลของความเร็วไหลขึ้น (ชุดการทดลองที่ 2)

ตัวแปรที่วัด			เวลากัก 2 ชม ความเร็ว 3.5 ม./ชม.		เวลากัก 2 ชม ความเร็ว 6.5 ม./ชม.		เวลากัก 2 ชม ความเร็ว10.0 ม./ชม.		เวลากัก 2 ชม ความเร็ว12.0 ม./ชม.	
			น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก
พีเอช (pH)		เฉลี่ย	8.15	7.98	8.15	7.98	8.37	8.13	8.37	8.14
	n = 13	SD.	0.22	0.20	0.22	0.16	0.12	0.09	0.12	0.06
อุณหภูมิ (Temperature)		เฉลี่ย	28.1	27.7	28.1	27.6	27.8	27.4	27.8	27.4
(องศาเซลเซียส)	n = 13	SD.	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
โออาร์พี (ORP)		เฉลี่ย		-338		-337		-362		-364
(มิลลิโวลท์)	n = 13	SD.		15		13		13		16
ซีโอดี (COD)		เฉลี่ย	184	54	184	57	156	61	156	62
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 22	SD.	30	7	30	11	39	12	39	11
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		เฉลี่ย		70		68		59		58
(%)	n = 22	SD.		6		7		12		14
ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด		เฉลี่ย		3.11		3.03		2.28		2.26
(กรัม/วัน)	n = 22	SD.		0.71		0.74		0.95		1.02
บีโอดี 5 วัน (BOD_5) ทั้งหมด		เฉลี่ย	67	19	67	19	64	19	64	21
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 7	SD.	5	1	5	1	6	5	6	4
บีโอดี 5 วัน (BOD_5) ละลาย		เฉลี่ย		11		12		10		11
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 3	SD.		2		3		1		3
ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน		เฉลี่ย		82		82		85		83
(%)	n = 3	SD.		5		6		2		4
สภาพด่างทั้งหมด		เฉลี่ย	293	274	293	273	376	355	376	368
(มิลลิกรัม/ลิตร $CaCO_3$)	n = 13	SD.	33	36	33	43	23	19	23	24
กรดไขมันระเหย (VFA)		เฉลี่ย	57	30	57	28	83	68	83	72
(มิลลิกรัม/ลิตร $CaCO_3$)	n = 13	SD.	13	12	13	11	10	9	10	10
อัตราส่วนกรดไขมันระเหย		เฉลี่ย		0.114		0.110		0.193		0.195
ต่อสภาพด่างทั้งหมด	n = 13	SD.		0.061		0.056		0.024		0.023
ของแข็งแขวนลอย (SS)		เฉลี่ย	58	13	58	14	35	11	35	10
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 8	SD.	9	3	9	5	15	3	15	5
ของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ (VSS)		เฉลี่ย	58	13	58	14	34	11	34	10
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 8	SD.	9	3	9	5	16	3	16	5
ปริมาณก๊าซทั้งหมด		เฉลี่ย		0		0		0		0
(ลิตร/วัน)	n = 13	SD.		0		0		0		0
ทีเคเอ็นไนโตรเจน (TKN)		เฉลี่ย	59	58	59	58	76	74	76	74
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 7	SD.	11	11	11	12	8	7	8	8
ซัลไฟด์ (Sulfide)		เฉลี่ย	3.0	1.0	3.0	0.8	4.7	1.0	4.7	1.4
(มิลลิกรัม/ลิตร)	n = 5	SD.	1.2	0.6	1.2	0.3	1.2	0.3	1.2	0.7

4.3 อุณหภูมิ พีเอช และโออาร์พี

ทุกชุดการทดลองอุณหภูมิน้ำออกมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเข้ามาก ถึงแม้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลของแบคทีเรียส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน แต่พลังงานที่สูญเสียไปนี้มีสัดส่วนไม่มากนักจึงเป็นผลให้อุณหภูมิในน้ำออกไม่แตกต่างจากน้ำเข้าอย่างชัดเจนและเป็นที่สังเกตว่าอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองในช่วง 26 – 28 องศาเซลเซียส ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 แบคทีเรียมีช่วงการทำงานที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ Mesophilic Bacteria ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 24 – 45 องศาเซลเซียส และ Thermophilic Bacteria ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 50 – 60 องศาเซลเซียส แบคทีเรียในถังส่วนใหญ่จึงน่าจะเป็นกลุ่ม Mesophilic แม้อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์จะไม่ใช่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำงาน แต่แบคทีเรียก็ยังคงทำงานได้ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซและความสามารถในการแตกตัวเป็นอิออนในน้ำด้วย เนื่องจากค่าคงที่ของเฮนรี่และค่าคงที่ในการแตกตัวเป็นอิออนของสารต่างๆ แปรตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดการทดลองอยู่ในช่วงแคบ ๆ ทำให้ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของแบคทีเรีย ผลต่อการละลายน้ำของก๊าซและผลต่อการแตกตัวของอิออนมีน้อยมาก

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยในสภาวะคงตัวของอุณหภูมิ พีเอช และโออาร์พี

ชุดการทดลอง เวลากัก – ความเร็วไหลขึ้น (ชม. - ม./ชม.)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		พีเอช		โออาร์พี (มิลลิโวลท์)
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำออก
6 ชม. - 0.5 ม./ชม.	26.4	26.5	7.83	7.83	-342
2 ชม. - 0.5 ม./ชม.	26.4	26.4	7.83	7.84	-347
2 ชม. - 3.5 ม./ชม.	28.1	27.7	8.15	7.98	-338
2 ชม. - 6.5 ม./ชม.	28.1	27.6	8.15	7.98	-337
2 ชม. - 10.0 ม./ชม.	27.8	27.4	8.37	8.13	-362
2 ชม. - 12.0 ม./ชม.	27.8	27.4	8.37	8.14	-364

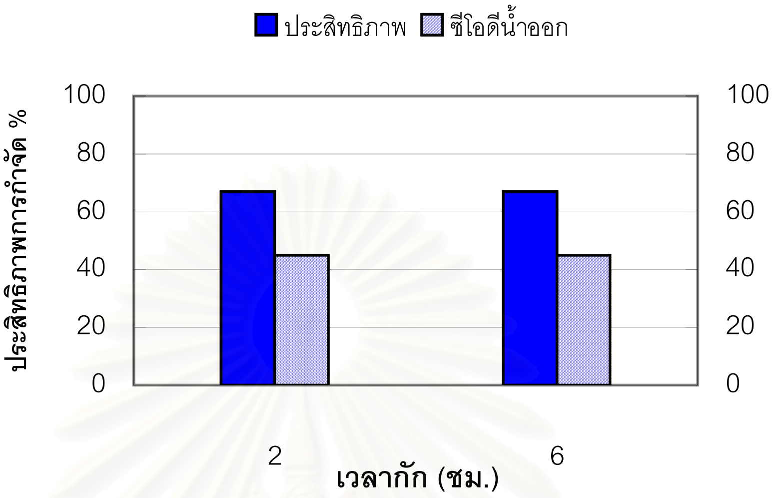
ค่าพีเอชน้ำออกในแต่ละชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7.80 – 8.20 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ถือว่าใกล้เคียงกับช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศโดยมีค่ามากกว่าช่วงที่เหมาะสมเล็กน้อยและไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบในระยะยาวโดยสามารถสังเกตได้จากเสถียรภาพของระบบที่ยังคงรักษาไว้ได้ในช่วงสภาวะคงตัวของแต่ละชุดการทดลอง น้ำออกจากระบบมีพีเอชลดลงเล็กน้อยเทียบกับพีเอชของน้ำเข้าในทุกชุดการทดลอง การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในน้ำออกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพด่างทั้งหมดซึ่งอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.7

ค่าโออาร์พีในแต่ละชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วง - 330 ถึง -370 มิลลิโวลท์ โดยความแตกต่างของโออาร์พีในแต่ละชุดการทดลองไม่ถือว่ามีนัยสำคัญแต่อย่างใด ทั้งนี้เพราะทุกการทดลองมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วงที่ต่ำมากและใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าโออาร์พีสำหรับกระบวนการไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง ช่วง - 300 ถึง - 500 มิลลิโวลท์ จึงแสดงว่าระบบยังเกิดปฏิกิริยาแบบไร้อากาศได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าโออาร์พีจากการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าระดับของออกซิเจนละลายน้ำระหว่าง 0.3 - 0.7 มก./ล. ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำเช่นน้ำเสียชุมชนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศแต่อย่างใด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การวิเคราะห์ผลของเวลากักที่มีต่อประสิทธิภาพระบบอีจีเอสบี

4.4.1 ซีโอดี

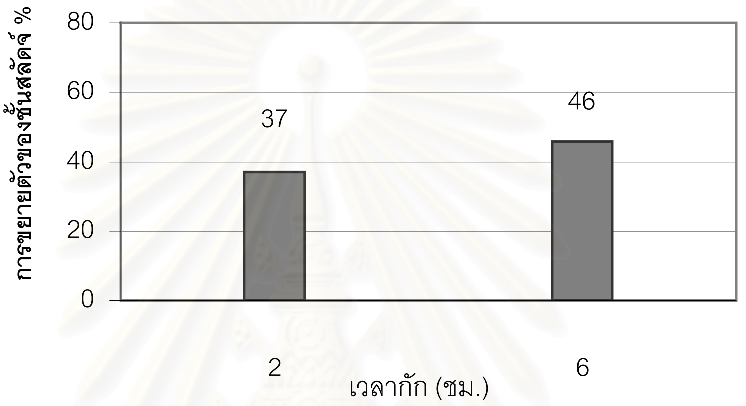


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

เมื่อพิจารณาจากรูป 4.21 พบว่าในการทดลองที่เวลากัก 2 ค่า คือ 6 และ 2 ชม. โดยกำหนดความเร็วไหลขึ้นเท่ากันคือ 0.5 ม./ชม. ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าที่เวลากักเพียง 2 ชม. ก็เพียงพอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี โดยที่ชุดการทดลองทั้ง 2 มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์ เท่ากัน และมีค่าซีโอดีน้ำออกเฉลี่ยเท่ากัน คือ 45 มก./ล. ถึงแม้ว่าจะเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์(อันเป็นผลเนื่องจากการลดเวลากัก)จาก 0.64 เป็น 1.92 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพของระบบก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันมากสาเหตุเนื่องมาจากน้ำเสียจากอาคารสูงที่กำจัดเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายรวมทั้งมีความเข้มข้นต่ำมากหรืออาจกล่าวว่ามีสัดส่วนปริมาณแบคทีเรียต่ออาหารสูงทำให้แบคทีเรียในระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบได้ทัน

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาประกอบด้วยคือ การกำหนดความเร็วการไหลในคอลัมน์เท่ากับ 0.5 ม./ชม. ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ดังแสดงในรูปที่ 4.22 สังเกตได้ว่าระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์มีผลต่อการกระจายสารอาหาร (mass transfer)สู่ชั้นในของเม็ดสลัดจ์ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีต่ำที่ถูกบำบัดด้วยระบบไร้อากาศแบบชั้นสลัดจ์ที่ความเร็วไหลขึ้นที่ต่ำมากจะเกิดการไหลในลักษณะลัดวงจร (channelling) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำลงไปด้วย โดยช่วงความเร็วไหลขึ้นที่เหมาะสมต่อน้ำเสียชุมชนทำให้เกิดการสัมผัส

อย่างทั่วถึงทั้งชั้นสลัดจ์ (Van Lier และคณะ, 1997) ปัจจัยที่มีผลต่อ mass transfer อย่างแท้จริงควรจะเป็นระดับการขยายตัว (degree of expansion) ของชั้นสลัดจ์มากกว่าความเร็วไหลขึ้น ทั้งนี้ถึงแม้ว่าความเร็วไหลขึ้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ด้วยได้แก่ ประเภทของน้ำเสียที่ถูกบำบัด ชนิดของสลัดจ์ ความสามารถในการตกตะกอนของสลัดจ์ ระบบกระจายน้ำเสียเข้าสู่ชั้นสลัดจ์ เป็นต้น



รูปที่ 4.22 การขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่เวลากักต่างๆ

จากรูปที่ 4.22 ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่เวลา 2 และ 6 ชม.มีค่าใกล้เคียงกันเพราะดำเนินระบบที่ความเร็วไหลขึ้นเท่ากันคือ 0.5 ม./ชม. การขยายตัวของชั้นสลัดจ์เปรียบเทียบกับความสูงชั้นสลัดจ์ในช่วงก่อนเดินระบบที่ 35 ซม. สังเกตได้ที่ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์เท่ากับ 37 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบอีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม. ยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเวลากัก 6 ชม. เสถียรภาพของระบบเมื่อพิจารณาประกอบกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช สภาพด่างทั้งหมด อุณหภูมิ และโออาร์พี พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. ซึ่งส่งผลให้ชั้นสลัดจ์มีการขยายตัวในช่วง 37 - 46 เปอร์เซ็นต์ ไม่แสดงผลที่มีนัยสำคัญต่อการกำจัดซีโอดีที่เวลากักมากกว่า 2 ชม. ทั้งนี้เหตุผลส่วนหนึ่งเนื่องจากน้ำเสียจากอาคารที่ใช้บำบัดมีค่าซีโอดีต่ำ อาจกล่าวได้ว่าระบบอีจีเอสบีที่มีระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์เล็กน้อยถึงแม้ว่าจะมีความเร็วไหลขึ้นที่ต่ำกว่าช่วงที่แนะนำจากงานวิจัยทั่วไป แต่ก็ยังคงแสดงประสิทธิภาพในการบำบัดที่มีเสถียรภาพได้

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบคือ อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ซึ่งในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในช่วง mesophilic เมื่อเปรียบเทียบจากงานวิจัยของ Van der Last และ Lettinga (1992) โดยการใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เวลากัก 1.5 - 2 ชม. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 77 - 84 เปอร์เซ็นต์ โดยในช่วงเวลากัก 2 - 6 ชม. สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าที่เวลากักที่สูงกว่า 2 ชม.จะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่แตกต่างกันมาจาก 2 ปัจจัยที่สำคัญคืออุณหภูมิและช่วงความเข้มข้นของซีโอดี พิจารณาจากอุณหภูมิที่มีค่าประมาณ 13 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียไร้อากาศจะเกิดขึ้นน้อยประกอบกับค่าซีโอดีน้ำเสียซึ่งอยู่ระหว่าง 300 - 400 มก./ล.ซึ่งมากกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ซีโอดี 100 - 200 มก./ล.) โดยความแตกต่างดังกล่าวจะสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลต่อพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ต่าง ๆ ของแบคทีเรียทำให้ปฏิกิริยาย่อยสลายซีโอดีเกิดขึ้นช้า ดังนั้นความแตกต่างของความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลากัก 2 ชม. จึงมีปริมาณน้อยกว่าที่เวลากัก 6 ชม.อย่างชัดเจน ขณะที่ในงานวิจัยนี้ดำเนินระบบที่อุณหภูมิ 26 - 28 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สภาวะอุณหภูมิช่วงนี้ย่อมสูงกว่าที่ 13 องศาเซลเซียส ทำให้เวลากัก 2 และ 6 ชม.มีประสิทธิภาพกำจัดแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

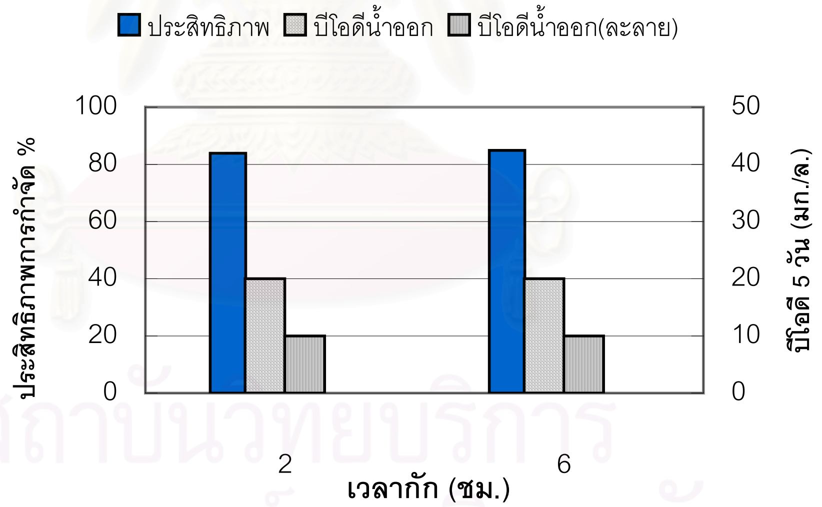
นอกจากนี้ปัจจัยที่อาจส่งผลให้การวิเคราะห์ค่าซีโอดีผิดพลาดโดยอาจมีค่าเกินจริงอาจเนื่องมาจากปริมาณซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารรบกวนการวิเคราะห์ซีโอดี โดยซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้สารโปแตสเซียมไดโครเมต ดังสมการ

$$S^{2-} + 2\,O_2 \text{ ----------> } SO_4^{2-}$$

ซัลไฟด์และออกซิเจนมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32 และ 64 ตามลำดับ ดังนั้นซัลไฟด์ 1 มก. จะมีค่าซีโอดีเท่ากับ 64/32 = 2 มก./ล. แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณซัลไฟด์ในน้ำเข้าและน้ำออกในทุกชุดการทดลองถือได้ว่าค่อนข้างต่ำโดยอยู่ในช่วง 4 – 6 มก./ล. และ 0.5 – 2.0 มก./ล. ในน้ำเข้าและน้ำออกตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลองประกอบกับข้อมูลค่าซีโอดีน้ำออกที่เวลากัก 2 และ 6 ชม. ค่าใกล้เคียงกันมากจึงไม่ต้องพิจารณาผลรบกวนอันเนื่องมาจากซัลไฟด์

4.4.2 บีโอดี 5 วัน

ที่เวลากัก 2 ค่า คือ 2 และ 6 ชม. โดยกำหนดความเร็วไหลขึ้นเท่ากับคือ 0.5 ม./ชม. พบว่าที่เวลากักที่ 2 ชม. ก็เพียงพอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี 5 วัน โดยที่เวลากัก 2 และ 6 ชม. มีประสิทธิภาพเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ 85 และ 84 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ค่าบีโอดี 5 วัน(ทั้งหมด)และค่าบีโอดี 5 วัน(ละลาย)ของน้ำออกจากระบบพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากันคือ 20 มก./ล. และ 10 มก./ล. ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบใกล้เคียงกันมากที่เวลากักแตกต่างกันเนื่องมาจากน้ำเสียจากอาคารสูงที่กำจัดเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย แบคทีเรียแบบไร้อากาศจึงสามารถย่อยได้อย่างรวดเร็วแม้ในเวลาที่สั้นเพียง 2 ชม. ซึ่งเป็นเหตุผลที่คล้ายคลึงกันกับการกำจัดซีโอดี จากข้อมูลบีโอดี 5 วัน ละลายที่วัดในสภาวะคงตัวของระบบที่เวลากัก 2 และ 6 ชม. ไม่แตกต่างกันคือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10 มก./ล. แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่สามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ต่ำมากโดยนอกจากเหตุผลของอุณหภูมิสูงซึ่งมีผลต่อค่าทางจลศาสตร์ของแบคทีเรียแล้วการที่ไม่ได้ทำการควบคุมการระบายสลัดจ์ ทำให้อายุสลัดจ์ในระบบมีค่าสูงมากซึ่งเป็นเหตุผลว่าสารอินทรีย์ในน้ำออกในรูปบีโอดี 5 วัน(ละลาย)มีค่าต่ำมาก



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน

สารอินทรีย์ในน้ำออกในรูปบีโอดี 5 วัน(ละลาย)มีค่าต่ำถึง 10 มก./ล.อันเป็นผลเนื่องจากอายุสลัดจ์สูงมากแต่ระบบก็ยังไม่สามารถบำบัดจนกระทั่งบีโอดีมีค่าต่ำจนถึงศูนย์ได้ ทั้งนี้อธิบายได้โดยสมการของโมโนด์ (Metcalf และ Eddy, 1991) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในเชิงไคเนติกดังนี้

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

μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (เวลา $^{-1}$)

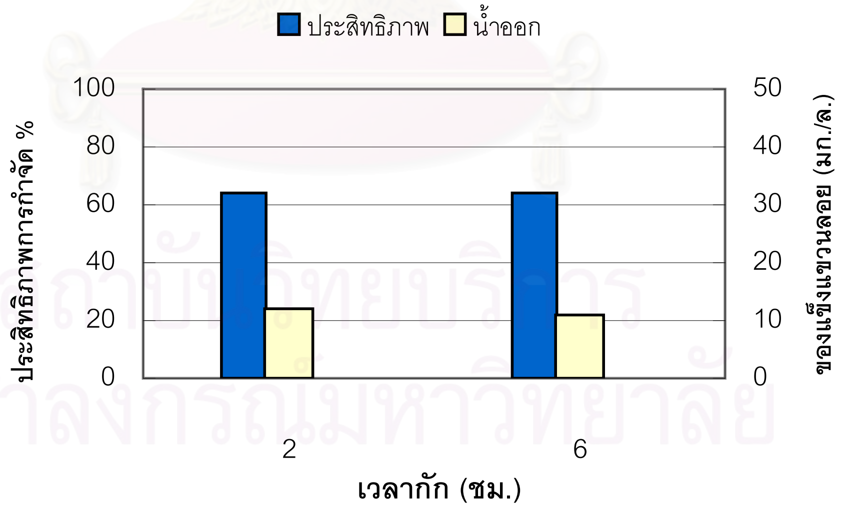
μ_{max} = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (เวลา $^{-1}$)

S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่พิจารณาในระบบ (มก./ล.)

K_S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่พิจารณาเมื่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ μ_{max} (มก./ล.)

จากสมการโมโนด์สามารถอธิบายได้ว่าการไม่มีสารอาหารหรือสารรับอิเล็กตรอนเหลือในตัวกลางที่มีแบคทีเรียอยู่ (S = 0) ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียไม่มีอัตราการเจริญเติบโต (μ = 0) หรือแบคทีเรียตาย แสดงว่าจำเป็นต้องมีสารอาหารในปริมาณหนึ่งที่แบคทีเรียจำเป็นต้องใช้เหลืออยู่ในตัวกลางเพื่อให้เกิดการดึงสารอาหารเข้าสู่เซลนั่นเอง

4.4.3 ของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่เวลากัก 2 และ 6 ชม. ไม่แตกต่างกันมากโดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10 – 15 มก./ล. และพบว่าของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบ

ทั้งหมดเป็นของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ซึ่งแสดงว่าเป็นเซลของแบคทีเรียและปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบไม่ได้ไม่มีผลสัมพันธ์กับเวลากักถึงแม้ว่าที่เวลากักที่ต่างกันจะส่งผลให้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันแต่เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียมีค่าต่ำมากทำให้อัตราการผลิตก๊าซต่ำมาก ดังนั้นการที่ของแข็งแขวนลอยจะหลุดออกไปพร้อมก๊าซจึงไม่ปรากฏอย่างชัดเจน ที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดเกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ต่ำมาก ดังนั้นปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปจึงเป็นฟลอคซึ่งมีขนาดเบามาก นอกจากนี้การที่ลักษณะน้ำเสียในถังพักของอาคารซึ่งมีขนาดใหญ่ทำให้มีระยะเวลากักนานพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยจึงทำให้มีค่าไม่สูงนัก (30 - 60 มก./ล.) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนสำคัญที่ระบบไม่รับภาระของแข็งแขวนลอยสูงเกินไป โดยระบบอีจีเอสบีไม่เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยที่สูงมาก (Seghezzo และคณะ, 1998) อย่างไรก็ตามลักษณะของสลัดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเม็ดสลัดจ์ที่ค่อนข้างสมบูรณ์และมีการดักของแข็งแขวนลอยที่เข้ามาในระบบได้ดีโดยสังเกตได้จากชั้นสลัดจ์ส่วนล่างซึ่งมีกลุ่มของแข็งแขวนลอยที่ย่อยสลายได้ยากเกาะอยู่รอบเม็ดสลัดจ์

4.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยระบบยูเอเอสบีที่ความเร็วไหลขึ้นต่ำ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความเร็วไหลขึ้นและเวลากักจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย, สถานที่	เวลากัก (ชม.)	ความเร็ว (ม./ชม.)	ความสูงต่อความกว้าง	อุณหภูมิ (^{0}c)	น้ำเข้า (มก./ล.)			คุณภาพน้ำออก (มก./ล.)		
					COD	BOD	SS	COD	BOD	SS
งานวิจัยนี้	2	0.50	19.8	27	137	72	34	40	20	12
Haskoning, อินเดีย 1996 (Seghezzo และคณะ, 1998)	6	0.67	6.5	20	404	205	362	121	72	91
Latit Kumar Agrawal, ไทย 1991	8	0.50	19.0	28	500	-	-	75	-	-
Vierira และ Garcia, บราซิล 1992	11	0.44	26.9	20	403	249	182	149	84	45
Schellinkhout และCollazos,โคลัมเบีย 1992	19	0.21	3.9	-	590	271	-	166	57	-
Lettinga และคณะ, เนเธอร์แลนด์ 1983	22	0.14	1.9	20	248	-	-	80	-	-

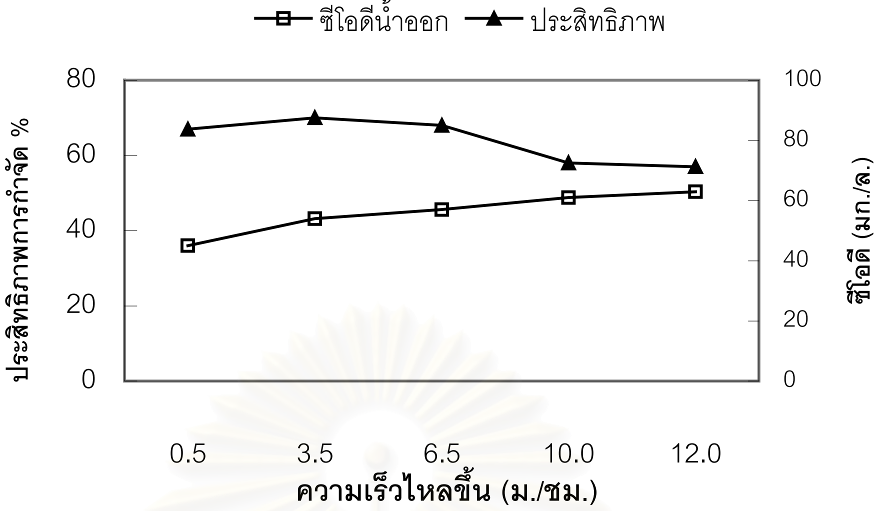
จากการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่บำบัดน้ำเสียชุมชนที่ความเร็วไหลขึ้นที่ใกล้เคียงกันพบว่าคุณภาพน้ำออกจากระบบมีค่าสูงกว่าในงานวิจัยนี้ถึงแม้ว่าจะได้กำหนดเวลากักที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้ โดยสังเกตได้ว่าในงานวิจัยอื่นมีค่าซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้ 2 - 4 เท่า ถึงแม้ว่าได้การเดินระบบที่ความเร็วไหลขึ้นที่ใกล้เคียงกับ 0.5

ม./ชม. แต่กลับพบว่าพารามิเตอร์ในน้ำออกมีค่าสูงกว่า จึงเป็นไปได้ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์อาจไม่เหมาะสมต่อ mass transfer ที่ดีโดยเฉพาะในประเทศที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งแบคทีเรียแบบไร้อากาศมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้ามากหรืออาจเป็นไปได้ว่าการที่น้ำเสียจากแหล่งอื่นซึ่งมีสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงรวมทั้งของแข็งแขวนลอยในปริมาณสูงก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความสามารถในการบำบัดของระบบมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำให้ค่าซีโอดี บีโอดีและของแข็งแขวนลอยต่ำไปกว่านี้ได้ เป็นที่สังเกตว่าในงานวิจัยนี้ลักษณะถังปฏิกรณ์ของงานวิจัยนี้มีพื้นที่หน้าตัดต่อจุดกระจายน้ำที่ต่ำมาก ซึ่งในระบบยูเอเอสบีทั่วไปจะแนะนำให้ใช้อัตราส่วนพื้นที่ต่อจุดกระจายน้ำระหว่าง 1 ตร.ม.ต่อจุด (สมพงษ์, 2536) ในถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างต่ำหรือมีพื้นที่หน้าตัดมาก การไหลของน้ำเสียสามารถเกิดการไหลแบบลัดวงจรผ่านชั้นสลัดจ์เนื่องจากชั้นสลัดจ์มีการจับตัวกันที่หนาแน่นในระดับหนึ่งประกอบกับการที่พื้นที่หน้าตัดกว้างการกระจายของน้ำเสียไม่ทั่วถึงอันส่งผลต่อระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ ดังนั้นความเร็วไหลขึ้นจากงานวิจัยอื่นที่ใช้ค่าความเร็วไหลขึ้นใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ คือ 0.5 ม./ชม. นอกเหนือจากความเร็วไหลขึ้นที่เพียงพอต่อระดับการขยายตัวและ mass transfer ที่ดีในชั้นสลัดจ์แล้วจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยของพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียประกอบด้วย

4.5 การวิเคราะห์ผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพระบบอีจีเอสบี

4.5.1 ซีโอดี

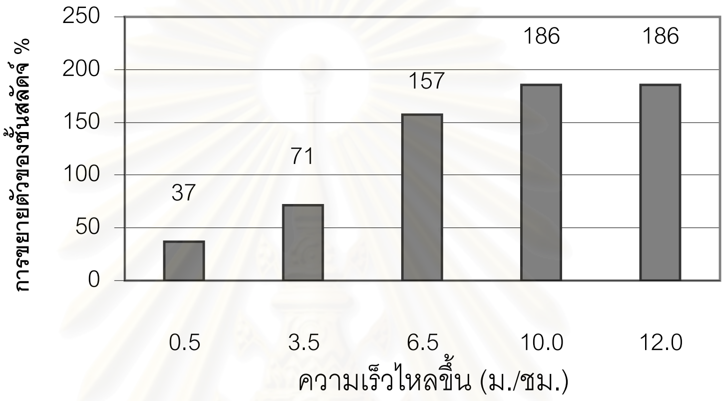
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.25 พบว่าที่เวลากักคงที่ 2 ชม. ผลของการแปรค่าความเร็วไหลขึ้นแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี โดยที่ความเร็วสูงขึ้นค่าซีโอดีในน้ำออกจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งคาดว่าเป็นเพราะความเร็วที่สูงขึ้นทำให้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากหลุดออกไปกับน้ำออกมากขึ้นโดยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากเหล่านี้อาจเกิดจากของแข็งแขวนลอยที่เกาะติดอยู่ในชั้นสลัดจ์และถูกย่อยสลายเป็นช่วงระยะเวลานานทำให้มีสารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายได้ยากเหลือค้างในชั้นสลัดจ์หรืออาจเกิดจากเซลแบคทีเรียที่ถูกย่อยสลายอยู่ในชั้นสลัดจ์และเกิดเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากรวมไปถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในน้ำเข้า นอกจากนั้นการเวียนกลับของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้มีผลต่อค่าซีโอดีน้ำออกโดยเฉพาะในช่วงที่ความเร็วไหลขึ้นสูงๆ ระบบไม่สามารถรองรับภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากซึ่งถูกเวียนกลับมาในสัดส่วนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียที่สูบเข้ามาในระบบ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

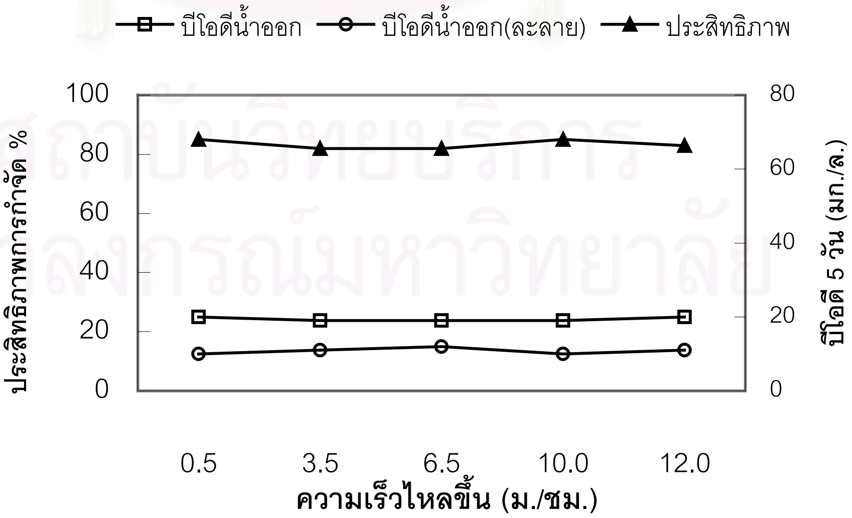
ในแง่ของการวิเคราะห์ซีโอดีในห้องปฏิบัติการซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำออกซึ่งก็ไม่น่ามีผลเมื่อพิจารณาประกอบกับค่าของซัลไฟด์ในน้ำออกในทุกชุดการทดลองซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งถึงแม้ว่าในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของน้ำออกซึ่งไม่ได้ทำการไล่ซัลไฟด์ออกก่อนการวิเคราะห์ แต่ก็จะไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของความเข้มข้นซีโอดีในน้ำออก นอกเหนือจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณของมีเทนที่ละลายน้ำสังเกตพบว่าในชุดการทดลองที่ทำการศึกษาการแปรผันเวลากักมีค่าซีโอดีในน้ำเข้าเฉลี่ย 139 มก./ล. ในขณะที่การทดลองที่ทำการศึกษาการแปรผันความเร็วไหลขึ้นมีค่าซีโอดีในน้ำเข้าสูงกว่าประมาณ 20 - 40 มก./ล. และเมื่อพิจารณาประกอบกับข้อมูลบีโอดี 5 วันในแต่ละชุดค่าความเร็วไหลขึ้น (ซึ่งจะกล่าวในห้อข้อถัดไป) ปรากฏทุกชุดการทดลองว่ามีค่าบีโอดี 5 วันประมาณ 20 มก./ล. โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงอาจจะเป็นไปได้ว่ามีก๊าซมีเทนที่ละลายน้ำบางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำออกอันเนื่องมาจากในชุดการทดลองนี้มีซีโอดีน้ำเข้าเฉลี่ยสูงกว่าในชุดการทดลองที่ทำการศึกษาการแปรผันเวลากักดังนั้นปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดจึงมีมากกว่านั่นเอง ทำให้ปริมาณมีเทนที่ละลายจึงมากกว่าไปด้วยโดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าบีโอดี 5 วัน จะต้องใช้เวลาเตรียมตัวอย่างนานกว่าทำให้มีเทนที่ละลายน้ำลอยไปสู่อากาศได้หมด ขณะที่การวัดซีโอดีจะใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นกว่าจึงอาจจะเป็นไปได้ที่จะมีมีเทนละลายน้ำบางส่วนหลงเหลือทำให้ค่าซีโอดีที่วัดได้สูงขึ้น

ปัจจัยอันเนื่องจากระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่แปรผันตามความเร็วไหลขึ้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าที่ความเร็วไหลขึ้น 10.0 และ 12.0 ม./ชม.ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์สูงขึ้นถึงชุดตกตะกอน (GSS) ซึ่งอยู่บนสุดของถังปฏิกรณ์ซึ่งแสดงถึงการขยายตัวจนเต็มถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่กล่าวมาข้างต้นกลับไม่พบค่าซีโอดีที่ต่ำลงในน้ำออกถึงแม้ว่าจะมีระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า mass transfer จะเกิดขึ้นเต็มที่สำหรับการขยายตัวของสลัดจ์ในระดับหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นกับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์

4.5.2 บีโอดี 5 วัน

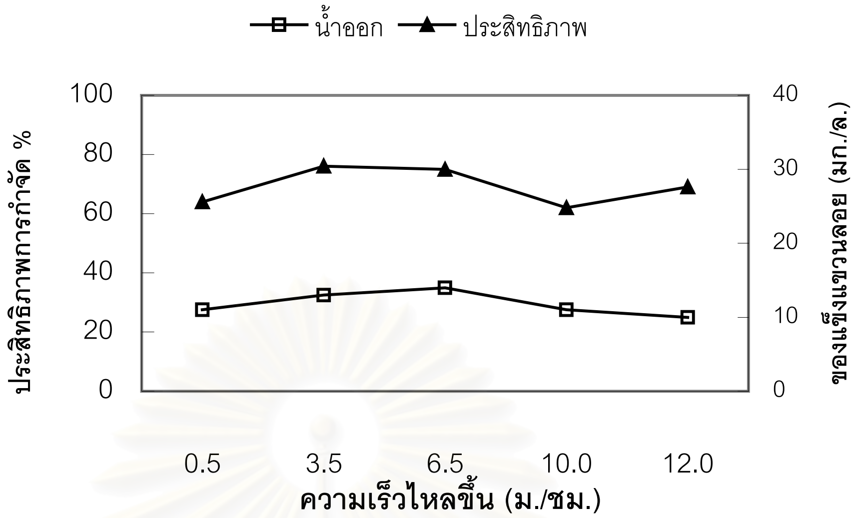


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี 5 วัน

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต่อความเร็วไหลขึ้นกับบีโอดี 5 วัน(ทั้งหมด) ค่าบีโอดี 5 วัน(ละลาย)และประสิทธิภาพการกำจัด สามารถสังเกตได้ว่ามีผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับชุดการทดลองแรกซึ่งเปลี่ยนแปลงเพียงเวลากัก โดยทุกการทดลองที่ทำการเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นกำหนดให้ค่าเวลากักคงที่เท่ากันหมด คือ 2 ชม. จะสังเกตได้ว่าไม่ว่าจะเป็นการกำจัดซีโอดีหรือบีโอดี 5 วัน ที่แต่ละความเร็วการไหลขึ้น ตั้งแต่ 0.5 ถึง 12.0 ม./ชม. พบว่าผลการทดลองใกล้เคียงกันมากโดยสังเกตได้ว่าที่ความเร็วการไหลขึ้นที่สูงขึ้นค่าบีโอดี 5 วัน(ทั้งหมด) และค่าบีโอดี 5 วัน(ละลาย)ในน้ำออกจะมีค่าเท่ากันทุกชุดการทดลองซึ่งคาดว่าเป็นเพราะปริมาณของสลัดจ์ในระบบเทียบกับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียชุมชนมีค่าสูงมากประกอบกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแม้จะอยู่ในช่วง Mesophilic แต่ก็ถือว่าเหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียและเป็นเหตุผลว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายของแบคทีเรียเกิดขึ้นได้ดีทำให้ปัจจัยอันเนื่องมาจากการสัมผัสที่ดีของน้ำเสียและแบคทีเรียหรือ mass transfer ที่ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่สูงขึ้นไม่แสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งระดับการขยายตัวที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. ก็เพียงพอสำหรับ mass transfer อันทำให้ ค่าบีโอดี 5 วัน(ละลาย)มีค่าถึง 10 มก./ล. เหมือนในชุดการทดลองแรกซึ่งแสดงว่าเป็นระดับความเข้มข้นของสารอาหารต่ำสุดที่แบคทีเรียในระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังอธิบายด้วยสมการโมโนด์ในหัวข้อ 4.4.2

ปัจจัยที่น่าจะมีความสำคัญต่อการกำจัดบีโอดี 5 วันนอกเหนือจากระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ สัดส่วนปริมาณของสลัดจ์ต่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอุณหภูมิก็คือองค์ประกอบของน้ำเสียซึ่งส่งผลความความเร็วในการย่อยสลายโดยแบคทีเรียแบบไร้อากาศ น้ำเสียบางประเภทถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นในรูปซีโอดีต่ำแต่ด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากจึงทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแบคทีเรียเกิดขึ้นได้ช้าดังนั้นการเพิ่มความเร็วไหลขึ้นในชั้นสลัดจ์จึงมีแนวโน้มต่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และยังรวมไปถึงในประเทศในเขตเมืองหนาวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส พบว่าการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว (pre-settled sewage) ด้วยระบบอีจีเอสบีที่ความเร็วไหลขึ้นสูงมากจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้น (Lettinga และคณะ, 1993)

4.5.3 ของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกในช่วงสภาวะคงตัวในทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยอยู่ในช่วงระหว่าง 10 – 15 มก./ล. และพบว่าของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดเป็นของแข็งแขวนลอยโวลาไทล์ซึ่งแสดงว่าเป็นเซลของแบคทีเรียและปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบไม่ได้มีผลสัมพันธ์กับเวลากักหรือความเร็วไหลขึ้นโดยสลัดจ์ที่ยังคงถูกรักษาในถังปฏิกรณ์เป็นสลัดจ์ที่มีความหนาแน่นสูงและมีความเร็วในการตกตะกอนได้ดีทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีค่าต่ำเนื่องมาจากการที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในทุกการทดลองอยู่ในช่วงที่ต่ำมากดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าต่ำมาก ดังนั้นปริมาณของแข็งแขวนลอยที่จะลอยขึ้นไปพร้อมกับก๊าซจึงต่ำมากโดยสามารถสังเกตได้จากบริเวณชั้นน้ำใสที่อยู่เหนือชั้นสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นการลอยตัวของสลัดจ์ที่เป็นเม็ด (granule) แต่สามารถเห็นการลอยตัวของสลัดจ์ที่เป็นฟลอคได้เล็กน้อยโดยที่ไม่พบฟองอากาศที่ลอยในชั้นน้ำใสเลย ดังนั้นจึงแสดงว่าสลัดจ์แบบฟลอคที่หลุดลอยออกไปเป็นเพราะภาระทางชลศาสตร์คือความเร็วไหลขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญนั่นเอง ส่วนสาเหตุที่ปริมาณของปริมาณของแข็งแขวนลอยที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเร็วไหลขึ้นในช่วงสภาวะคงตัวคาดว่าเป็นเพราะของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปทั้งหมดเป็นเซลที่เกิดขึ้นจากภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เท่ากันซึ่งหมายความว่าปริมาณเซลที่เกิดขึ้นต่อวันย่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถหาค่ายีลด์ที่ปรากฏของสลัดจ์ได้โดยพิจารณาที่สภาวะคงตัวของแต่ละระบบซึ่งมีค่าซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำออกคงที่ในแต่ละชุดการทดลอง และแสดงว่าปริมาณ

ของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบต่อวันจึงมีค่าเท่ากับปริมาณของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นต่อวัน ดังรายละเอียด ดังนี้

$$\text{ยีลด์ปรากฏ} = \frac{\text{ปริมาณเซลที่เกิดขึ้นต่อวัน (มก./วัน)}}{\text{ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดต่อวัน (มก./วัน)}}$$

$$= \frac{\text{VSS ในน้ำออก x อัตราการไหล}}{\text{ซีโอดีที่ถูกกำจัด x อัตราการไหล}}$$

$$= \frac{\text{VSS ในน้ำออก}}{\text{ซีโอดีที่ถูกกำจัด}} \quad \frac{\text{(มก.VSS)}}{\text{(มก.ซีโอดี)}}$$

ยีลด์ปรากกฏในแต่ละชุดการทดลองเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองจริงในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

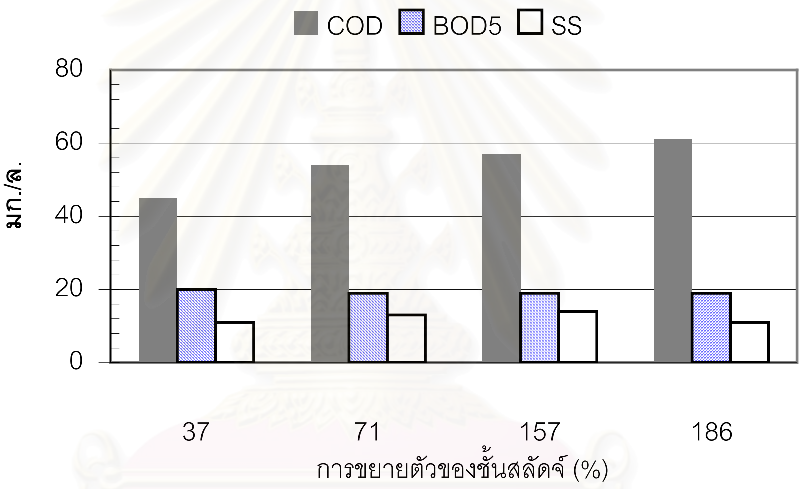
ตารางที่ 4.6 ยีลด์ปรากฏที่คำนวณได้ในแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง เวลากัก – ความเร็วไหลขึ้น (ชม. - ม/ชม.)	VSS ในน้ำออกจากระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ยีลด์ปรากฏ (มก.VSS / มก.ซีโอดีถูกกำจัด)
6 ชม. - 0.5 ม./ชม.	12	139-45 = 94	0.13
2 ชม. - 0.5 ม./ชม.	11	139-45 = 94	0.12
2 ชม. - 3.5 ม./ชม.	13	184-54 = 94	0.10
2 ชม. - 6.5 ม./ชม.	14	184-57 = 94	0.11
2 ชม. - 10.0 ม./ชม.	11	156-61 = 94	0.12
2 ชม. - 12.0 ม./ชม.	10	156-62 = 94	0.11

สังเกตได้ว่ายีลด์ปรากฏที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 มก.VSS / มก.ซีโอดีถูกกำจัด และซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยีลด์ของแบคทีเรียแบบไร้อากาศทั่วไปซึ่งอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.15 มก.VSS / มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด (Van Haandel และ Lettinga, 1994) และแสดงให้เห็นว่าระบบดำเนินอยู่ภายใต้สภาวะคงตัวที่มีปริมาณเซลที่ออกจากระบบเท่ากับปริมาณเซลที่เกิดขึ้นในทุกการทดลอง

4.5.4 การขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่มีต่อพารามิเตอร์ในน้ำออก

ระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่สัดส่วนสูงขึ้นไม่แสดงผลกระทบต่อพารามิเตอร์ในน้ำออกอย่างชัดเจนนักยกเว้นค่าซีโอดีในน้ำออกซึ่งเป็นเพราะเกิดการรับภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากจากการเวียนกลับของน้ำออกในสัดส่วนที่สูงขึ้น โดย mass transfer ที่ถูกจำกัดที่ระดับการขยายตัวสลัดจ์ที่สูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารอาหารในรูปบีโอดี 5 วันละลายต่ำสุดที่ถูกจำกัดไว้ให้เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังอธิบายในสมการของโมโนด์ และของแข็งแขวนลอยที่สภาวะคงตัวของระบบมีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเซลที่เกิดขึ้นซึ่งใกล้เคียงกันอันเป็นผลจากภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์การขยายตัวของชั้นสลัดจ์กับพารามิเตอร์ในน้ำออก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ก๊าซชีวภาพ

ในช่วงแรกของการทดลองช่วงที่ 1 สามารถวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวันได้เป็นระยะเวลาสั้นๆ โดยมีปริมาณก๊าซเฉลี่ยที่เวลากัก 2 ชม.เท่ากับ 8 มล. ต่อวัน มีปริมาณก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 40.5 และ 59.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับและที่เวลากัก 6 วัดก๊าซได้เฉลี่ยเท่ากับ 22 มล. ต่อวัน มีปริมาณก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 39.2 และ 60.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแต่หลังจากที่ได้ทำการดำเนินระบบในการทดลองช่วงที่ 1 จนเข้าสู่สภาวะคงตัวกลับไม่พบก๊าซในชุดดักก๊าซ รวมทั้งการทดลองในช่วงที่ 2 และ 3 ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีปริมาณ

ก๊าซเกิดขึ้นในอุปกรณ์เก็บก๊าซอย่างชัดเจน ทั้งนี้ปริมาณซีโอดีที่ถูกบำบัดในแต่ละวัน คือประมาณ 2.64 กรัม/วัน ซึ่งควรจะมีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นจากการที่สารอินทรีย์ถูกแบคทีเรียแบบไร้อากาศย่อยสลาย ผู้วิจัยจึงคาดว่าก๊าซหลักซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาแบบไร้อากาศได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดน่าจะละลายและออกจากระบบไปพร้อมกับน้ำออก ซึ่งลักษณะดังกล่าวมักจะพบในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ(Van Haandel และ Lettinga, 1994)ในช่วงต้นของการทดลองที่ 1 ที่พบปริมาณก๊าซเล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจากสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งซึ่งย่อยสลายได้ช้าจากน้ำเสียโรงงานเส้นก๋วยเตี๋ยวที่เหลือค้างอยู่ในชั้นสลัดจ์ นอกจากนี้กรณีที่เกิดซัลเฟตรีดักชั่นทำให้มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นจะส่งผลให้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้น้อยลงเนื่องจากคาร์บอนบางส่วนจะถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียรีดิวส์ซัลเฟต แต่เมื่อทำการวัดค่าซัลเฟตในช่วงการทดลองชุดสุดท้ายในน้ำเข้าและน้ำออกพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากจึงแสดงว่าไม่เกิดซัลเฟตรีดักชั่นซึ่งอาจเนื่องมาจากสัดส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาดังกล่าว โดยสัดส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่เหมาะสมต่อการเกิดซัลเฟตรีดักชั่นอยู่ระหว่าง 7 - 10 ในขณะที่สัดส่วนในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 12 - 15 ประกอบกับน้ำเสียชุมชนจัดเป็นน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นปริมาณก๊าซที่เกิดหลักๆมี 2 ชนิดคือ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ก๊าซต่างๆ จะมีคุณสมบัติต่างกันในแง่ของการละลายน้ำพบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำได้ดีที่สุดในกลุ่มและยังสามารถแตกตัวเป็นอิออนในน้ำได้ด้วย ส่วนก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำรองลงมาคือ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนตามลำดับ จากความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกันนี่เองทำให้ปริมาณก๊าซที่วัดได้โดยอุปกรณ์เก็บก๊าซมีค่าต่างกันแม้ว่าจะผลิตในจำนวนโมลที่เท่ากันก็ตาม ดังนั้นถ้าระบบสามารถผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนได้น้อยก็อาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณก๊าซที่วัดได้ก็จะน้อยหรือไม่สามารถวัดได้เลยเพราะก๊าซที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้ทั้งหมดนั่นเอง

เพื่อทำการพิสูจน์ว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศละลายในน้ำจึงได้นำสมมติฐานการคำนวนหาเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของก๊าซชีวภาพซึ่งกล่าวถึงในงานวิจัยของโสภา ชินเวชกิจวาณิชย์ (2540) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

หลักการคำนวณปริมาณก๊าซที่ละลายน้ำโดยการพิจารณาโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่เกิดจากการกำจัดคาร์บอนในสารอินทรีย์และทำการแปลงโมลของก๊าซเป็นน้ำหนักและปริมาตรก๊าซแล้วทำการกำหนดสมการ 2 สมการขึ้นมา ได้แก่

1. สมการก๊าซละลายน้ำคำนวณโดยการหาความดันพาร์เชียลของก๊าซนั้นๆ ตามสัดส่วนซึ่งอยู่ในเทอมของคาร์บอนที่ถูกกำจัด(C) เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (%CO_2) และเปอร์เซ็นต์มีเทนละลายน้ำ (%CH_4)

2. สมการการละลายน้ำของก๊าซของ Henry's Law ซึ่งอยู่ในเทอมของ C %CO_2 และ %CH_4 เช่นเดียวกัน

จากนั้นทำการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่าง 2 สมการและแทนค่าคาร์บอนที่ถูกกำจัด (C) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (%CO_2) และเปอร์เซ็นต์มีเทนละลายน้ำ (%CH_4) การเริ่มต้นสมการโดยกำหนดสมมติฐานที่น้ำเสียชุมชนถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรดจนได้กรดอะซิติกซึ่งจะถูกย่อยสลายต่อไปโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนดังสมการ

$$CH_3COOH \text{ ----------> } CH_4 + CO_2$$

กำหนดคาร์บอนของสารอินทรีย์ (ซึ่งเปลี่ยนเป็นอะซิติก)ถูกกำจัดไป C/12 มิลลิโมล ดังนั้นตามสมการจะเกิดก๊าซมีเทน 0.5C/15 มิลลิโมล และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5C/15 มิลลิโมล ทำการแปลงปริมาณก๊าซจากหน่วยมิลลิโมลเป็นมิลลิลิตรโดยข้อกำหนดของก๊าซ 1 มิลลิโมลมีปริมาตรเท่ากับ 24.0 มล. ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาน้ำหนักและปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณและปริมาตรของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยการคำนวณ

ชนิดก๊าซ	ปริมาณก๊าซ (มก.) (มิลลิโมลก๊าซ x มวลโมเลกุลก๊าซ)	ปริมาตรก๊าซ (มล.) (มิลลิโมลก๊าซ x 24มล. ที่ 1 ATM 20 ^{0}C)
มีเทน	= 0.5C x 16 / 12 = 0.67C	= 0.5C x 24 / 12 = C
คาร์บอนไดออกไซด์	= 0.5C x 44 / 12 = 1.83C	= 0.5C x 24 / 12 = C

กำหนดเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำเท่ากับ (%CO_2) จะได้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ = 1.83C(%CO_2) /100 มก…….(1)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนผิวน้ำ = C(100- (%CO_2)) /100 มล.

จากนั้นกำหนดให้มีเทนไม่ละลายน้ำเลย

ก๊าซมีเทนบนผิวน้ำ = C มล.

จะได้

ความดันพาร์เชียลของคาร์บอนไดออกไซด์ = $\frac{C(100-(\%CO_2))/100}{[C(100-(\%CO_2))/100]+C}$

= [100 - (%CO_2)] / [200 - (%CO_2)]

จากกฎการละลายน้ำของ Henry's Law

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ = 1723 x ความดันพาร์เชียลCO_2

= 1723 x (100-(%CO_2)) / [200-(%CO_2)]

ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจาก Henry's Law เท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำในสมการที่ (1) จะได้

1723 x(100-(%CO_2)) / [200-(%CO_2)-(%CH_4)] = 1.83C(%CO_2) /100

$$(100-(\%CO_2)) = \frac{1.83C(\%CO_2) \times 200}{100 \times 1723} - \frac{1.83C(\%CO_2)^2}{100 \times 1723}$$

เทอมสุดท้ายฝั่งขวาของสมการมีค่าน้อยมากกำหนดให้เป็นศูนย์ ดังนั้น

$$(100-(\%CO_2)) = \frac{1.83C(\%CO_2) \times 200}{100 \times 1723}$$

$$(\%CO_2) = 100 / (0.00212C + 1) \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

สมการที่ (2) ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจึงต้องกำหนดสภาวะที่สมมติให้มีเทนไม่มีการละลายน้ำ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง แต่จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้คือการแทนค่าคาร์บอนที่ถูกกำจัดเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำเบื้องต้นเพื่อนำไปใช้ Trial & Error ในสมการที่ถูกต้องซึ่งกำหนดสภาวะที่มีเทนละลายด้วยดังแสดงการคำนวณถัดจากนี้

<u>การจัดรูปสมการการละลายน้ำของก๊าซเมื่อมีการละลายน้ำของมีเทนด้วย</u>

จากนั้นพิจารณาเปอร์เซ็นต์มีเทนละลายน้ำเท่ากับ $(\%CH_4)$ จะได้

ก๊าซมีเทนละลายน้ำ = $0.67C(\%CH_4)/100$ มก.......(3)

ก๊าซมีเทนบนผิวน้ำ = $C(100-(\%CH_4))/100$ มล.

<u>สมการการละลายน้ำของมีเทน</u>

ความดันพาร์เชียลของมีเทน

$$= \frac{C(100-(\%CH_4))/100}{[C(100-(\%CO_2))/100]+[C(100-(\%CH_4))/100]}$$

$$= [100-(\%CH_4)]/[200-(\%CO_2)-(\%CH_4)]$$

จากกฎการละลายน้ำของก๊าซของ Henry's Law

ก๊าซมีเทนละลายน้ำ = 23.7 x ความดันพาร์เชียลCH_4

$$= 23.7 \times [100-(\%CH_4)]/[200-(\%CO_2)-(\%CH_4)]$$

ซึ่งก๊าซมีเทนละลายน้ำจาก Henry's Law เท่ากับก๊าซมีเทนละลายน้ำในสมการที่ (3) จะได้

$$23.7 \times [100-(\%CH_4)]/[200-(\%CO_2)-(\%CH_4)] = 0.67C(\%CH_4)/100$$

$$100 = \frac{0.67C(\%CH_4) \times [200-(\%CO_2)-(\%CH_4)]}{100 \times 23.7} + (\%CH_4) \quad \text{....(4)}$$

<u>สมการการละลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์</u>

ความดันพาร์เชียลของคาร์บอนไดออกไซด์

$$= \frac{C(100-(\%CO_2))/100}{[C(100-(\%CO_2))/100]+[C(100-(\%CH_4))/100]}$$

$$= [100-(\%CO_2)]/[200-(\%CO_2)-(\%CH_4)]$$

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ = 1723 x ความดันพาร์เชียลCO_2

$$= 1723 \times (100-(\%CO_2))/[200-(\%CO_2)-(\%CH_4)]$$

ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจาก Henry's Law เท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำในสมการที่ (1) จะได้

$$1723 \times (100-(\%CO_2)) / [200-(\%CO_2)-(\%CH_4)] = 1.83C(\%CO_2)/100$$

$$100 = \frac{1.83C(\%CO_2) \times [200 - (\%CO_2)-(\%CH_4)]}{100 \times 1723} + (\%CO_2) \qquad \ldots\ldots(5)$$

จากรายการคำนวณข้างต้นจะพบว่าสามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ละลายน้ำ โดยการกำหนดค่าคาร์บอนที่ถูกกำจัด(C)ในหน่วย มก./ล. ในสมการที่ (2) ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ ($\%CO_2$) ซึ่งต้องนำไป Trial & Error ใน สมการที่ (4) เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์มีเทนละลายน้ำ ($\%CH_4$) จากนั้นนำค่า ($\%CH_4$) ที่คำนวณได้ แทนค่าใน สมการที่ (5) ซึ่งค่า ($\%CO_2$) จะได้ไม่เท่ากันกับ ($\%CO_2$) ในสมการที่ (2) จึงต้องทำการนำค่า ($\%CO_2$) ใหม่นี้ ไปแทนใน (4) อีกครั้ง ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่า ($\%CO_2$) และ ($\%CH_4$) ที่ได้จาก 2 สมการจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัด (C) = 40 มก./ล.

ตารางที่ 4.8 การคำนวณการแทนค่าโดยการ Trial & Error ในสมการการละลายน้ำของก๊าซ

สมการที่	ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์การละลายน้ำ			
		แทนค่า ครั้งที่ 1	แทนค่า ครั้งที่ 2	แทนค่า ครั้งที่ 3	แทนค่า ครั้งที่ 4
(2)	CO_2	92.2	-	-	-
(4)	CH_4	70.1	82.3	<u>84.2</u>	<u>84.6</u>
(5)	CO_2	98.8	99.2	<u>99.3</u>	<u>99.3</u>

ที่ปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัด 40 มก./ล.

เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ ($\%CO_2$) = 99.3 %

เปอร์เซ็นต์มีเทนละลายน้ำ ($\%CH_4$) = 84.6 %

จากนั้นทำการคำนวณที่ปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัดในค่าต่าง ๆ จะได้ค่าดังตารางที่ 4. 9

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของก๊าซและความดันพาร์เชียลที่ปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัด

คาร์บอนที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	คาร์บอนไดออกไซด์		มีเทน	
	เปอร์เซ็นต์การละลาย	ความดันพาร์เชียล	เปอร์เซ็นต์การละลาย	ความดันพาร์เชียล
5	100.0	0.00	100	1.00
30	100.0	0.00	100	1.00
40	99.3	0.04	84.6	0.96
50	98.2	0.05	67.1	0.95
100	92.6	0.10	31.9	0.90
250	77.1	0.21	11.2	0.79
500	57.8	0.31	4.9	0.69

การที่จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนมากพอที่จะสามารถวัดปริมาณก๊าซโดยอุปกรณ์เก็บก๊าซได้เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าจะต้องมีคาร์บอนที่ถูกกำจัดมากกว่า 50 (มก./ล.) อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการคำนวณยังไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องที่สุด เพราะในการกำหนดสมการต้องตั้งสมมติฐานว่ามีก๊าซ 2 ชนิดคือคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนซึ่งในความเป็นจริงอาจจะมีก๊าซอื่นเช่นไฮโดรเจนซัลไฟด์แต่เนื่องจากปริมาณซัลไฟด์ในน้ำออกมีค่าต่ำมากจึงไม่นำมาพิจารณา รวมทั้งลักษณะของน้ำเสียชุมชนซึ่งตั้งสมมติฐานว่าเป็นน้ำเสียคาร์โบไฮเดรตและถูกเปลี่ยนแปลงเป็นกรดอะซิติกทั้งหมดซึ่งในสภาพความเป็นจริงอาจจะมีปัจจัยอื่นที่ทำให้น้ำเสียไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นอะซิติกทั้งหมดก็ได้อันจะทำให้โมลของก๊าซที่เกิดไม่ตรงกับการคำนวณ แต่ถึงอย่างไรก็ตามสมการที่ได้นำมาคำนวณการละลายของก๊าซก็สามารถอธิบายถึงแนวโน้มการละลายของก๊าซในสภาพการกำจัดคาร์บอนที่ปริมาณต่างได้อย่างชัดเจน

ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการวัดค่าอินทรีย์คาร์บอน (TOC)ที่ถูกกำจัด ดังนั้น เพื่อที่จะทำการคำนวณเพื่อใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดจากน้ำเสียชุมชนกับกับเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของก๊าซชีวภาพโดยจะต้องทราบค่าสัดส่วนของ COD/TOC ของน้ำเสียชุมชนซึ่งมีองค์ประกอบสารอินทรีย์ที่หลากหลาย จึงได้ทำการอ้างอิงกับสัดส่วน COD/TOC ของน้ำเสียชุมชนจากเอกสารที่เกี่ยวข้องโดยพบว่าสัดส่วน COD/TOC ของน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียในน้ำเข้ามีค่า 4.15 และในน้ำออกมีค่า 2.20 (มั่นสิน, 2539) ซึ่งสัด

ส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชนที่บำบัดผ่านระบบไร้อากาศของต่างประเทศพบว่าสัดส่วน COD/TOC ของน้ำเสียชุมชนในน้ำเข้ามีค่าระหว่าง 2.75 - 4.55 และในน้ำออกมีค่าระหว่าง 2.70 - 4.00 (Lettinga และคณะ, 1983) โดยทำการคำนวณกับค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดไปในการทดลองในแต่ละวันและเลือกใช้ค่าสัดส่วน COD/TOC ในช่วง 2.00 - 4.50 เพื่อให้ครอบคลุมการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าอินทรีย์คาร์บอนที่คำนวณได้จากซีโอดีที่ถูกกำจัดในทุกชุดการทดลองที่สัดส่วน COD/TOC ต่าง ๆ

ชุดการทดลอง เวลากัก – ความเร็วไหลขึ้น (ชม.. - ม./ชม.)	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ค่าอินทรีย์คาร์บอนที่คำนวณจากซีโอดีที่ถูกกำจัดโดยคำนวณจากสัดส่วน COD/TOC ต่าง ๆ (มก./ล.)	
		2.00	4.50
6 ชม. - 0.5 ม./ชม.	94	47	12
2 ชม. - 0.5 ม./ชม.	94	47	12
2 ชม. - 3.5 ม./ชม.	130	65	16
2 ชม. - 6.5 ม./ชม.	127	64	16
2 ชม. - 10.0 ม./ชม.	95	48	12
2 ชม. - 12.0 ม./ชม.	94	47	12

สังเกตได้ว่าค่าอินทรีย์คาร์บอน (TOC) ที่คำนวณจากสัดส่วนต่างๆ มีลักษณะการแปรผกผันลดลงตามค่าสัดส่วน COD/TOC ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน COD/TOC เท่ากับ 4.50 พบว่ามีค่าอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกกำจัดในช่วง 10 - 20 มก./ล. ในทุกชุดการทดลองซึ่งค่าอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกกำจัดได้ดังกล่าวเมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่าอยู่ในช่วงที่การละลายน้ำของทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วน COD/TOC เท่ากับ 2.00 ค่าอินทรีย์คาร์บอนถูกกำจัดในช่วง 40 - 60 มก./ล.ซึ่งเป็นช่วงที่เปอร์เซ็นต์การละลายของก๊าซทั้ง 2 ชนิดเริ่มลดลงเล็กน้อยแต่ก็ยังคงอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์การละลายที่มาก อย่างไรก็ตามตารางการคำนวณข้างต้นยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากปัจจัยที่ไม่ตรงสมมติฐานหลายประการแต่ก็สามารถที่ใช้เป็นแนวทางในการอธิบายความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่บำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งมีความเข้มข้นต่ำๆได้

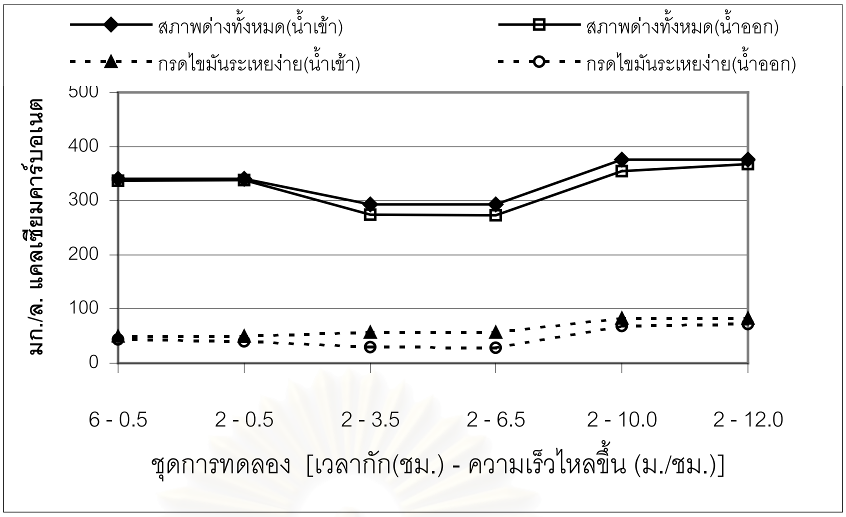
4.7 สภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย และพีเอช

สภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย และพีเอชใช้ในการสังเกตเสถียรภาพของระบบเนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการแบบไร้อากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียชุมชนซึ่งมีค่าสภาพด่างทั้งหมดเพียงพอต่อการสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายที่มีในระบบประกอบกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่อนข้างต่ำจึงทำให้สามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบได้ง่าย

ตาราง 4.11 ข้อมูลสภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย และพีเอชในสภาวะคงตัวทุกชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง เวลากัก – ความเร็วไหลขึ้น (ชม. - ม./ชม.)	สภาพด่างทั้งหมด มก./ล แคลเซียมคาร์บอเนต		กรดไขมันระเหย มก./ล แคลเซียมคาร์บอเนต		พีเอช	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
6 ชม. - 0.5 ม./ชม.	341	337	50	44	7.83	7.83
2 ชม. - 0.5 ม./ชม.	341	338	50	40	7.83	7.84
2 ชม. - 3.5 ม./ชม.	293	274	57	30	8.15	7.98
2 ชม. - 6.5 ม./ชม.	293	273	57	28	8.15	7.98
2 ชม. - 10.0 ม./ชม.	376	355	83	68	8.37	8.13
2 ชม. - 12.0 ม./ชม.	376	368	83	72	8.37	8.14

ข้อมูลในรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยสภาพด่างทั้งหมดที่สภาวะคงตัวในน้ำออกจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเข้าและแปรผกผันตามสภาพด่างทั้งหมดในน้ำเข้าซึ่งมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับลักษณะน้ำเสียของอาคารในแต่ละเดือน ลักษณะที่แตกต่างตามช่วงเดือนนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรดไขมันระเหยง่ายและพีเอชน้ำเข้าและมีลักษณะของการลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเข้าอย่างมีนัยสำคัญ ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสภาพด่างทั้งหมดและพีเอชในระบบบำบัดแบบไร้อากาศได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดได้จริง



รูปที่ 4.30 ค่าเฉลี่ยสภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยที่สภาวะคงตัวทุกชุดการทดลอง

รายละเอียดและเงื่อนไขการคำนวณค่าพีเอชและสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศบำบัดน้ำเสียชุมชน (Van Haandel และ Lettinga, 1994) ในกระบวนการแบบไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพที่สามารถวัดได้โดยเครื่องมือวัดก๊าซก็ต่อเมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่ละลายในน้ำในระบบจนกระทั่งอยู่ในสภาพอิ่มตัวไม่สามารถละลายต่อไปได้อีก กฎการละลายน้ำของ Henry's Law อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันพาร์เชียลของก๊าซแต่ละชนิดกับความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของก๊าซละลายในน้ำดังนี้

$$[CO_2] = k_H * pCO_2 \qquad \text{..................(1)}$$

เมื่อ $[CO_2]$ = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

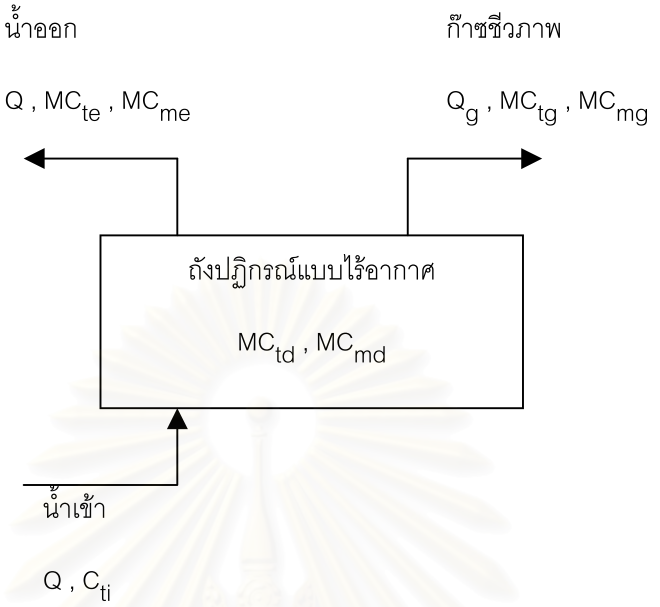
k_H = ค่าคงที่ของ Henry's Law ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ

pCO_2 = ความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซรวม

จากสมการ Henry's Law สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด่างกับความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการพิจารณาสมการการแตกตัวของไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่(2) โดยที่ความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงความสัมพันธ์แปรผันเป็นเส้นตรงกับสภาพด่างไฮโดรเจนคาร์บอเนต

$$pCO_2 = Alk * 10^{(pK_1+pK_H-pH)} \qquad \text{..................(2)}$$

จากสมการดังกล่าวจึงได้ทำการนำแบบจำลองซึ่งอธิบายการเคลื่อนย้ายของมวลสารของคาร์บอนอนินทรีย์และมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของมวลสารของคาร์บอเนตและมีเทนในระบบไร้อากาศ

จากแบบจำลองข้างต้นสามารถสามารถอธิบายความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในในเทอมของความดันพาร์เชียลของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบ ดังสมการ

$$pCO_2 = MC_{tg} / (MC_{tg} + MC_{mg})$$

$$= (MC_{ti} + MC_{td} - MC_{te}) / (MC_{ti} + MC_{td} + MC_{md} - MC_{te} - MC_{me})$$

$$= (C_{ti} + C_{td} - C_{te}) / (C_{ti} + C_{td} + C_{md} - C_{te} - C_{me}) \quad \text{.........(3)}$$

เมื่อ

C_t = ความเข้มข้นคาร์บอเนต (โมลคาร์บอน/ลิตร)

C_m = ความเข้มข้นมีเทน (โมลมีเทน/ลิตร)

Q = อัตราไหลน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)

Q_g = อัตราไหลก๊าซ (ลบ.ม./วัน)

i = น้ำเข้า

e = น้ำออก

d = ส่วนที่ถูกผลิตในปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ (ในถังปฏิกรณ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

g = ส่วนที่อยู่ในสถานะก๊าซ

M = การเคลื่อนย้ายมวลสารต่อวัน (โมล/วัน)

สมการที่ (3)สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายผลรวมของสภาพด่างทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างสภาพด่างน้ำเข้ากับสภาพด่างที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ โดยประเมินว่าผลรวมสภาพด่างที่ได้มีมากพอที่จะรักษาค่าพีเอชในระบบให้เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศโดยในสมการดังกล่าวสามารถใช้คำนวณหาพีเอชทีเกิดขึ้นในระบบได้ในกรณีที่มีสภาพด่างอย่างเพียงพอและใช้คำนวณหาสภาพด่างที่จะต้องเพิ่มเข้าไปในระบบในกรณีที่มีสภาพด่างในน้ำเสียไม่เพียงพอ ตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ (3)เป็นปัจจัยที่สำคัญในการคำนวณหาพีเอชที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ความเข้มข้นคาร์บอเนตน้ำเข้า (C_{ti})

จาก กราฟของ Deffeyes (ภาคผนวก ค.)เมื่อทราบค่าสภาพด่างและพีเอชของน้ำเสียจะทำให้สามารถอ่านค่าสภาพกรดของน้ำเสียจากกราฟได้ และสามารถคำนวณ ความเข้มข้นคาร์บอเนตน้ำเข้า (C_{ti}) โดยที่

$$(C_{ti}) = (\text{สภาพด่างน้ำเข้า}(Alk_i) + \text{สภาพกรดน้ำเข้า}(Acd_i))/2$$

2) ความเข้มข้นของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (C_{md} , C_{td})

โดยความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ปริมาณก๊าซมีเทนสามารถประมาณได้จากปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไป โดย 1 กรัม หรือ 1/16 โมลของมีเทนเกิดขึ้นจากปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไป 4 กรัม นั่นคือมีมีเทนเกิดขึ้น 1/64 โมล ต่อกรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด แต่ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นกับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตโมลของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งน้ำเสียชุมชนก็จัดเป็นน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตเช่นกัน

3) สภาพด่างที่เพิ่มขึ้นในระบบ

การเปลี่ยนแปลงของสภาพด่างในระบบขึ้นอยู่กับกระบวนการดังนี้

ก) แอมโมนิฟิเคชั่น ซึ่งเป็นกระบวนการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนให้กลายเป็นแอมโมเนียอันจะส่งผลให้แอมโมเนียไนเตรตที่ออกจากถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศมีค่ามากกว่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเข้าระบบดังปฏิกิริยาดังนี้

$$RNH_2 + 2H_2O \;\; ----> \;\; ROH + NH_4^+ + OH^-$$

1 โมลของทีเคเอ็นที่ถูกกำจัดไปจะทำให้เกิดสภาพด่าง 1 สมมูล ดังนั้นสภาพด่างที่เกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่นเท่ากับ0.071มก.สมมูลของไนโตรเจน สภาพด่างจากกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยจึงขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน

ข) ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) การเพิ่มขึ้นของสภาพด่างไฮโดรเจนคาร์บอเนตเท่ากับปริมาณปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่ถูกกำจัดในระบบ ดังนั้นสภาพด่างในน้ำที่ออกจากระบบสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Alk_e = Alk_i + VFA_i - VFA_e + (NH_{4\,e}^{+} - NH_{4\,i}^{+})\, 0.0071$$

โดยที่

Alk_i = สภาพด่างทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.สมมูล/ลิตร)

VFA_i = กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเข้า (มก.สมมูล/ลิตร)

VFA_e = กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำออก (มก.สมมูล/ลิตร)

$NH_{4\,i}^{+}$ = แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเข้า (มก./ล. ในเทอมไนโตรเจน)

$NH_{4\,e}^{+}$ = แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำออก (มก./ล. ในเทอมไนโตรเจน)

4) ความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำออก หากค่าพีเอชในน้ำออกมีค่าใกล้เคียงความเป็นกลางทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำออกมีค่าต่ำหรือส่งผลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนคาร์บอเนตและสภาพด่างโดยตรง ความเข้มข้นของคาร์บอเนตดังสมการดังนี้

$$C_{te} = [CO_2] + [HCO_3^-]$$

$$= [HCO_3^-](1 + [H^+] / k_1)$$

$$= Alk_e * (1 + 10^{(pK_1 - pH)})$$

$$= Alk_e * (1 + f_e)$$

โดยที่ $f_e = 10^{(pK_1 - pH)}$

5) ความเข้มข้นของมีเทนที่ละลายน้ำ (C_{me})

ความเข้มข้นของมีเทนที่ละลายน้ำที่สภาวะความดันพาร์เชียลของมีเทน 1 เท่ากับ 1 มิลลิโมล/ลิตร ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับซีโอดีที่ถูกย่อยสลายไป 64 มก./ล.

จากปัจจัย 5 ประการดังกล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถเขียนสมการ (3) ในรูปใหม่ดังนี้

$$pCO_2 = \frac{[C_{ti} + COD_d/64 + Alk_e(1 + f_e)]}{[C_{ti} + COD_d/32 - 0.001 - Alk_e(1 + f_e)]} \quad \text{.........(4)}$$

และความดันพาร์เชียลของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเขียนในอยู่ในอีกรูปของ Henry's Law ดังนี้

$$pCO_2 = [CO_2] / K_H$$

$$= [HCO_3^{+}] [H^{+}] / K_H$$

$$= Alk_e f_e / K_H \quad \text{.........(5)}$$

<u>การคำนวณค่าพีเอชและสภาพด่างของน้ำออกในสภาวะที่ไม่ได้เพิ่มเติมสภาพด่างในน้ำเสียเข้าระบบ</u>

ในกรณีของน้ำเสียชุมชนซึ่งมักจะมีสภาพด่างที่เพียงพอ ค่าพีเอชของน้ำออกสามารถคำนวณโดยสมการ (4) และ (5) ซึ่งสามารถนำมาจัดรูปใหม่ดังสมการ (6)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$f_e = 0.5 * [b - (b^2 - 4c)^{0.5}] \quad ....(6)$$

โดย

$$b = (K_H + C_{ti} + C_{td} + C_{md} - C_{me} - Alk_e) / Alk_e$$

$$c = K_H(C_{ti} + C_{td} - Alk_e) / Alk_e^2$$

จาก $f_e = 10^{(pK_1 - pH)}$

ดังนั้น

$$pH_{น้ำออก} = pK_1 - \log f_e \quad ....(7)$$

จากสมการ (6) และ (7) สามารถทำการคำนวณค่าพีเอชและสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกโดยการคำนวณจากข้อมูลในแต่ละชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การคำนวณสภาพด่างทั้งหมดและพีเอชเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง

ชุดการทดลอง เวลากัก – ความเร็วไหลขึ้น (ชม - ม/ชม.)	ค่าจากการทดลอง (น้ำเข้า)		ค่าจากการทดลอง (น้ำออก)		ค่าจากการคำนวณ (น้ำออก)	
	สภาพด่างทั้งหมด	พีเอช	สภาพด่างทั้งหมด	พีเอช	สภาพด่างทั้งหมด	พีเอช
6 ชม - 0.5 ม./ชม.	341	7.83	337	7.83	347	7.56
2 ชม - 0.5 ม./ชม.	341	7.83	338	7.84	351	7.33
2 ชม - 3.5 ม./ชม.	293	8.15	274	7.98	285	7.29
2 ชม - 6.5 ม./ชม.	293	8.15	273	7.98	297	7.43
2 ชม - 10.0 ม./ชม.	376	8.37	355	8.13	366	7.60
2 ชม - 12.0 ม./ชม.	376	8.37	368	8.14	387	7.70

จากการคำนวณพบว่าค่าพีเอชในน้ำออกลดลงอยู่ในช่วงที่แตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงรวมทั้งค่าสภาพด่างทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าน้ำเข้าในขณะที่สภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกที่คำนวณได้กลับมีค่าที่สูงกว่า จากการคำนวณสามารถพิจารณาได้จากส่วนต่างของ

กรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างน้ำออกและน้ำเข้าจะแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากมีสัดส่วนอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเข้าที่จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นปริมาณน้อยและโดยการคำนวณเองก็พบว่าปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเพียง 0.01 มก./ล.ไนโตรเจนก็มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสภาพด่างทั้งหมดค่อนข้างมากแต่จากผลการทดลองสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกไม่ได้แตกต่างจากน้ำเข้ามากเท่าใดนักจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์ไนโตรเจนมีน้อยมากจนไม่มีผลกระทบต่อสภาพด่างทั้งหมดและเมื่อกลับมาพิจารณาจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกจะต้องมากกว่าน้ำเข้าแต่กลับปรากฏว่าจากผลการทดลองค่าสภาพด่างทั้งหมดในน้ำออกมีค่าน้อยกว่าในน้ำเข้าคาดว่าอาจจะเป็นผลคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหรืออาจเป็นจุดบกพร่องของแบบจำลองเองซึ่งไม่ได้นำปัจจัยอื่นเข้ามาคิดด้วย ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียชุมชนในปริมาณค่อนข้างต่ำทำให้การติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ยังไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนและการที่กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำออกจากระบบมีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าเกิดกระบวนการย่อยสลายกรดโดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนซึ่งได้มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามแสดงให้เห็นว่าสภาพด่างที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชนมีมากเพียงพอที่จะรักษาค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อสภาพการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศรวมทั้งความเร็วไหลขึ้นและเวลากักซึ่งไม่ส่งผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพด่างทั้งหมดในระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 เม็ดแบคทีเรีย

เม็ดแบคทีเรียหรือเม็ดสลัดจ์ที่นำมาใช้ในในการทดลองเริ่มต้นมีขนาด 0.5 - 3 มม. โดยได้ทำการคัดแยกส่วนที่เป็นปุยฟลอคขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้าออกไป ลักษณะทางกายภาพของเม็ดแบคทีเรียมีสีดำ ผิวกลมเกลี้ยง จับตัวเป็นรูปทรงกลมหรือทรงรีที่ค่อนข้างสมบูรณ์ โดยมีความเร็วในการตกตะกอนระหว่าง 30 - 60 ม./ชม. ในการทดลองได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่สำคัญของเม็ดแบคทีเรียดังนี้

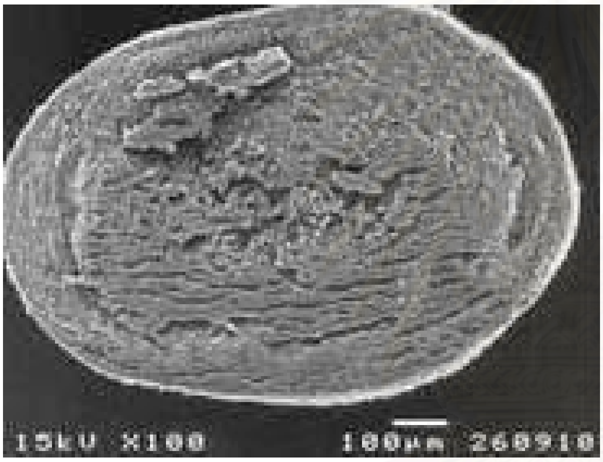
4.8.1 ลักษณะของเม็ดแบคทีเรียและกลุ่มแบคทีเรีย

ในช่วงสภาวะคงตัว (steady state) ของการทดลองที่กำหนดความเร็วไหลขึ้นในระบบอีจีเอสบีเท่ากับ 3.5 6.5 10.0 และ12.0 ม./ชม. ได้ทำการตรวจสอบลักษณะของเม็ดแบคทีเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ถึง 4.35 โดยทำการเลือกตัวอย่างเม็ดสลัดจ์ ที่เป็นตัวแทนของเม็ดสลัดจ์หลายๆ เม็ดที่ส่องจากกล้องจุลทรรศน์ ที่ทุกค่าความเร็วไหลขึ้นมีลักษณะทางกายภาพและกลุ่มของแบคทีเรียที่สามารถสังเกตได้ดังนี้คือ

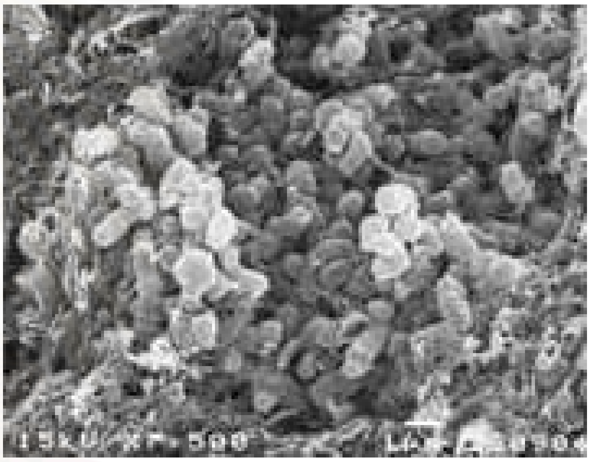
<u>โครงสร้างบริเวณผิวชั้นนอก</u> ลักษณะของเม็ดสลัดจ์ที่ผิวนอกค่อนข้างเรียบและเป็นเม็ดกลมที่ค่อนข้างสมบูรณ์และอาจพบรอยแตกที่บริเวณผิวนอกซึ่งอาจมากจากการผุกร่อนเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวกระทบกันเองของเม็ดสลัดจ์หรือเป็นช่องระบายก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนซึ่งอยู่ภายใน ลักษณะผิวภายนอกโดยทั่วไปในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โครงสร้างของกลุ่มแบคทีเรียบริเวณชั้นนอกประกอบด้วยแบคทีเรียหลากหลายชนิดโดยสังเกตได้จากรูปร่างของเซลแบคทีเรียซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบกลม แบบแท่ง แบบเส้นใย เป็นต้น ซึ่งคาดว่ามีส่วนที่เป็นแบคทีเรียผลิตกรดหลายชนิดเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมภายนอกที่มีสารอาหารความเข้มข้นสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้สามารถพบได้ในทุกชุดการทดลอง โดยโครงสร้างซึ่งเป็นเส้นใยเหล่านี้จะถูกเกาะยึดโดยเซลแบคทีเรียที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กทำให้โครงสร้างของเม็ดแบคทีเรียมีความทนทานต่อสภาพความเร็วไหลขึ้นที่ค่าต่างๆ ได้จึงพบการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณภายนอกน้อยมาก

(ก)

(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม.

ก) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 35 เท่า

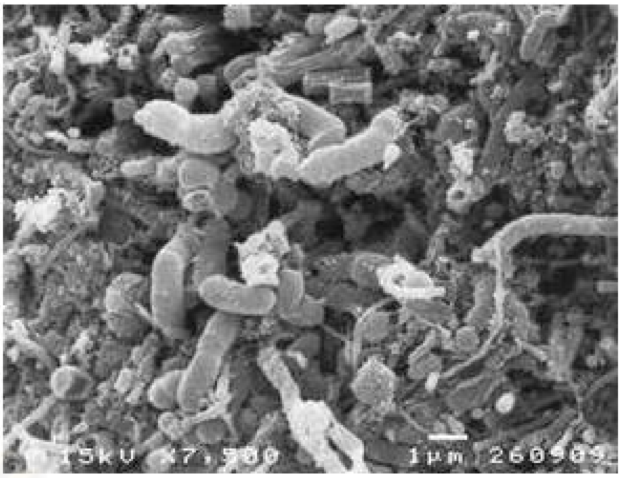
ข) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

ค) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

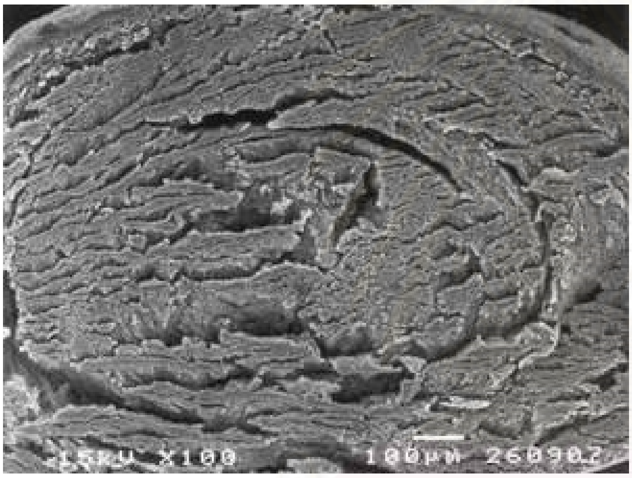
ง) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

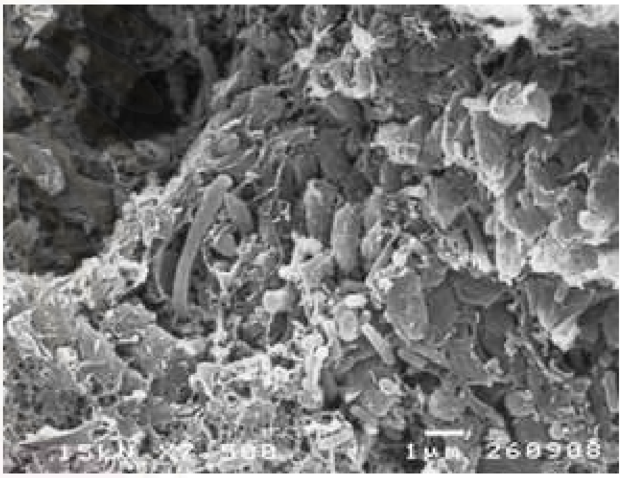
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม.

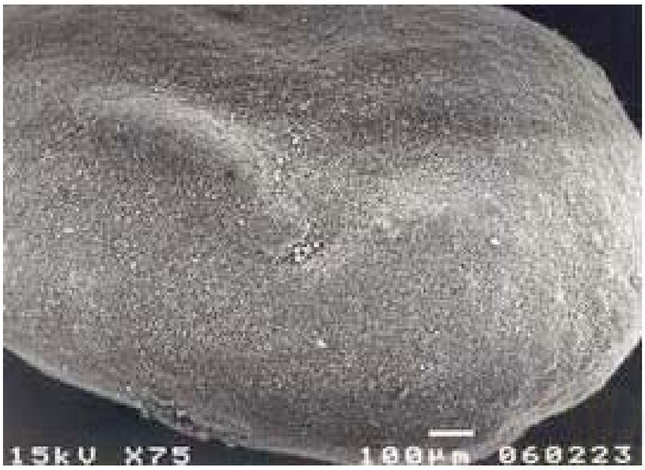
ก) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 35 เท่า

ข) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

ค) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ง) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.

ก) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 75 เท่า

ข) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

ค) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 75 เท่า

ง) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของเม็ดแบคทีเรียจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม.

ก) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 75 เท่า

ข) บริเวณผิวนอกของเม็ดสลัดจ์ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

ค) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 75 เท่า

ง) บริเวณภายในของเม็ดสลัดจ์ (ผ่าตามขวาง) ที่กำลังขยาย 7500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>โครงสร้างบริเวณภายใน</u> (ผ่าตามขวาง) ชั้นในบริเวณศูนย์กลางพบโพรงช่องว่างที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งอาจเนื่องมาจากสารอาหารที่มีความเข้มข้นต่ำทำให้เซลบางส่วนตายหรือเกิดการย่อยสลายกันเองของแบคทีเรีย ในชุดการทดลองที่ค่าความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 3.5 และ 6.5 ม./ชม. พบว่าเม็ดแบคทีเรียภายในมีความหนาแน่นของแบคทีเรียค่อนข้างสูงโดยพบโพรงช่องว่างน้อยมาก ในขณะที่ชุดที่มีค่าความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 10.0 และ 12.0 ม./ชม. กลับพบว่ามีโพรงช่องว่างซึ่งสังเกตพบว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่สภาพความเร็วสูงดังกล่าวอาจส่งผลให้ผลของการกระทบเทือนแสดงออกมาให้เห็นบริเวณชั้นในซึ่งมีโครงสร้างที่แม้จะมีแบคทีเรียอยู่ในปริมาณที่หนาแน่น แต่เนื่องจากกลุ่มแบคทีเรียที่เป็นเส้นใยมีอยู่น้อยมากจึงทำให้มีโครงสร้างที่หลวมและเปราะบาง ซึ่งขัดกันกับสมมติฐานที่อธิบายว่าเมื่อเพิ่มความเร็วไหลขึ้นที่มากขึ้นให้กับระบบทำให้เกิดการผสมและสัมผัสที่ดีขึ้นของแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ทำให้สารอาหารย่อมสามารถเข้าถึงบริเวณโครงสร้างชั้นในของเม็ดสลัดจ์ได้ดีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทนภายในก็น่าจะสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนเม็ดสลัดจ์ที่ถูกส่องโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งมีจำนวนตัวอย่างน้อย จึงยังไม่อาจสรุปได้ว่าความเร็วไหลขึ้นที่สูงขึ้นในถังปฏิกรณ์มีผลต่อโครงสร้างภายในของเม็ดแบคทีเรีย

กลุ่มแบคทีเรียที่บริเวณภายใน เนื่องจากสารอาหารซึ่งถูกย่อยโดยกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียผลิตมีเทนบางส่วนที่บริเวณชั้นนอกจนเหลือปริมาณน้อยมากทำให้แบคทีเรียที่อยู่ชั้นในซึ่งเป็นกลุ่มที่ผลิตมีเทนเป็นหลักย่อยสลายสารอาหารหรือกรดอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะของเซลแบคทีเรียที่บริเวณชั้นในมีความหลากหลายต่ำกว่าที่ผิวนอกโดยมีลักษณะรูปร่างทรงกลมหรือเป็นปล้อง และสามารถสังเกตได้ทั่วๆไปบริเวณรอบๆกลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทนว่ามีโครงสร้างคล้ายพังผืดที่อาจเกิดจากเซลที่ตายแล้วซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับปริมาณสารอาหารที่ต่ำมากจนเซลแบคทีเรียผลิตมีเทนต้องแย่งอาหารกันเองการที่เซลแบคทีเรียผลิตมีเทนชั้นในเม็ดสลัดจ์มีรูปรางส่วนใหญ่เป็นทรงกลมจึงคาดว่าจะเป็นแบคทีเรียชนิด *Methanosarcina* และ *Methanotrix* ซึ่งจัดเป็นกลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทนที่สามารถเจริญเติบโตในบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารอาหาร (กรดอะซิติก)ต่ำ

การวิเคราะห์หากลุ่มแบคทีเรียชนิดต่าง ๆโดยเทคนิค FISH (Fluorescent In Situ Hybridization) ซึ่งเป็นเทคนิคเฉพาะทางด้านจุลชีววิทยาในการจำแนกชนิด(สปีชีส์)หรือประเภทของเซลแบคทีเรียในลำดับที่สูงขึ้นได้โดยในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาเฉพาะกลุ่ม Methanogen ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนและ SRB (Sulphate reducing bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มย่อยสลายซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ โดยทำการตรวจสอบเฉพาะในชุดการทดลองสุดท้ายคือชุดการ

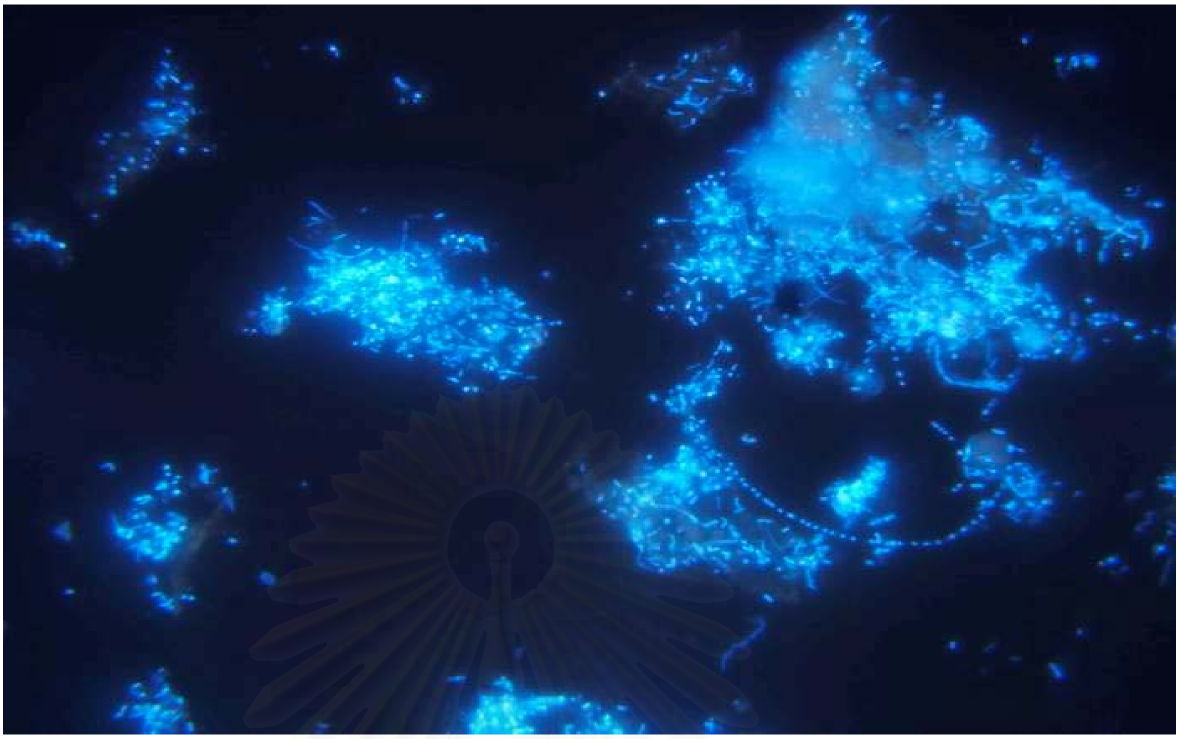
ทดลองที่ค่าความเร็วไหลขึ้น 10.0 และ 12.0 ม./ชม. ซึ่งจากผลการตรวจวัดในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดให้ผลที่เหมือนกันดังนี้

กลุ่มแบคทีเรียทั้งหมด (สีฟ้า) ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ตอบสนองต่อโพรบ(สารสังเคราะห์ที่บรรจุสารทางพันธุกรรม rNA ที่ตรงกับแบคทีเรียกลุ่มจำเพาะนั้น) มีชื่อจำเพาะทางเทคนิคคือ DAPI ซึ่งแสดงกลุ่มของแบคทีเรียทุกชนิดที่อยู่ในเม็ดสลัดจ์ สังเกตพบว่ามีเซลแบคทีเรียที่มีรูปร่างแตกต่างกันหลายชนิด

กลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทน(Methanogen) (สีแดง) ซึ่งเป็นเซลแบคทีเรีย Methanogen ซึ่งไม่ได้จำเพาะเจาะจงสปีชีส์ สามารถพบได้ทั่วไปในกลุ่มแบคทีเรียทั้งหมด (DAPI) โดยที่ลักษณะที่พบเป็นทรงกลมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียผลิตมีเทนบริเวณโครงสร้างชั้นในเม็ดสลัดจ์ที่ถูกส่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แสดงว่ามีกิจกรรมของการผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียถึงแม้ว่าจะไม่สามารถพบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากระบบได้อันเนื่องมาจากระดับของการผลิตที่ต่ำมากจนมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดละลายในน้ำออกจากระบบ

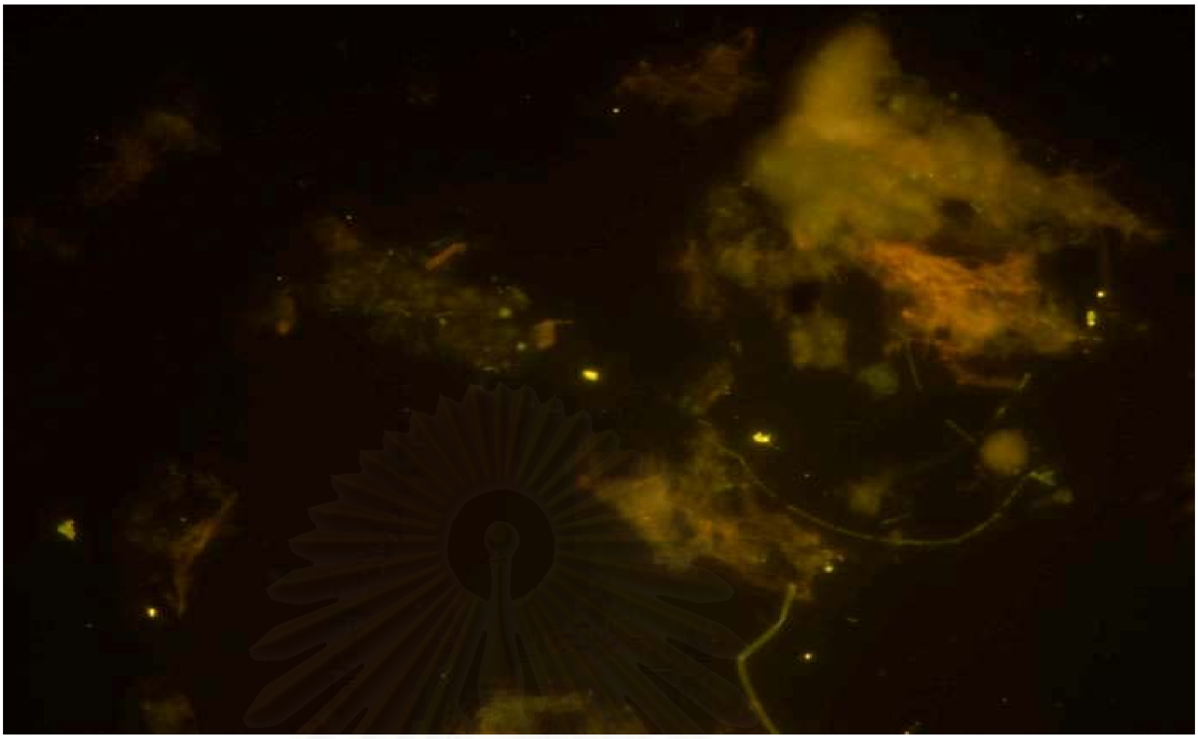
กลุ่มแบคทีเรียรีดิวส์ซัลเฟต (SRB) (สีเขียว) ซึ่งเป็นเซลแบคทีเรีย SRB ที่ไม่ได้จำเพาะเจาะจงสปีชีส์ กลับไม่ปรากฏพบลักษณะของเซลแบคทีเรียที่มีสีเขียว แสดงว่าไม่เกิดซัลเฟตรีดักชั่นแม้จะมีปริมาณซัลเฟตเข้ามาในระบบประมาณ 20 – 30 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลกับข้อมูลซัลเฟตในน้ำเข้าและน้ำออกซึ่งมีค่าเท่ากันนั่นคือไม่เกิดการกำจัดซัลเฟตในระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สัดส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ SBR รวมทั้ง SBR จัดเป็นแบคทีเรียที่ต้องใช้เวลานานในการคัดพันธุ์และเจริญเติบโต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) แบคทีเรียทุกชนิด (DAPI) ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น
10.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

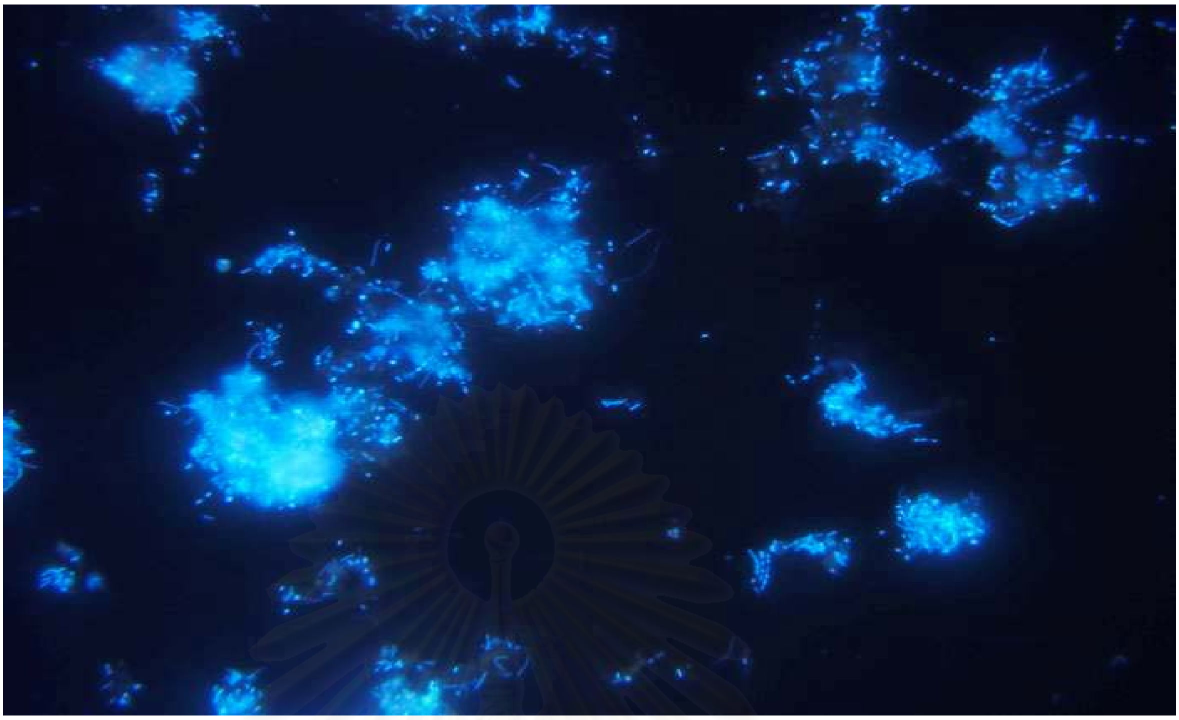
ข) แบคทีเรียผลิตมีเทนในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น
10.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)



ค) แบคทีเรียรีดิวส์ซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

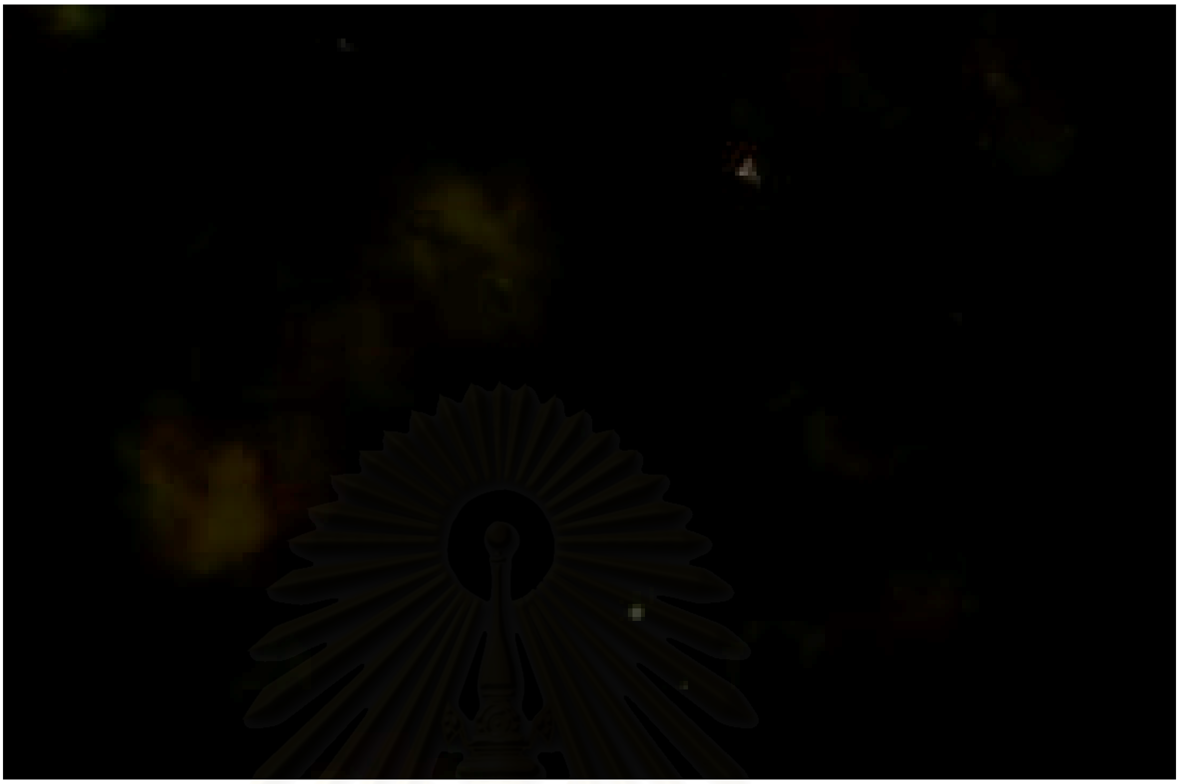
รูปที่ 4.36 กลุ่มแบคทีเรียชนิดต่าง ๆโดยเทคนิค FISH ของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) แบคทีเรียทุกชนิด (DAPI) ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

ข) แบคทีเรียผลิตมีเทนในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)



ค) แบคทีเรียรีดิวส์ซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

รูปที่ 4.37 กลุ่มแบคทีเรียชนิดต่าง ๆโดยเทคนิค FISH ของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเร็ว ไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. (ขยาย 1000 เท่า)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

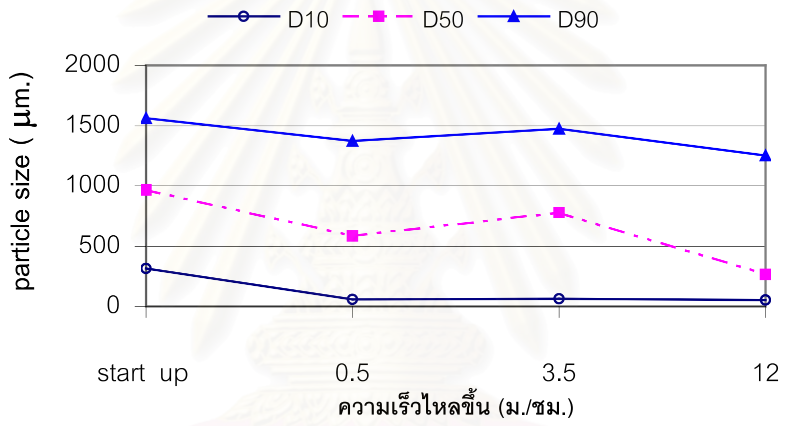
4.8.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดแบคทีเรีย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วไหลขึ้นระหว่าง 0.5 - 12.0 ม./ชม. โดยที่สลัดจ์ที่เริ่มต้นระบบส่วนใหญ่ประกอบด้วยเม็ดสลัดจ์ขนาด 0.5 - 3 มม. จนกระทั่งการทดลองชุดสุดท้ายพบว่ามีเม็ดสลัดจ์บางส่วนที่ผุกร่อนเป็นสลัดจ์แบบฟลอคที่ส่วนบนของชั้นสลัดจ์ซึ่งฟลอคเหล่านี้ยังคงความสามารถในการตกตะกอนได้ดีพอสมควร เนื่องจากเม็ดสลัดจ์และฟลอคมีขนาดและปริมาณแตกต่างกันดังนั้นการวัดขนาดของเม็ดสลัดจ์จึงได้วิเคราะห์อยู่ในรูปแแบบของการกระจายขนาดโดยผู้วิจัยได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเม็ดแบคทีเรียโดยเครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ในการวิเคราะห์ การวัดขนาดอาศัยหลักการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของเม็ดสลัดจ์ด้วยระบบเซนเซอร์ที่ส่งแสงมากระทบกับอนุภาคขณะที่สลัดจ์ถูกสูบไหลผ่านเลนส์ อนุภาคที่มีรูปร่างกลมหรือใกล้เคียงเช่นเม็ดสลัดจ์จะถูกวัดเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ขณะที่อนุภาคที่เป็นฟลอคซึ่งมีรูปทรงที่หลากหลายจะถูกตั้งสมมติฐานว่ามีรูปทรงกลมและคำนวณกลับเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อเป็นค่าตัวแทนของขนาดฟลอค การเปรียบเทียบการกระจายของขนาดเม็ดสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ชุดเดียวกันที่สภาวะคงตัว (steady state) ของแต่ละชุดความเร็วไหลขึ้นดังแสดงในภาคผนวก ข. เนื่องจากข้อมูลของขนาดสลัดจ์เป็นการกระจายตามขนาดต่าง ๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดสลัดจ์จึงได้เลือกค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดความเร็วไหลขึ้นโดยได้เลือกค่า D10 D50 และD90 ซึ่งเป็นขนาดของสลัดจ์ที่ปริมาณร้อยละ 10 50 และ 90 ของสลัดจ์ทั้งหมด โดยหากการเปลี่ยนแปลงของค่า D ที่เปอร์เซ็นต์ใดๆลดลงแสดงว่ามีสลัดจ์ที่มีขนาดเล็กกว่าในปริมาณสูงขึ้น (สลัดจ์ขนาดใหญ่มีการแตกตัว) การเปลี่ยนแปลงของ D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์แต่ละชุดดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39

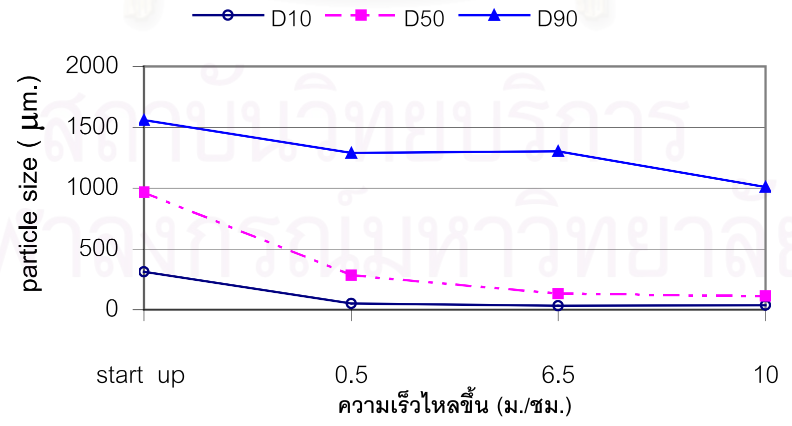
<u>ถังปฏิกรณ์ที่ 1</u> ซึ่งทดลองที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 3.5 และ 12.0 ม./ชม. พบว่าการลดลงของ D10 D50 และD90 ต่างลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสลัดจ์ช่วงเริ่มต้นระบบ (Start up) โดยการลดลงของ D10 ในแต่ละค่าความเร็วไหลขึ้นแตกต่างกันน้อยมาก ในขณะที่ทั้ง D50 และ D90 มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดในที่ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. สังเกตได้ว่า D50 และ D90 ต่างเป็นขนาดซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นเม็ดสลัดจ์ (0.5 – 3 มม.) จึงแสดงว่าเม็ดสลัดจ์มีการแตกตัวลงบางส่วนที่ค่าความเร็วสูง ๆ โดยที่ผลการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเร็วที่แตกต่างกันน้อยจาก 0.5 ถึง 3.5 ม./ชม. โดยการขยายตัวของชั้นสลัดจ์เพียง 71 เปอร์เซ็นต์กลับไม่แสดงให้เห็นแนวโน้มดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามช่วงเริ่มต้นระบบจนถึง 0.5 ม./ชม. กลับมีค่า D ในทุกเปอร์เซ็นต์ลดลงอย่างชัดเจนแม้จะมีความเร็วไหลขึ้นที่ต่ำมาก คาดว่าอาจเกิดจากการปรับ

ตัวของสลัดจ์ขณะที่เริ่มป้อนน้ำเสียชุมชนเข้าระบบจึงเกิดการหลุดของเซลจากเม็ดสลัดจ์รวมทั้งสาเหตุจากการใช้แท่งเหล็กกวนชั้นสลัดจ์ที่เลื่อนตัวขึ้นมาในช่วงแรกซึ่งอาจมีการกระทบกระเทือนต่อเม็ดสลัดจ์เช่นกัน

<u>ถังปฏิกรณ์ที่ 2</u> ซึ่งทดลองที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 6.5 และ 10.0 ม./ชม. พบว่าการลดลงของ D10 D50 และD90 คล้ายกับในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 และพบว่าการลดลงของ D50 ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนอันแสดงถึงการแตกตัวเม็ดสลัดจ์ในอัตราที่สูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 เพราะการเพิ่มความเร็วจาก 0.5 เป็น 6.5 ม./ชม. ซึ่งมีผลต่อเม็ดสลัดจ์เป็นอย่างสูงโดยพิจารณาได้จากการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่สูงถึง 257 เปอร์เซ็นต์ การลดลงของค่า D ในทุกเปอร์เซ็นต์ช่วงเริ่มต้นระบบจนถึง 0.5 ม./ชม. มีเหตุผลในลักษณะเดียวกันกับถังปฏิกรณ์ที่ 1



รูปที่ 4.38 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในแต่ละช่วงการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1

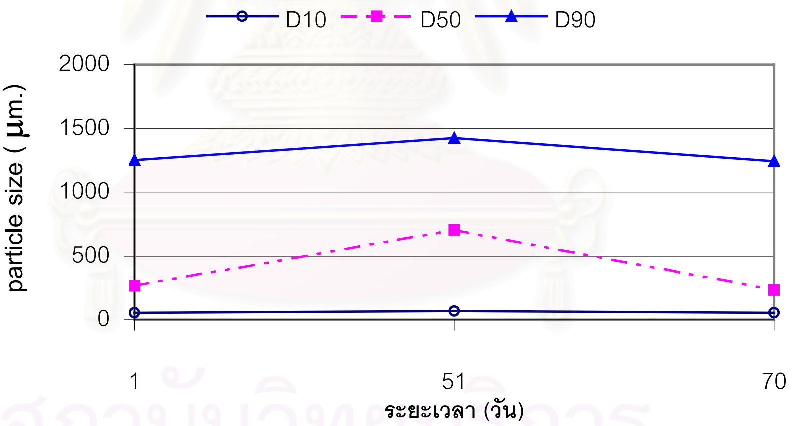


รูปที่ 4.39 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในแต่ละช่วงการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

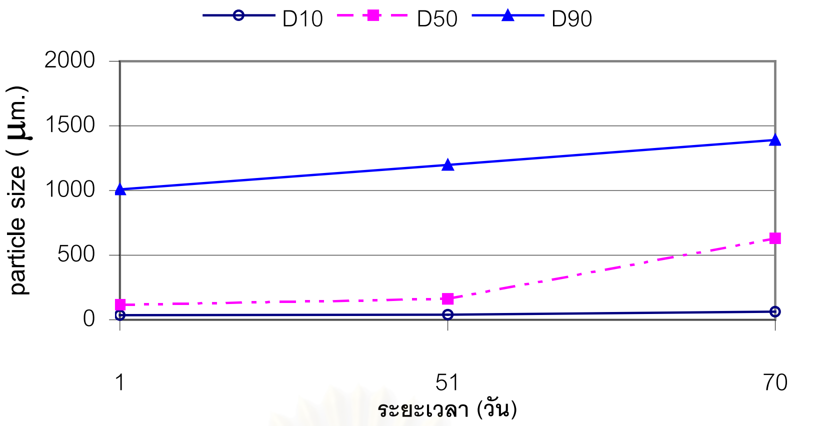
เครื่อง Particle Size Analyzer มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดเม็ดสลัดจ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มม.ได้ดังนั้นขอบเขตบนของเม็ดสลัดจ์จึงเท่ากับ 2 มม. จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดเฉลี่ยทำให้สรุปได้ว่าความเร็วไหลขึ้นมีผลต่อการกระจายของขนาดเม็ดสลัดจ์อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลของความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อสลัดจ์ในแต่ละถังปฏิกรณ์นี้มีปัจจัยของระยะเวลาในแต่ละช่วงความเร็วไหลเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยโดยหากมีการแตกสลายหรือผุกร่อนของเม็ดสลัดจ์ในช่วงความเร็วการไหลใดๆก็จะส่งผลให้การวัดขนาดสลัดจ์ผิดพลาดได้จึงได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของการกระจายขนาดสลัดจ์ในการทดลองสุดท้ายที่ความเร็วการไหลขึ้นคงที่เท่ากับ 12.0 และ10.0 ม./ชม. ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ในช่วงระยะเวลาประมาณ 2 เดือน

<u>ความเร็วไหลขึ้นคงที่ 12.0 ม./ชม.</u> จากกราฟการเปลี่ยนแปลงของ D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ในรูปที่ 4.40 ไม่แสดงลักษณะการลดลงที่สัมพันธ์กับระยะเวลาแต่กลับพบว่ามีการเพิ่มขึ้นในบางช่วงซึ่งเป็นเหตุผลมาจากการวิเคราะห์ซึ่งคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสุ่มตัวอย่างรวมทั้งการคละกันในชั้นสลัดจ์ก็มีส่วนสำคัญต่อผลการวัด



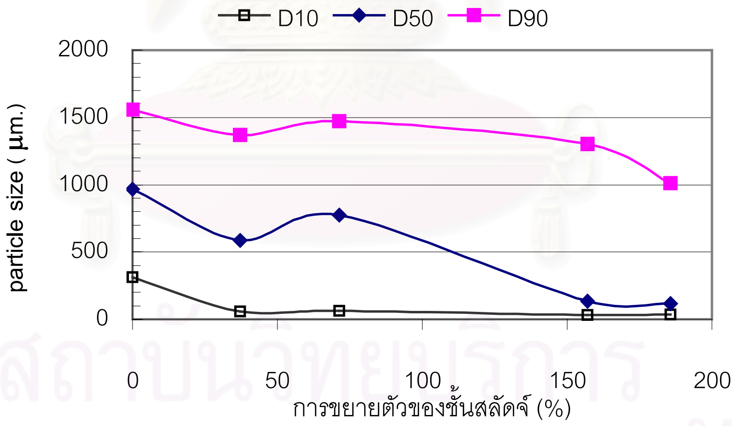
รูปที่ 4.40 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ที่การทดลองค่าความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม.

<u>ความเร็วไหลขึ้นคงที่ 10.0 ม./ชม.</u> การเปลี่ยนแปลงของ D50 และ D90 ของสลัดจ์ในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงกันและไม่แสดงแนวโน้มการลดลงแต่เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสุดท้ายซึ่งคาดว่าเป็นผลคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสุ่มตัวอย่างและการคละกันซึ่งทำให้ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสลัดจ์มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.41 D10 D50 และ D90 ของสลัดจ์ที่การทดลองค่าความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.

จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของเม็ดสลัดจ์ต่อระยะเวลา ไม่พบการลดลงของขนาดเม็ดสลัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าการกระจายขนาดของสลัดจ์มีช่วงการกระจายที่คงที่ในช่วงความเร็วไหลขึ้นใดๆ โดยผลของความเร็วไหลขึ้นทำให้เม็ดสลัดจ์เกิดการกระทบกันได้มากจนกระทั่งปริมาณเม็ดสลัดจ์ลดลงไประดับหนึ่งเนื่องจากเม็ดสลัดจ์บางส่วนที่ไม่แข็งแรงพอแตกตัวเป็นฟลอคขณะเม็ดสลัดจ์ที่เหลืออยู่ยังสามารถคงสภาพอยู่ในสภาวะความเร็วไหลขึ้นนั้น ๆ ได้

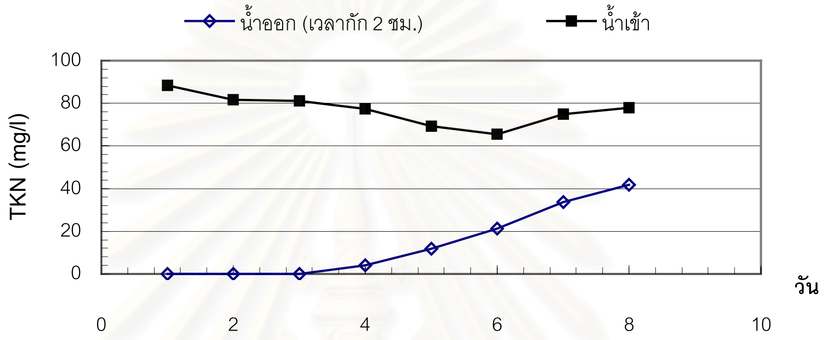


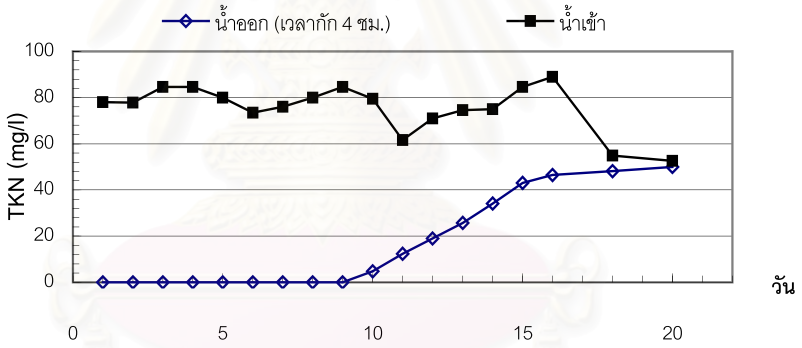
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชั้นสลัดจ์กับ D10 D50 และ D90

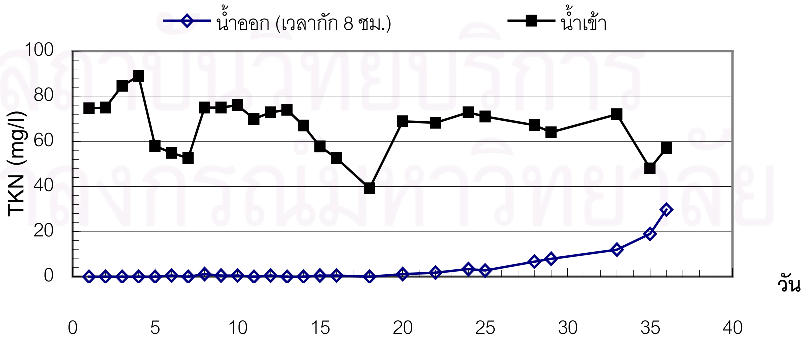
จากรูปที่ 4.42 สังเกตได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของชั้นสลัดจ์มีผลต่อขนาดของเม็ดสลัดจ์ซึ่งจะอยู่ในช่วงของ D50 และ D90 อย่างชัดเจน โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของของอนุภาคที่เป็นฟลอคเท่าใดนัก จึงแสดงว่าที่ระดับการขยายตัวที่สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อขนาดของเม็ดสลัดจ์เนื่องจากเกิดความปั่นป่วนมากเกินไป

4.9 การกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบี

เนื่องจากน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศทุกพารามิเตอร์ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารสูง ยกเว้นทีเคเอ็นซึ่งส่วนใหญ่ร้อยละ 90 - 95 ในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีจะมีไนโตรเจนอยู่ในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน จึงได้ทำการทดลองกำจัดไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถแลกเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange) กับแอมโมเนียซึ่งอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน โดยได้ทำการทดลองที่เวลากักต่างๆ ได้แก่ 2 4 และ 8 ชม.ผลการทดลองดังรูปที่ 4.43



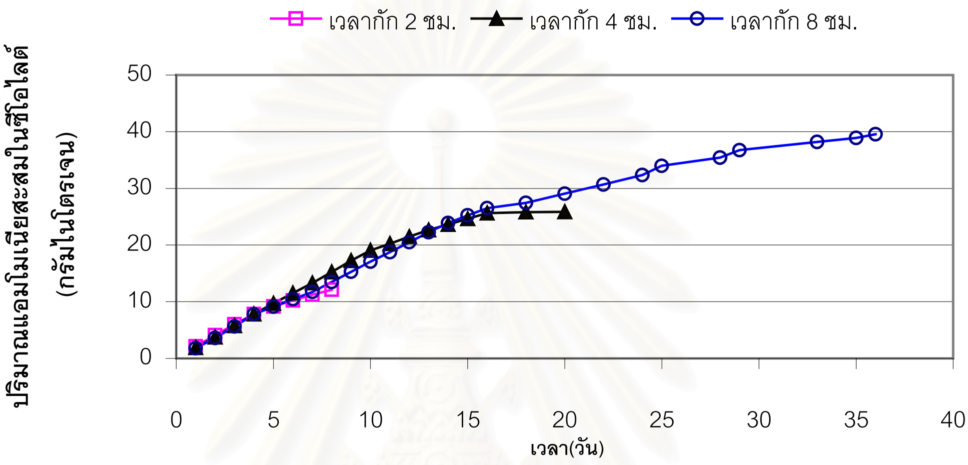




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างทีเคเอ็นที่ถูกกำจัดโดยซีโอไลต์กับระยะเวลา (สำหรับเวลากักที่ 2 4 และ 8 ชม.)

จากรูปที่ 4.43 พบว่าระยะเวลาซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนียเป็นสัดส่วนกับเวลากักที่เพิ่มขึ้นโดยเวลากักที่เหมาะสมที่สุดในแง่การใช้งานจริง คือที่ 8 ชม.เนื่องจากใช้เวลาประมาณ1เดือนจนกว่าคุณภาพน้ำออกจะมีทีเคเอ็น(ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแอมโมเนีย) เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ไม่เกิน 35 มก./ล.ไนโตรเจน) และจะต้องทำการ regeneration ใหม่โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ จากข้อมูลการกำจัดแอมโมเนียในแต่ละวันสามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียและสะสมในซีโอไลต์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4. 44



รูปที่ 4.44 ปริมาณแอมโมเนียสะสมในซีโอไลต์ที่เวลากัก (Empty bed contact time) ต่าง ๆ

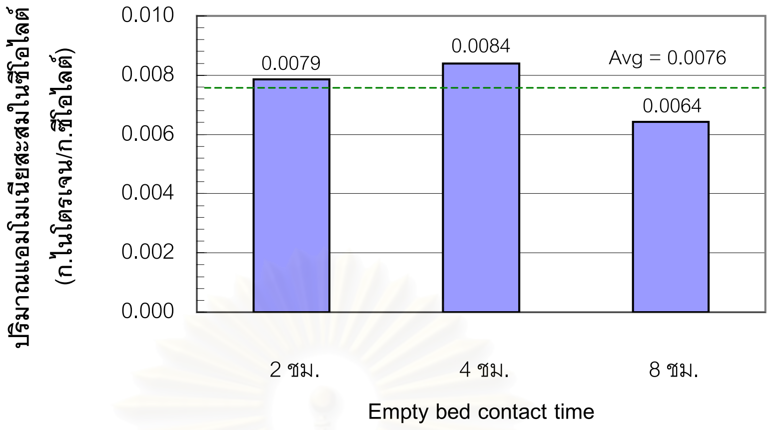
ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกกำจัดเท่ากับปริมาณแอมโมเนียที่สะสมอยู่ในซีโอไลต์ ดังนี้

แอมโมเนียสะสมในซีโอไลต์ = (แอมโมเนียน้ำเข้า – แอมโมเนียน้ำออก) x อัตราการไหลต่อวัน

โดยที่ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดที่ถูกสะสมสามารถคำนวณหาความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียต่อหน่วยน้ำหนักของซีโอไลต์ได้ ดังนี้

แอมโมเนียสะสมต่อน้ำหนักซีโอไลต์ = แอมโมเนียสะสมในซีโอไลต์ / น้ำหนักซีโอไลต์

เมื่อ Bulk density ของซีโอไลต์เท่ากับ 0.77 กรัม/ลบ.ซม. การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียที่เวลากักต่าง ๆดังแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียที่เวลากักต่าง ๆ

จากกราฟจะพบว่าที่เวลากักต่างๆ ซีโอไลต์มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียที่ไม่แตกต่างกันมากโดยที่มีค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียสะสมต่อน้ำหนักซีโอไลต์เท่ากับ0.0076ก.ไนโตรเจนต่อก.ซีโอไลต์ (0.42 มก.สมมูลต่อก.ซีโอไลต์) หรือเท่ากับ 5.85ก.ไนโตรเจนต่อลิตรซีโอไลต์ โดยที่ค่าดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อหาขนาดของเวลากักที่เหมาะสมเมื่อกำหนดค่าอัตราการไหลและความเข้มข้นแอมโมเนียในน้ำเข้า และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากัก (Empty bed contact time)กับระยะเวลา (Breakthough time)ที่ซีโอไลต์ยังคงสามารถกำจัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ทีเคเอ็นไนโตรเจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง

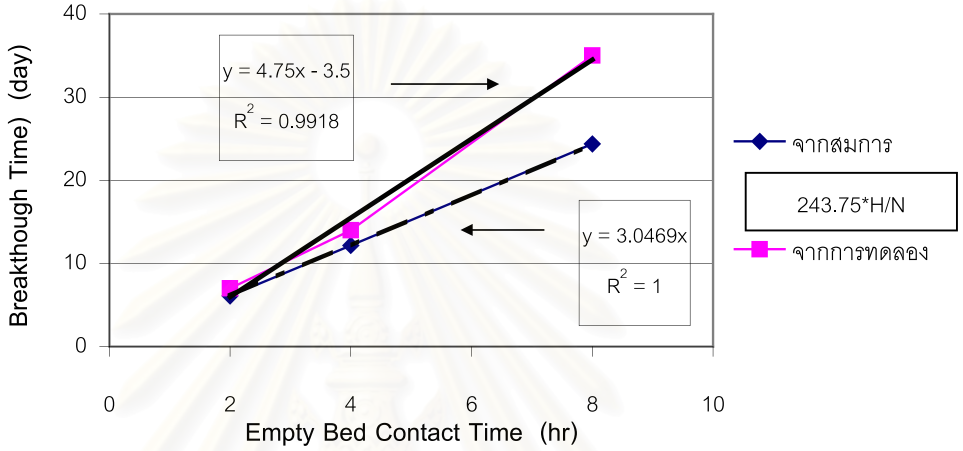
กำหนด	อัตราการไหล (ล./ชม.)	=	F	= 1 ล./ชม. (24 ล./วัน.)
	แอมโมเนียไนโตรเจนน้ำเข้า (มก./ล.)	=	N	= 80 มก./ล.
	ภาระบรรทุกแอมโมเนียไนโตรเจน (มก./วัน)	=	F*N	= 1920 มก./วัน

กำหนดเวลากักต่างๆ ดังนี้

เวลากัก (ชม.) : H	2	4	8
ปริมาตรซีโอไลต์ (ลิตร) : V (=H*F)	2	4	8
ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนีย(มก.ไนโตรเจน./ล.Zeolite)	5,850	5,850	5,850
ภาระบรรทุกแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/วัน) : F*N	1,920	1,920	1,920
ความสามารถในการกำจัดทั้งหมด (มก.) : 5,850V	11,700	23,400	46,800
เวลาที่ใช้ (วัน) : BT (= 5,850V/ FN)	6	12	24

ดังนั้นจะได้ เวลาที่ใช้ทั้งหมด (Breakthough time, BT) $= \dfrac{5850*V}{24*F*N}$

$= \dfrac{243.75*H}{N}$

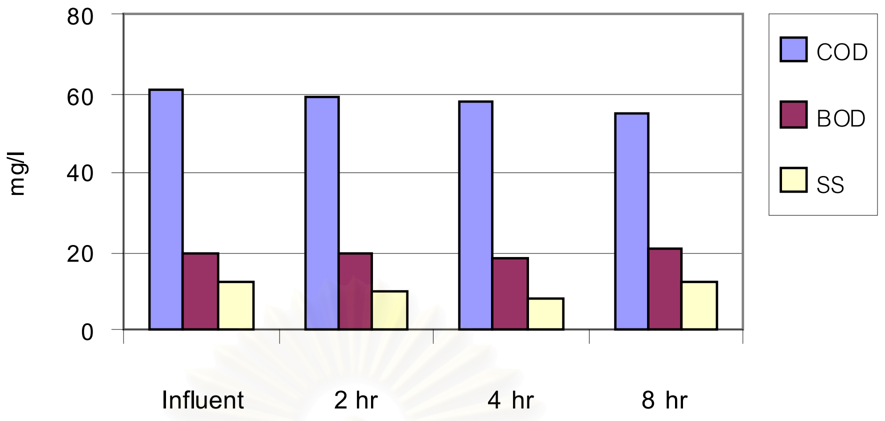


รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณจากสมการ

การเปรียบเทียบสมการข้างต้นกับ Breakthough time ที่ได้จากผลการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากและสามารถนำไปใช้ทำนาย Breakthough time ที่เวลากักต่างๆในสภาพการใช้งานจริงได้ ค่าจากการทดลองที่เวลากัก 8 ชม. มี Breaktrough time ที่ต่างจากการคำนวณ สาเหตุมาจากความเข้มข้นแอมโมเนียจากน้ำเข้าที่ช่วงเวลาการทดลองดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าที่กำหนดไว้ที่ 80 มก./ล.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.47 เป็นที่สังเกตว่าพารามิเตอร์อื่นเช่น ซีโอดี บีโอดี 5 วัน ของแข็งแขวนลอย พีเอช มีค่าไม่แตกต่างจากน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ซีโอไลต์มากเท่าใดนัก ในแง่การนำมาประยุกต์ใช้งานควบคู่กับระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อช่วยกำจัดไนโตรเจนมีความเป็นไปได้ แต่อย่างไรก็ตามก็เหมาะสำหรับน้ำเสียจากอาคารซึ่งมีขนาดน้ำเสียไม่มากจนเกินไปหรือมีความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณที่ไม่สูงมากนักเนื่องจากจะทำให้ค่าลงทุนในส่วนของซีโอไลต์มีราคาสูงมากเกินไป



รูปที่ 4.47 พารามิเตอร์ต่างๆของน้ำออกจากซีโอไลต์ที่เวลากักต่าง ๆ เทียบกับน้ำเข้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.10 พารามิเตอร์ในน้ำออกของระบบอีจีเอสบีเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งอาคาร

การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ในน้ำออกของระบบอีจีเอสบีที่เวลากัก 2 ชม.(ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.)ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีคุณภาพดีที่สุด กับมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารซึ่งกำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษดังแสดงในตารางที่ 4.13 และเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำออกจากระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) ที่บำบัดน้ำเสียชุมชนจากอาคารเดียวกัน (วริศรา และวุฒิชัย, 2545) พบว่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งในระดับหนึ่งแต่สิ่งที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนได้แก่ ทีเคเอ็นไนโตรเจนซึ่งไม่สามารถบำบัดได้โดยกระบวนการแบบไร้อากาศได้ ขณะที่ระบบอีจีเอสบีร่วมกับซีโอไลต์มีประสิทธิในการกำจัดทีเคเอ็นไนโตรเจนได้ดีมากโดยมีค่าทีเคเอ็นในน้ำออกระหว่าง 0 – 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้เพราะน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีมีค่าแอมโมเนียไนโตเจนต่อทีเคเอ็นสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคาร

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ประเภทมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้ง					ระบบ อีจีเอสบี	ระบบ ถังกรอง ไร้อากาศ	ระบบอีจีเอสบี ร่วมกับ ซีโอไลต์
		ก	ข	ค	ง	จ			
1.พีเอช	-	5-9	5-9	5-9	5-9	5-9	7.83	7.60	7.78
2.บีโอดีทั้งหมด	มก./ล.	20	30	40	50	200	20	40	20
3.ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	30	40	50	60	60	12	23	12
4.ซัลไฟด์	มก./ล.	1.0	1.0	3.0	4.0	-	0.6	-	0.5
5.ทีเคเอ็น	มก./ล.	35	35	40	40	-	49	56	0-1.0

หมายเหตุที่มา : ตัดมาจากบางส่วนของประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 111 ตอนพิเศษ 94 ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2537

ระบบอีจีเอสบีที่ความเร็วไหลขึ้นต่ำโดยมีระดับการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ที่เพียงพอต่อการกระจายสารอินทรีย์ในชั้นสลัดจ์มีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีกว่าระบบถังกรองแบบไร้อากาศโดยเฉพาะในสภาพเวลากักที่ต่ำเนื่องจากระบบสามารถกักเซลแบคทีเรียได้ในปริมาณมากและไม่หลุดออกไปจากระบบ ขณะเดียวกันระบบไม่เกิดการอุดตันง่ายจึงสามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำได้ ทั้งนี้การกำจัดบีโอดียังไม่สมบูรณ์เทียบเท่าระบบใช้อากาศโดยยังมีค่าบีโอดีทั้งหมดประมาณ 20 มก./ล. จึงยังเหมาะกับเฉพาะอาคารสูงประเภท ข. เท่านั้นและจำเป็นต้องมีระบบกำจัดไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของเวลากักและความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจากอาคารเรียน ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ระบบอีจีเอสบีบำบัดน้ำเสียจากอาคาร ที่เวลากักเพียง 2 ชม. ก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เพียงพอ เนื่องจากที่ระดับความเร็วไหลขึ้นที่เท่ากันคือ 0.5 ม./ชม. ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ที่ความเร็วไหลขึ้นดังกล่าวทำให้เกิดการกระจายมวลสาร (mass transfer) เข้าสู่เม็ดสลัดจ์ได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพสำหรับน้ำเสียจากอาคารเรียนซึ่งมีค่าซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยไม่สูงมากนัก ประกอบกับที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 25 - 28 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นช่วงที่การย่อยสลายโดยแบคทีเรียเกิดขึ้นได้ดีจึงให้ระบบยังคงรักษาประสิทธิภาพที่เวลากักที่ต่ำลงได้

2. การเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นที่สูงขึ้นถึง 12.0 ม./ชม.ในระบบอีจีเอสบีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดบีโอดี 5 วัน เนื่องจากที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.ยังเพียงพอต่อการกระจายมวลสาร (mass transfer) ในชั้นสลัดจ์ และค่าบีโอดี 5 วันที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเร็วไหลขึ้น และความเร็วไหลขึ้นที่สูงมีผลต่อแนวโน้มการลดลงของขนาดเม็ดสลัดจ์

3. ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพในการบำบัดที่สภาพความเร็วไหลขึ้นสูงๆได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการรักษาปริมาณสลัดจ์ที่อยู่ในระบบโดยไม่เกิดการล้างออก (wash out) และสามารถควบคุมปริมาณเซลแบคทีเรียที่ออกไปจากระบบในปริมาณคงที่

4. การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ สภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียชุมชนมีค่าต่ำโดยอยู่ระหว่าง 120 – 160 มก./ล. และแสดงให้เห็นว่าสภาพด่างทั้งหมดในน้ำเสียชุมชนมีค่ามากเพียงพอที่จะใช้บำบัดโดยระบบแบบไร้อากาศได้โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มสภาพด่างให้กับระบบ

5. ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนพบว่ามีปริมาณน้อยมากโดยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่และออกไปกับระบบไปพร้อมกับน้ำออก

6. ผลของเวลากักที่ 2 ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจากอาคารเรียนด้วยระบบอีจีเอสบี ที่ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. สามารถบำบัดซีโอดีและบีโอดี 5 วัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าบีโอดี 5 วัน(ทั้งหมด)เฉลี่ย 20 มก./ล. และของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 12 มก./ล.และผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอาคารประเภท ข.(ยกเว้นทีเคเอ็นไนโตรเจน) ซึ่งประสิทธิภาพดีกว่าระบบถังกรองไร้อากาศบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีค่าบีโอดี 5 วันเฉลี่ย 40 มก./ล และเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทยซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงตลอดปี

7. ทีเคเอ็นในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ การบำบัดแอมโมเนียในน้ำออกโดยใช้ซีโอไลต์ที่เวลากัก 8 ชม. สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งเป็นระยะเวลา 35 วัน และซีโอไลต์มีค่าความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 7.6 มก.ไนโตรเจนต่อก.ซีโอไลต์ ซึ่งในอาคารที่มีปริมาณน้ำเสียต่อวันไม่มากจนเกินไปนัก

8. เปรียบเทียบราคาของระบบอีจีเอสบีและอีจีเอสบีที่บำบัดร่วมกับซีโอไลต์กับระบบแอคติเวตเต็ดสลัดจ์พบว่ามีราคาที่ต่ำกว่าแอคติเวตเต็ดสลัดจ์โดยเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตรวมค่าลงทุนของระบบอีจีเอสบีและอีจีเอสบีที่บำบัดร่วมกับซีโอไลต์เท่ากับ 2.33 และ 16.86 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ (ดูในภาคผนวก จ)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.การศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบีบำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง

2.การศึกษาผลของสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อจุดกระจายน้ำเสียเข้าระบบสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ความเร็วไหลขึ้นเท่ากัน

3.การศึกษาระบบทางชีวภาพที่ไม่ใช่ระบบเติมอากาศในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำออกจากระบบอีจีเอสบีที่มีความเข้มข้นบีโอดีต่ำ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติศักดิ์ ตันชัยชนะ. <u>การใช้ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทะเลแช่แข็ง</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ณรงค์ศักดิ์ ธิติธัญญานนท์. <u>ผลกระทบของอิออนของนิเกิลและโคบอลต่อการทำงานของยูเอเอสบี.</u> วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. <u>การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน. เอกสารประกอบการสอนวิชาบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม</u>. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. <u>ระบบยูเอเอสบีใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนไทยได้จริงหรือไม่</u>. Thai Environmental Engineering Journal. ชุดที่ 15 เล่มที่ 6 (2545). หน้า 42-48.

สมพงษ์ นิลประยูร. <u>การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักแบบอัปโฟลว์แอนแอโรบิคสลัดจ์แบลงเก็ต</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.

โสภา ชินเวชกิจวาณิชย์. <u>การลดสีรีแอคทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

วริศรา สโรชวิกสิต และ วุฒิชัย โกศลสุรศักดิ์กุล. <u>การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนสำหรับถังกรองไร้อากาศ</u>. โครงงานระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Bogte, J.J. , Breure, A.M. , Van Andel, J.G. and Lettinga G. Anaerobic treatment of domestic wastewater in small scale UASB reactors. <u>Wat.Sci.Tech</u>. Vol. 27 No. 9 (1993): 75-82.

Chernicharo, C.A.L. and Machado, R.M.G. Feasibility of the UASB/AF system for domestic sewage treatment in developing countries. Wat.Sci.Tech. Vol. 38 No. 8-9 (1998): 325-332.

Chernicharo, C.A.L. and Cardoso, M.R. Development and evaluation of a partitioned Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor for the treatment of domestic sewage from small villages. Wat.Sci.Tech. Vol. 40 No. 8 (1999): 107-113.

Dolfing, J. Kinetics of methane formation by granulation sludge at low substrate concentration. Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol. 22 (1985): 77-81.

Draaijer, H. , Mass, J.A.W. , Schaapman, J.E. and Khan, A. Performance of the 5 MLD. UASB reactor for sewage treatment at Kanpur, India. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 123-133.

Fang, H.H. , Chui, H.K. and Li, Y.Y. Microbial structure and activity of UASB granules treating different wastewaters. Wat.Sci.Tech. Vol. 30 No. 12 (1994): 87-96.

Fernandes, X.A. , Cantwell, A.D. and Mosey, F.E. Anaerobic biological of sewage. Water Pollution Control Vol. 84 No. 1 (1985): 99-110.

Fiechter, A. Advance in biochemical engineering / Biotechnology. Vol 42 Heidelberg, 1990.

Guiot, S.R. , Pauss, A. and Corterton, J.W. A structure model of the anaerobic granule consortium. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 1-7.

Joseph, F.M., and Frederick G.P. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Pennsylvania : Technomic Publishing Company, Inc., 1992.

Kato, M.T. , Field, J.A. , Versteeg, P. and Lettinga, G. Feasibility of Expanded Granular Sludge Bed reactors for the anaerobic treatment of low-strength soluble wastewaters. Biotechnology and Bioengineering Vol. 44 (1994): 469-479.

Kato, M.T. , Field, J.A. and Lettinga, G. The anaerobic treatment of low strength wastewaters in UASB and EGSB reactors. Wat.Sci.Tech. Vol. 36 No. 6-7 (1997): 375-382.

Kiriyama, K. , Tanaka, Y. and Mori, I. Field test of a composite methane gas production system incorporating a membrane module for municipal sewage. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 135-141.

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

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

Lettinga, G. , Roersma, R. and Grin, P. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperature using a granular bed UASB reactor. Biotechnology and Bioengineering Vol. 25 (1983): 1701-1723.

Lettinga, G. , De Man, A. , Van Der Last, A.R.M. , Wiegant, W. , Van Knippenberg, K. , Frijns, J. and Van Buuren J.C.L. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. Wat.Sci.Tech. Vol. 27 No. 9 (1993): 67-73.

Lettinga, G. Sustainable intregrated biological wastewater treatment. Wat.Sci.Tech. Vol. 33 No. 3 (1996): 85-98.

Louwe Kooijmans, J. and Van Velsen, E.M. Apllication of the UASB process for treatment of domestic sewage under subtropical conditions, the Cali case. In: Proceedings of the Aquatech water treatment conference "Anaerobic treatment a grown-up technology". Amsterdam, The Netherlands (September 15-19, 1986): 423-436.

Metcalf and Eddy, Inc. Wastewater engineering : treatment , disposal , reuse. New York : McGraw-Hill, 1991.

McKane, L. and Kendal, J. Microbiology : essentials and applications. 2nd ed. USA.: McGraw-Hill, 1996.

Rebec, S. , Ruskova, J. and Gerbens, S. High-rate anaerobic treatment of wastewater under psychrophilic conditions. J. Ferment. Bioeng. Vol 80 No. 5 (1995): 499-506.

Rinzema, A. , Van Veen, H. and Lettinga, G. Anaerobic digestion of triglyceride emulsions in Expanded Granular Sludge Bed reactors with modified sludge seperators. Environmental Technology Vol. 14 (1993): 423-432.

Ruiz, I. , Soto, M. , Veiga, M.C. , Ligero, P. , Vega, A. and Blazquez, R. Performance of and biomass characterisation in a UASB reactor treating domestic wastewater at ambient temperature. Water SA. Vol. 24 No. 3 (1998): 215-222.

Schellinkhout, A. UASB technology for sewage treatment : experience with a full scale plant and its applicability in Egypt. Wat.Sci.Tech. Vol. 27 No. 9 (1993): 173-180.

Schellinkhout, A. and Collazos, C.J. Full-scale application of the UASB technology for sewage treatment. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 159-166.

Schmidt, J.E. and Ahring, B.K. Granular sludge formation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors. Biotechnology and Bioengineering. Vol. 49 (1996): 229-246.

Seghezzo, L. , Zeeman, G. , Van Lier, J.B. , Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G. A review : The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. Bioresource Technology Vol. 65 (1998): 175-190.

Van der Last, A.R.M. and Lettinga, G. Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climateic (Dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 167-178.

Van Haandel, A.C. and Lettinga, G. Anaerobic Sewage Treatment. Chicester John Wiley&Sons Ltd., 1994.

Van Lier, J.B. , Rebec, S. and Lettinga, G. High rate anaerobic wastewater treatment under Psychrophiclic and thermophilic conditions. Wat.Sci.Tech. Vol. 35 No. 10 (1997): 199-206.

Vieira, S.M.M. and Garcia Jr., A.D. Sewage treatment by UASB-reactor operation results and recommendations for design and utilization. Wat.Sci.Tech. Vol. 25 No. 7 (1992): 143-157.

Vieira S.M.M. , Carvalho, J.L. , Barijan , F.P.O. and Rech, C.M. Application of the UASB technology for sewage treatment in samll community at sumare , Sao Paulo state. Wat.Sci.Tech. Vol. 30 No. 12 (1994): 203-210.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 * R1 = เวลากัก 6 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.

Date	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$			VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
1-Feb-02	112	56	60	75	36	34	29	27	16	29	27	16	259	267	266	18	26	20	24.1	24.1	24.1	7.81	7.88	7.83	-286	-354	47	47	47	-	-	-
3-Feb-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	289	278	263	30	41	34	24.3	24.5	24.3	7.89	8.02	7.98	-340	-362	-	-	-	-	-	-
4-Feb-02	124	74	66	74	38	34	40	24	20	35	24	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Feb-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	345	324	335	40	33	44	23.1	23.1	23.1	7.78	7.74	7.68	-327	-344	-	-	-	-	-	-
6-Feb-02	113	50	53	-	-	-	41	23	21	35	23	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7-Feb-02	161	50	41	-	-	-	32	17	18	32	17	18	289	299	285	16	19	25	22.8	22.4	22.4	8.01	7.94	7.91	-351	-355	-	-	-	-	-	-
8-Feb-02	108	46	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9-Feb-02	152	48	50	84	24	25	34	22	16	34	22	16	248	255	250	29	33	38	24.3	24.3	24.4	7.98	7.82	7.88	-350	-347	71	69	70	3.3	0.7	0.7
10-Feb-02	108	49	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-Feb-02	102	48	48	-	-	-	42	24	24	41	24	24	279	274	288	42	38	37	25.4	25.4	25.6	7.65	7.75	7.84	-365	-355	-	-	-	-	-	-
12-Feb-02	160	49	41	64	22	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51	46	36	4.2	1.4	0.7
13-Feb-02	102	56	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14-Feb-02	136	48	60	-	-	-	27	15	20	24	15	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15-Feb-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	378	433	65	60	54	22.2	23.5	22.4	7.98	7.82	7.89	-343	-354	-	-	-	-	-	-
17-Feb-02	144	75	58	-	-	-	33	16	16	33	16	16	257	264	267	24	22	32	23.5	23.1	23.4	7.82	7.65	7.86	-325	-314	-	-	-	-	-	-
18-Feb-02	150	21	13	67	18	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19-Feb-02	75	53	32	-	-	-	26	16	15	26	16	15	324	311	319	34	32	34	26.4	26.4	26.3	8.06	7.92	7.99	-338	-364	-	-	-	-	-	-
22-Feb-02	115	54	54	94	22	24	25	20	24	25	20	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51	50	50	2.8	1.1	1
23-Feb-02	207	77	65	-	-	-	32	20	16	32	20	16	330	352	347	66	66	58	23.2	23.5	23.7	7.81	8.01	7.88	-352	-351	-	-	-	-	-	-
24-Feb-02	194	70	86	-	-	-	35	16	16	34	16	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Feb-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	388	345	385	45	46	48	24.1	24.1	24.3	7.89	7.85	7.78	-358	-350	-	-	-	-	-	-
26-Feb-02	164	77	69	72	16	19	41	21	21	41	21	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	44	43	-	-	-
27-Feb-02	212	45	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	364	296	235	48	34	38	24.7	24.7	24.8	7.66	7.71	7.78	-347	-364	-	-	-	-	-	-
28-Feb-02	142	31	43	-	-	-	44	27	19	40	27	16	352	322	337	54	50	59	24.6	24.6	24.6	7.85	7.86	8.03	-354	-367	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 R1 = เวลากัก 6 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.

Date	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$			VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
1-Mar-02	114	23	23	60	22	20	20	14	10	20	14	10	269	281	225	60	56	38	25.7	25.7	25.8	7.64	7.71	7.79	-334	-342	-	-	-	-	-	-
2-Mar-02	117	32	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-Mar-02	135	40	40	-	-	-	38	11	10	32	8	8	268	263	256	42	48	48	24.3	25.1	24.4	7.62	7.68	7.84	-350	-342	-	-	-	-	-	-
5-Mar-02	128	48	40	74	20	19	24	9	15	20	9	15	342	317	331	57	33	54	24.4	24.4	24.6	7.84	7.74	7.63	-372	-364	51	50	49	2.5	0.5	0.5
7-Mar-02	136	64	60	-	-	-	15	13	8	15	13	8	358	339	346	50	43	42	24.8	24.8	24.8	7.95	7.85	7.65	-368	-330	-	-	-	-	-	-
9-Mar-02	132	52	52	-	-	-	26	12	15	26	11	15	386	425	396	58	65	38	25.4	25.6	25.4	7.96	7.97	8.06	-320	-334	-	-	-	-	-	-
11-Mar-02	172	56	64	63	16	22	47	7	12	42	7	12	328	390	414	39	36	36	25.6	26.6	26.7	7.81	7.87	7.95	-348	-352	44	44	42	2.1	0.5	0.9
13-Mar-02	137	51	42	-	-	-	48	22	23	48	22	23	330	354	322	66	54	48	25.4	25.6	25.4	7.96	7.87	8.06	-324	-365	-	-	-	-	-	-
15-Mar-02	114	47	30	69	22	27	30	11	11	28	11	11	244	341	352	54	38	42	26.3	26.3	26.8	7.94	7.84	7.69	-354	-352	-	-	-	-	-	-
17-Mar-02	131	54	70	-	-	-	54	14	12	51	14	12	375	377	351	40	48	35	27.3	27.4	27.4	7.88	7.89	7.73	-332	-347	-	-	-	-	-	-
19-Mar-02	137	64	47	81	17	16	48	16	11	43	16	11	345	350	366	37	32	21	26.5	26.4	26.5	7.84	7.71	7.83	-344	-374	68	64	66	3.4	0.8	0.7
21-Mar-02	132	33	41	-	-	-	29	16	14	26	16	14	395	388	384	44	43	38	28.1	28.1	28.4	7.62	7.98	7.96	-325	-334	-	-	-	-	-	-
23-Mar-02	155	37	46	57	26(13)	19(11)	40	10	10	40	10	10	258	248	248	46	38	46	28.6	28.4	28.7	7.78	7.8	7.82	-310	-345	50	48	50	3.3	0.7	0.8
25-Mar-02	145	41	41	-	-	-	20	9	12	20	9	12	432	384	398	45	53	51	28.4	28.5	26.3	7.71	7.7	7.78	-364	-352	-	-	-	-	-	-
27-Mar-02	141	46	41	75	11(8)	14(9)	24	12	12	22	12	12	384	321	346	43	45	40	28.3	28.5	28.1	7.88	7.82	7.94	-364	-350	-	-	-	-	-	-
29-Mar-02	132	37	41	-	-	-	29	7	10	25	7	10	366	284	312	52	42	40	26.4	26.4	26.8	7.98	7.83	7.68	-345	-338	-	-	-	-	-	-
31-Mar-02	124	46	46	70	21(10)	17(10)	35	11	10	33	11	10	378	334	354	64	32	23	26.3	26.4	26.7	7.81	7.96	8.03	-325	-337	44	44	44	-	-	-
Average *	141	46	47	72	20	20	34	12	11	32	12	11	341	337	338	50	44	40	26.4	26.5	26.4	7.83	7.83	7.84	-342	-347	50	49	49	2.8	0.6	0.7
number *	19	19	19	13	13	13	9	9	9	9	9	9	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	7	7	7	4	4	4
SD.*	23	13	13	10	4	4	11	3	1	11	3	1	55	50	55	9	10	9	1.42	1.33	1.31	0.12	0.10	0.15	19	12	8	7	8	0.6	0.2	0.2

* คำนวณจากช่วงสภาวะคงตัว

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 R1 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม.

วันที่	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$			VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
14-May-02	129	51	43	54	22	18	24	23	13	24	23	13	258	196	186	74	54	44	28.4	26.9	27.2	8.01	7.95	7.96	-330	-330	48	48	45	2.0	1.4	0.8
15-May-02	142	54	50	68	21	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16-May-02	149	51	45	-	-	-	29	9	17	29	9	17	300	240	240	60	40	40	27.2	27.5	27.5	8.00	7.86	7.92	-350	-344	-	-	-	-	-	-
17-May-02	129	56	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18-May-02	182	70	74	79	24	20	50	26.5	31.5	50	27	32	300	236	240	60	36	50	27.6	28.8	27.3	7.88	7.65	7.95	-348	-362	-	-	-	-	-	-
19-May-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	2.8	0.7	0.7
20-May-02	168	41	41	-	-	-	48	22	23	48	22	23	320	296	304	68	46	42	28.4	26.8	26.8	8.04	7.91	7.85	-320	-330	35	34	32	-	-	-
21-May-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	4.6	1.0	1.1
22-May-02	173	59	60	66	23	18	39	10	13	39	10	13	302	296	294	38	44	38	28.3	28.2	28.3	8.03	7.72	7.96	-354	-338	-	-	-	-	-	-
24-May-02	197	45	57	-	-	-	44	14	15	44	14	15	355	338	339	40	25	25	28.6	29.0	28.5	8.26	8.00	8.10	-341	-338	51	46	36	-	-	-
26-May-02	293	81	61	-	-	-	55	11	17	55	11	17	272	214	188	54	21	22	28.3	27.7	27.7	8.05	8.12	8.22	-331	-337	-	-	-	-	-	-
27-May-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	41	42	-	-	-
28-May-02	133	81	77	65	18	22	48	10.5	17	48	11	17	212	256	262	44	22	18	27.8	26.6	27.3	8.05	8.07	8.05	-344	-358	-	-	-	-	-	-
29-May-02	154	34	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-May-02	168	38	42	-	-	-	54	8	17	54	8	17	317	295	302	52	24	28	28.0	28.0	28.1	7.90	7.71	7.90	-352	-374	51	50	50	2.8	1.6	1.6
2-Jun-02	238	63	46	70	19	18	70	23	9.5	70	23	9	314	266	284	46	17	26	27.0	28.8	27.8	8.42	8.21	8.21	-361	-332	-	-	-	-	-	-
3-Jun-02	186	58	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-Jun-02	194	50	58	-	-	-	28	11	17	28	11	17	260	264	264	50	18	34	28.5	26.1	25.9	8.21	8.04	8.07	-350	-360	51	49	51	-	-	-
5-Jun-02	168	50	63	65	19	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.2	1.8	1.2
6-Jun-02	211	54	66	-	-	-	65	34	19	65	34	19	296	264	274	48	22	30	28.1	27.7	27.6	8.48	8.09	8.12	-348	-325	-	-	-	-	-	-
7-Jun-02	178	62	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8-Jun-02	190	50	70	66	21	20	36	8.5	12	36	8	12	318	302	296	70	46	54	28.1	28.4	28.4	8.30	8.21	8.10	-330	-330	51	50	49	-	-	-
9-Jun-02	185	42	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10-Jun-02	182	62	79	-	-	-	49	10	12	49	10	12	342	336	326	52	32	18	26.0	26.0	25.4	7.95	7.80	7.90	-312	-328	-	-	-	1.4	0.6	0.6

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 * R1 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม.

วันที่	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$			VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
11-Jun-02	161	48	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67	67	67	-	-	-
12-Jun-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	340	328	334	46	28	22	28.6	26.8	27.0	8.50	8.32	8.23	-314	-320	-	-	-	-	-	-
13-Jun-02	168	59	55	77	18	18	40	8	12	40	8	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15-Jun-02	147	63	55	-	-	-	54	17	11	54	17	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2	0.4	0.8
16-Jun-02	198	48	55	-	-	-	57	12	10	57	12	10	248	248	232	58	32	28	27.6	28.4	28.4	8.00	7.77	7.84	-354	-350	-	-	-	-	-	-
17-Jun-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69	69	66	-	-	-
18-Jun-02	205	67	71	61	18(14)	19(15)	56	13	17	56	13	17	258	198	188	74	54	44	28.1	27.7	27.6	7.82	7.64	7.79	-331	-357	-	-	-	-	-	-
19-Jun-02	107	45	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-Jun-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	48	50	-	-	-
21-Jun-02	255	54	54	-	-	-	74	16	12	74	16	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22-Jun-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	274	274	264	62	38	14	28.7	28.9	28.6	8.00	7.82	7.87	-330	-340	-	-	-	-	-	-
23-Jun-02	196	54	50	-	-	-	55	12	7	55	12	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Jun-02	190	54	54	-	-	-	67	8	14	67	8	14	280	268	268	56	20	26	28.8	27.8	27.8	8.06	7.64	7.74	-356	-354	-	-	-	-	-	-
25-Jun-02	-	-	-	70	20(10)	19(10)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	0.7	0.9
26-Jun-02	171	63	71	-	-	-	54	14	16	54	14	16	250	246	224	42	44	36	28.0	28.0	28.0	8.15	8.02	8.02	-334	-321	-	-	-	-	-	-
27-Jun-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	48	45	-	-	-
28-Jun-02	166	47	55	-	-	-	44	16	15	44	16	15	286	292	273	50	20	18	28.8	27.9	28.0	8.12	7.87	7.82	-340	-332	-	-	-	-	-	-
30-Jun-02	168	51	59	62	17(10)	18(10)	57	18	22	57	18	22	328	284	326	66	20	20	29.2	27.3	27.8	7.97	7.99	8.00	-340	-340	76	73	75	3.3	1.4	0.5
1-Jul-02	152	51	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average *	184	54	57	67	19	19	58	13	14	58	13	14	293	274	273	57	30	28	28.1	27.7	27.6	8.15	7.98	7.98	-338	-337	59	58	58	3.0	1.0	0.8
number *	22	22	22	7	7	7	8	8	8	8	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	7	7	7	5.0	5.0	5.0
SD.*	30	7	11	5	1	1	9	3	5	9	3	5	33	36	43	13	12	11	0.86	0.92	0.95	0.22	0.20	0.16	15	13	11	11	12	1.2	0.6	0.3

* คำนวณจากช่วงสภาวะคงตัว

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองช่วงที่ 3

R1 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.

วันที่	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$			VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
4-Aug-02	135	45	45	86	32	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8-Aug-02	108	37	87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-Aug-02	159	69	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12-Aug-02	126	46	55	61	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16-Aug-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	436	416	92	76	80	27.8	28.0	27.9	8.25	8.13	8.10	-354	-342	-	-	-	-	-	-
17-Aug-02	144	62	70	74	17	18	60	14	26	60	15	29	426	456	428	98	96	92	27.2	27.0	26.9	8.29	8.23	8.12	-358	-364	71	74	72	2.1	0.7	0.6
19-Aug-02	-	-	-	-	-	-	63	28	26	61	24	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-Aug-02	130	61	69	71	19	22	-	-	-	-	-	-	390	374	372	90	84	76	27.1	27.2	27.4	8.32	8.12	8.13	-350	-374	90	93	92	-	-	-
21-Aug-02																														5.2	1.2	1.3
22-Aug-02	-	-	-	-	-	-	74	39	57	69	38	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23-Aug-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	406	380	390	86	60	50	28.0	27.3	27.4	8.24	8.14	8.04	-364	-368	-	-	-	-	-	-
24-Aug-02	194	66	62	89	21	21	34	12	23	34	12	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	94	94	94	-	-	-
25-Aug-02	126	69	69	79	21	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Aug-02	120	72	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	0.5	1.2
27-Aug-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	388	368	370	98	76	74	27.8	27.8	27.4	8.45	8.06	8.08	-342	-354	78	86	85	-	-	-
28-Aug-02	132	80	68	-	-	-	48	6	8	46	6	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29-Aug-02																											81	81	80	-	-	-
30-Aug-02	124	64	68	68	22	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.1	0.6	0.8
31-Aug-02	157	67	71	73	18	19	-	-	-	-	-	-	378	392	380	96	76	82	28.2	27.7	28.4	8.17	8.14	8.10	-330	-361	74	76	77	-	-	-
1-Sep-02	142	47	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	348	336	372	86	74	76	28.8	28.9	28.4	8.35	8.26	8.17	-352	-378	70	71	69	4.4	1.0	0.6
2-Sep-02	207	59	59	-	-	-	52	14	16	50	14	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	72	66	-	-	-
4-Sep-02	163	57	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78	78	78	1.9	0.6	0.4
5-Sep-02	163	57	65	-	-	-	31	8	27	30	8	26	386	386	370	84	68	68	26.0	26.7	26.9	8.46	8.08	8.31	-378	-375	-	-	-	-	-	-
6-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	388	370	90	82	74	27.2	26.0	26.1	8.50	8.12	8.19	-380	-368	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 R1 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. Inf = น้ำเสียในถังพัก

R2 = เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม.

วันที่	COD (mg/l)			BOD5 (mg/l) total /(soluble)			SS (mg/l)			VSS (mg/l)			Alkalinity (mg/l) $CaCO_3$		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
7-Sep-02	183	57	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8-Sep-02	138	73	69	-	-	-	36	8	17	34	7	17	368	396	371
9-Sep-02	195	57	65	59	19	18	-	-	-	-	-	-	380	346	350
10-Sep-02	289	65	69	62	26	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-Sep-02	-	-	-	-	-	-	22	11	12	19	11	11	-	-	-
12-Sep-02	141	79	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	346	400	374
13-Sep-02	123	70	74	-	-	-	13	4	9	11	4	9	-	-	-
14-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	386	376	374
15-Sep-02	133	61	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	346	350
17-Sep-02	176	64	72	55	24	19	30	9	9	30	9	9	-	-	-
18-Sep-02	104	84	68	71	19	15	42	3	11	39	3	9	380	364	326
20-Sep-02	151	73	57	59	22	15	-	-	-	-	-	-	408	400	378
21-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22-Sep-02	112	52	52	64	21(12)	18(9)	-	-	-	-	-	-	350	336	340
23-Sep-02	146	37	28	70	19(13)	17(9)	41	15	6	41	15	6	-	-	-
24-Sep-02	140	52	40	64	17(8)	18(11)	-	-	-	-	-	-	360	344	332
25-Sep-02	148	56	48	-	-	-	34	13	15	34	13	15	352	344	337
26-Sep-02	168	52	48	-	-	-	38	13	17	38	13	17	396	354	338
28-Sep-02	-	-	-	-	-	-	63	16	9	63	16	9	-	-	-
Average *	184	54	57	67	19	19	58	13	14	58	13	14	376	368	355
number *	22	22	22	7	7	7	8	8	8	8	8	8	13	13	13
SD.*	30	7	11	5	1	1	9	3	5	9	3	5	23	24	19

วันที่	VFA (mg/l) $CaCO_3$			Temp (°c)			pH			ORP (mV)		TKN (mg.N/l)			Sulfide (mg/l)		
	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2	R1	R2	Inf	R1	R2	Inf	R1	R2
7-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0	1.2	1.0
8-Sep-02	90	75	68	28.1	28.3	27.8	8.19	8.19	8.05	-355	-360	-	-	-	-	-	-
9-Sep-02	80	68	68	25.8	24.9	25.0	8.54	8.14	8.09	-342	-357	83	73	77	4.4	1.0	0.8
10-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.4	2.4	0.8
11-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12-Sep-02	74	80	74	28.2	27.4	27.3	8.56	8.17	8.17	-384	-376	-	-	-	-	-	-
13-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14-Sep-02	72	56	58	28.5	27.6	27.8	8.35	8.12	8.04	-352	-352	-	-	-	-	-	-
15-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68	62	68	-	-	-
16-Sep-02	70	54	50	28.4	28.2	28.1	8.42	8.16	8.15	-365	-384	-	-	-	-	-	-
17-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18-Sep-02	76	74	62	28.4	28.3	28.3	8.30	8.09	8.10	-384	-345	-	-	-	-	-	-
20-Sep-02	104	94	88	27.4	27.0	27.0	8.31	8.14	8.07	-355	-338	89	89	87	-	-	-
21-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	1.0	1.4
22-Sep-02	70	66	64	28.7	27.4	27.6	8.26	8.07	8.02	-382	-375	-	-	-	5.8	1.6	1.2
23-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Sep-02	88	72	70	29.1	29.3	28.8	8.22	8.12	8.13	-365	-364	-	-	-	5.8	0.8	0.6
25-Sep-02	86	72	74	27.7	27.6	27.5	8.27	8.14	8.05	-350	-356	-	-	-	-	-	-
26-Sep-02	92	74	70	28.2	27.4	27.4	8.44	8.31	8.26	-345	-362	73	74	75	-	-	-
28-Sep-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average *	83	72	68	27.8	27.4	27.4	8.37	8.14	8.13	-364	-362	76	74	74	4.7	1.4	1.0
number *	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	7	7	7	5.0	5.0	5.0
SD.*	10	10	9	1.00	1.11	0.98	0.12	0.06	0.09	16	13	8	8	7	1.2	0.7	0.3

* คำนวณจากช่วงสภาวะคงตัว

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการกระจายขนาดของสลัดจ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่อง Particle Size Analyzer

การวัดขนาดของเม็ดสลัดจ์ได้วิเคราะห์อยู่ในรูปแแบบของการกระจายขนาด (Particle size distribition) โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเม็ดแบคทีเรียโดยเครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 การวัดขนาดอาศัยหลักการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของเม็ดสลัดจ์ด้วยระบบเซนเซอร์ที่ส่งแสงมากระทบกับอนุภาคขณะที่สลัดจ์ถูกสูบไหลผ่านเลนส์และทำการประมวลผลการวัดด้วยการคำนวณ การทำการวัดจำเป็นต้องกำหนด RI และตัวกลาง (Dispersant)ที่เหมาะสม โดยในการวิเคราะห์นี้ตัวกลางที่ใช้คือ น้ำกลั่น นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องกำหนดอัตราเร็วในการสูบของเครื่องสูบที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้อนุภาคสลัดจ์เกิดการกระทบกระเทือน ในการวิเคราะห์สลัดจ์พบว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

1. **อนุภาคที่มีรูปร่างกลม** (granule)หรือใกล้เคียงเช่นเม็ดสลัดจ์ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.5 - 2.0 มม. จะถูกวัดเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

2. **อนุภาคที่เป็นฟลอค** (floc) มีลักษณะเป็นปุยซึ่งมีความหนาแน่นต่ำและมีรูปทรงที่หลากหลายจะถูกตั้งสมมติฐานว่ามีรูปทรงกลมและถูกคำนวณกลับเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อเป็นค่าตัวแทนของขนาดฟลอค

Bimodal distribution - เนื่องจากข้อมูลของขนาดสลัดจ์แบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก ดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงสามารถสังเกตได้ว่ากราฟการกระจายของขนาดสลัดจ์ในทุกชุดการทดลองจะมีจุดยอด (peak) 2 ตำแหน่ง คือ ช่วงที่สูงกว่า 500 ไมครอนซึ่งเป็นตัวแทนของ granule และช่วงที่ต่ำกว่า 500 ไมครอนซึ่งเป็นตัวแทนของ floc ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการกระจายในลักษณะของ Bimodal distribution ซึ่งการใช้ค่า D50 เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละชุดการทดลองจึงไม่เหมาะสม ดังนั้น จึงได้เลือกค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดความเร็วไหลขึ้นโดยได้เลือกค่า D10 D50 และD90 ซึ่งเป็นขนาดของสลัดจ์ที่ปริมาณร้อยละ 10 50 และ 90 ของสลัดจ์ทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ได้ช่วงข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยค่าเดียวและทำให้สามารถติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของสลัดจ์ที่เป็น floc และ granule ได้อย่างชัดเจน

Result Pellet Analysis Report

Sample Name:
Start up

SOP Name:
tul

Measured:
Wednesday, January 08, 2003 1:55:54 PM

Sample Source & type:
EGSB sludge

Measured by:
Tulachai Jaemsai

Analysed:
Wednesday, January 08, 2003 1:55:55 PM

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Measurement

Particle Name:
pellet

Accessory Name:

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.520

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
10.20 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
1.764 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.6964 %Vol

Span :
1.290

Uniformity:
0.374

Result units:
Volume

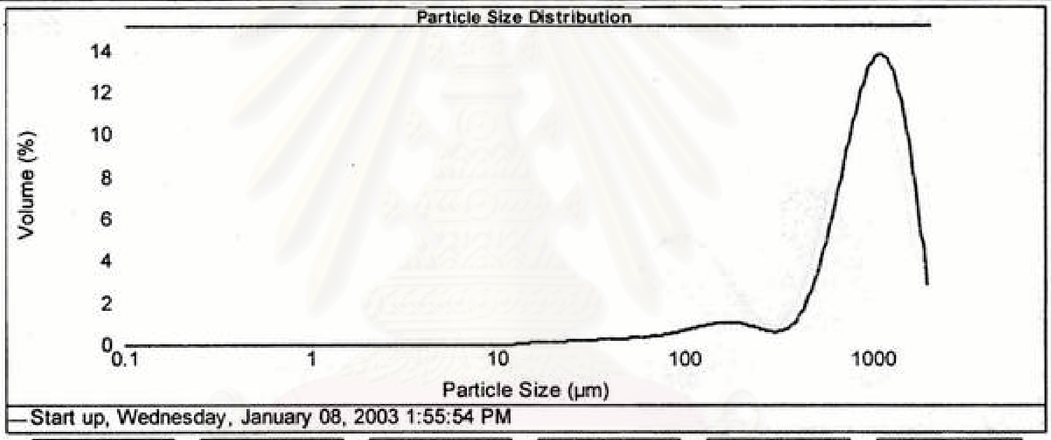
Specific Surface Area:
0.013 m^2/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
459.953 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
965.535 um

d(0.1): 314.252 um **d(0.5):** 964.951 um **d(0.9):** 1558.583 um

---



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.00	50.238	0.24	355.656	0.70
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.00	56.368	0.26	399.052	1.15
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.00	63.246	0.29	447.744	1.90
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.00	70.963	0.34	502.377	2.95
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.00	79.621	0.40	563.677	4.29
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.02	89.337	0.47	632.456	5.81
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.06	100.237	0.55	709.627	7.38
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.07	112.468	0.63	796.214	8.79
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.08	126.191	0.71	893.367	9.85
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.10	141.589	0.77	1002.374	10.37
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.12	158.866	0.79	1124.683	10.23
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.00	25.179	0.14	178.250	0.77	1261.915	9.34
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.00	28.251	0.15	200.000	0.71	1415.892	7.89
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.00	31.698	0.17	224.404	0.62	1588.656	5.52
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.00	35.566	0.19	251.785	0.52	1782.502	3.30
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.00	39.905	0.20	282.508	0.45	2000.000	
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.00	44.774	0.22	316.979	0.49		
0.142		1.002		7.096		50.238		355.656			

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 27
08 Jan 2003 03:34:09

รูปที่ ข-1 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
ในช่วงเริ่มต้นระบบ (Start up)

Result Pellet Analysis Report

Sample Name: HRT 6 hr V 0.5 m/hr
Sample Source & type: EGSB sludge
Sample bulk lot ref:

SOP Name: tul
Measured by: Tulachai Jaemsai
Result Source: Measurement

Measured: Wednesday, January 08, 2003 2:27:25 PM
Analysed: Wednesday, January 08, 2003 2:27:26 PM

Particle Name: pellet
Particle RI: 1.520
Dispersant Name: Water

Accessory Name:
Absorption: 0.1
Dispersant RI: 1.330

Analysis model: General purpose
Size range: 0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual: 1.096 %

Sensitivity: Enhanced
Obscuration: 17.95 %
Result Emulation: Off

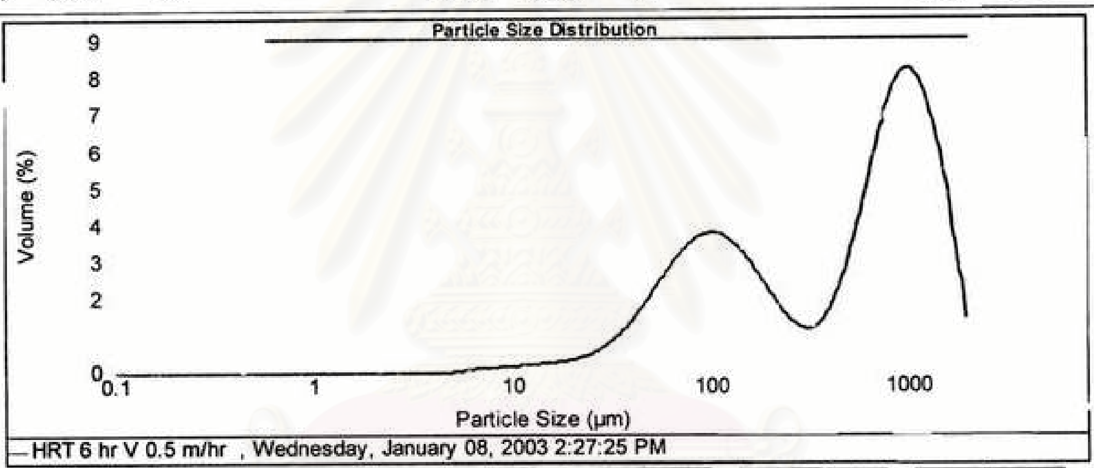
Concentration: 0.3959 %Vol
Specific Surface Area: 0.0417 m^2/g

Span : 2.246
Surface Weighted Mean D[3,2]: 143.728 um

Uniformity: 0.767
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 625.293 um

Result units: Volume

d(0.1): 59.017 um **d(0.5):** 584.426 um **d(0.9):** 1371.373 um



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.08	50.238	1.76	355.656	1.11
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.10	56.368	2.05	399.052	1.50
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.12	63.246	2.33	447.744	2.07
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.13	70.963	2.56	502.377	2.79
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.15	79.621	2.73	563.677	3.62
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.17	89.337	2.82	632.456	4.46
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.18	100.237	2.83	709.627	5.24
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.20	112.468	2.75	796.214	5.83
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.23	126.191	2.58	893.367	6.16
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.28	141.589	2.35	1002.374	6.16
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.34	158.866	2.08	1124.683	5.79
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.00	25.179	0.43	178.250	1.77	1261.915	5.09
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.00	28.251	0.56	200.000	1.47	1415.892	4.16
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.00	31.698	0.73	224.404	1.19	1588.656	2.84
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.01	35.566	0.94	251.785	0.98	1782.502	1.67
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.05	39.905	1.19	282.508	0.88	2000.000	
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.07	44.774	1.46	316.979	0.91		
0.142		1.002		7.096		50.238		355.656			

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 45
08 Jan 2003 03:35:37 PM

รูปที่ ข-2 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 6 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.

Result Pellet Analysis Report

Sample Name:
HRT 2 hr V 0.5 m/hr

Sample Source & type:
EGSB sludge

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
tul

Measured by:
Tulachai Jaemsai

Result Source:
Measurement

Measured:
Wednesday, January 08, 2003 2:08:06 PM

Analysed:
Wednesday, January 08, 2003 2:08:07 PM

Particle Name:
pellet

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.537 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
20.91 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.3810 %Vol

Specific Surface Area:
0.0514 m²/g

Span :
4.362

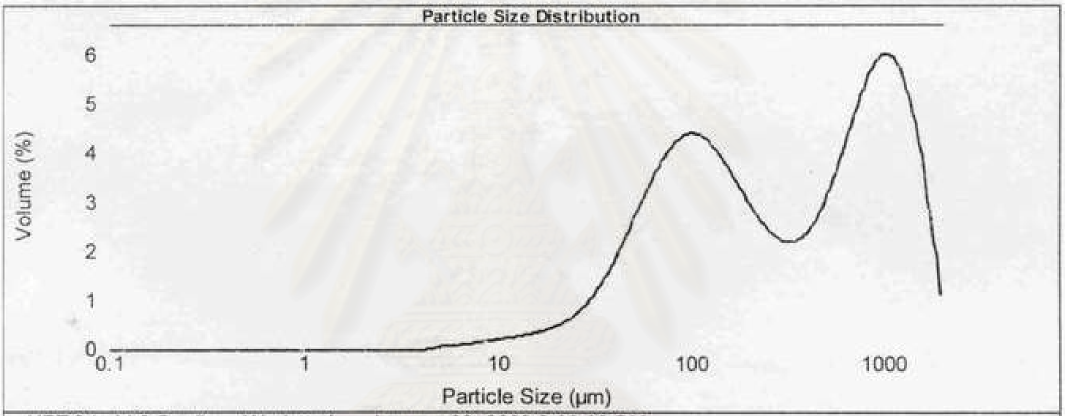
Surface Weighted Mean D[3,2]:
116.818 um

Uniformity:
1.43

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
514.040 um

Result units:
Volume

d(0.1): 51.326 um   d(0.5): 283.589 um   d(0.9): 1288.281 um



—HRT 2 hr V 0.5 m/hr , Wednesday, January 08, 2003 2:08:06 PM

Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.00
4.477	0.02
5.024	0.06
5.637	0.06
6.325	0.08
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.10
7.962	0.12
8.934	0.14
10.024	0.17
11.247	0.19
12.619	0.22
14.159	0.25
15.887	0.28
17.825	0.33
20.000	0.39
22.440	0.48
25.179	0.59
28.251	0.75
31.698	0.95
35.566	1.19
39.905	1.47
44.774	1.78
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	2.12
56.368	2.44
63.246	2.75
70.963	3.00
79.621	3.20
89.337	3.30
100.237	3.32
112.468	3.25
126.191	3.10
141.589	2.90
158.866	2.66
178.250	2.40
200.000	2.16
224.404	1.94
251.785	1.77
282.508	1.67
316.979	1.65
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	1.71
399.052	1.88
447.744	2.14
502.377	2.50
563.677	2.93
632.456	3.39
709.627	3.85
796.214	4.23
893.367	4.48
1002.374	4.53
1124.683	4.35
1261.915	3.90
1415.892	3.25
1588.656	2.25
1782.502	1.34
2000.000	

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 51
08 Jan 2003 03:39:31 PM

รูปที่ ข-3 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม.

Result Pellet Analysis Report

Sample Name:
HRT 2 hr V 3.5 m/hr

Sample Source & type:
EGSB sludge

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
tul

Measured by:
Tulachai Jaemsai

Result Source:
Measurement

Measured:
Wednesday, January 08, 2003 2:15:47 PM

Analysed:
Wednesday, January 08, 2003 2:15:48 PM

Particle Name:
pellet

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.871 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
18.79 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.4770 %Vol

Specific Surface Area:
0.0364 m²/g

Span :
1.819

Surface Weighted Mean D[3,2]:
164.766 um

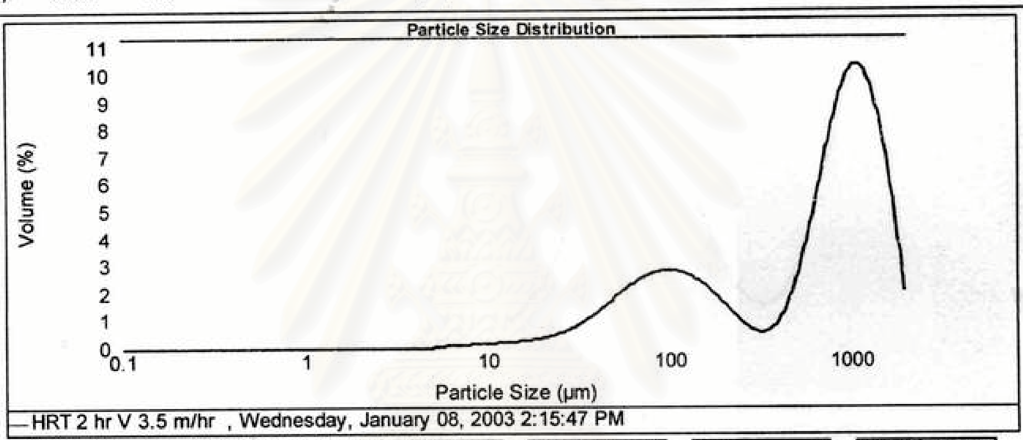
Uniformity:
0.592

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
745.098 um

Result units:
Volume

d(0.1): 62.837 um **d(0.5):** 775.609 um **d(0.9):** 1473.547 um

---



Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.00
4.477	0.00
5.024	0.01
5.637	0.06
6.325	0.07
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.08
7.962	0.09
8.934	0.11
10.024	0.12
11.247	0.13
12.619	0.15
14.159	0.17
15.887	0.20
17.825	0.23
20.000	0.28
22.440	0.35
25.179	0.44
28.251	0.56
31.698	0.71
35.566	0.87
39.905	1.06
44.774	1.26
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	1.47
56.368	1.65
63.246	1.84
70.963	1.98
79.621	2.07
89.337	2.12
100.237	2.12
112.468	2.06
126.191	1.95
141.589	1.79
158.866	1.59
178.250	1.35
200.000	1.10
224.404	0.84
251.785	0.61
282.508	0.46
316.979	0.42
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	0.55
399.052	0.91
447.744	1.51
502.377	2.35
563.677	3.40
632.456	4.56
709.627	5.74
796.214	6.75
893.367	7.48
1002.374	7.78
1124.683	7.58
1261.915	6.87
1415.892	5.75
1588.656	4.00
1782.502	2.39
2000.000	

Malvern Instruments Ltd.:es:
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 46
08 Jan 2003 03:37:17 PM

รูปที่ ข-4 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.5 ม./ชม.

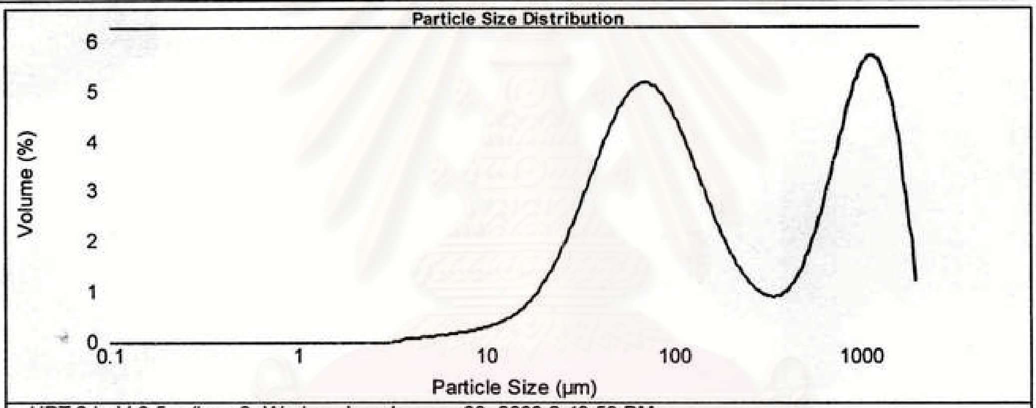
Result Pellet Analysis Report

Sample Name: HRT 2 hr V 6.5 m/hr - 2	**SOP Name:** tul	**Measured:** Wednesday, January 08, 2003 2:43:58 PM
Sample Source & type: EGSB sludge	**Measured by:** Tulachai Jaemsai	**Analysed:** Wednesday, January 08, 2003 2:43:59 PM
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Measurement	

Particle Name: pellet	**Accessory Name:**	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Enhanced
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 17.72 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 0.586 %	**Result Emulation:** Off

Concentration: 0.2030 %Vol	**Span :** 9.662	**Uniformity:** 3	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 0.0797 m²/g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 75.294 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 456.713 um	

d(0.1): 32.849 um **d(0.5):** 131.539 um **d(0.9):** 1303.765 um



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.15	50.238	3.58	355.656	0.71
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.18	56.368	3.77	399.052	0.83
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.21	63.246	3.87	447.744	1.06
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.25	70.963	3.87	502.377	1.40
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.30	79.621	3.76	563.677	1.85
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.37	89.337	3.56	632.456	2.39
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.46	100.237	3.27	709.627	2.98
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.59	112.468	2.92	796.214	3.54
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.75	126.191	2.56	893.367	4.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.96	141.589	2.17	1002.374	4.26
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.01	22.440	1.22	158.866	1.82	1124.683	4.26
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.05	25.179	1.52	178.250	1.50	1261.915	3.95
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.06	28.251	1.86	200.000	1.23	1415.892	3.38
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.08	31.698	2.23	224.404	1.01	1588.656	2.39
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.09	35.566	2.61	251.785	0.84	1782.502	1.44
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.11	39.905	2.97	282.508	0.73	2000.000	
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.13	44.774	3.30	316.979	0.68		
0.142		1.002		7.096		50.238		355.656			

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 40
08 Jan 2003 03:40:46 PM

รูปที่ ข-5 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 6.5 ม./ชม.

Result Pellet Analysis Report

Sample Name:
HRT 2 hr V 10 m/hr - 2

Sample Source & type:
EGSB sludge

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
tul

Measured by:
Tulachai Jaemsai

Result Source:
Measurement

Measured:
Wednesday, January 08, 2003 2:52:11 PM

Analysed:
Wednesday, January 08, 2003 2:52:12 PM

Particle Name:
pellet

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.253 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
20.48 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.2449 %Vol

Specific Surface Area:
0.0778 m²/g

Span :
8.400

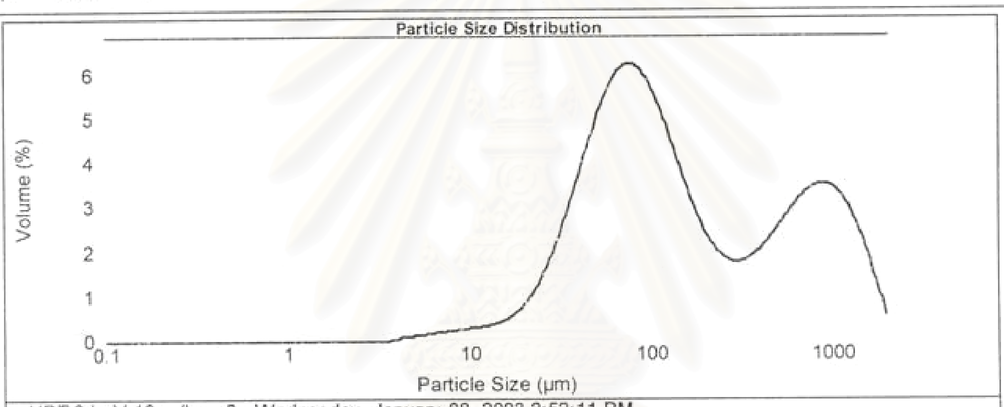
Surface Weighted Mean D[3,2]:
77.110 um

Uniformity:
2.34

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
332.982 um

Result units:
Volume

d(0.1): 36.922 um   d(0.5): 115.735 um   d(0.9): 1009.109 um



—HRT 2 hr V 10 m/hr - 2 , Wednesday, January 08, 2003 2:52:11 PM

Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.05
4.477	0.07
5.024	0.09
5.637	0.11
6.325	0.13
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.15
7.962	0.18
8.934	0.20
10.024	0.21
11.247	0.24
12.619	0.26
14.159	0.31
15.887	0.38
17.825	0.50
20.000	0.66
22.440	0.90
25.179	1.20
28.251	1.58
31.698	2.02
35.566	2.51
39.905	3.02
44.774	3.51
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	3.97
56.368	4.33
63.246	4.57
70.963	4.68
79.621	4.63
89.337	4.44
100.237	4.13
112.468	3.73
126.191	3.28
141.589	2.81
158.866	2.38
178.250	2.00
200.000	1.70
224.404	1.49
251.785	1.36
282.508	1.33
316.979	1.36
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	1.46
399.052	1.62
447.744	1.81
502.377	2.02
563.677	2.23
632.456	2.42
709.627	2.56
796.214	2.64
893.367	2.63
1002.374	2.52
1124.683	2.30
1261.915	1.99
1415.892	1.61
1588.656	1.09
1782.502	0.64
2000.000	

Malvern Instruments Ltd.:
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-89278

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 42
08 Jan 2003 03:41:58 PM

รูปที่ ข-6 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. ช่วงที่1

Result Pellet Analysis Report

Sample Name:
HRT 2 hr V 10.0 m/hr - II

Sample Source & type:
EGSB sludge

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
tul

Measured by:
Tulachai Jaemsai

Result Source:
Measurement

Measured:
Thursday, January 23, 2003 3:01:25 PM

Analysed:
Thursday, January 23, 2003 3:01:26 PM

Particle Name:
pellet

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.378 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
14.25 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.1885 %Vol

Specific Surface Area:
0.0679 m²/g

Span :
7.056

Surface Weighted Mean D[3,2]:
88.403 um

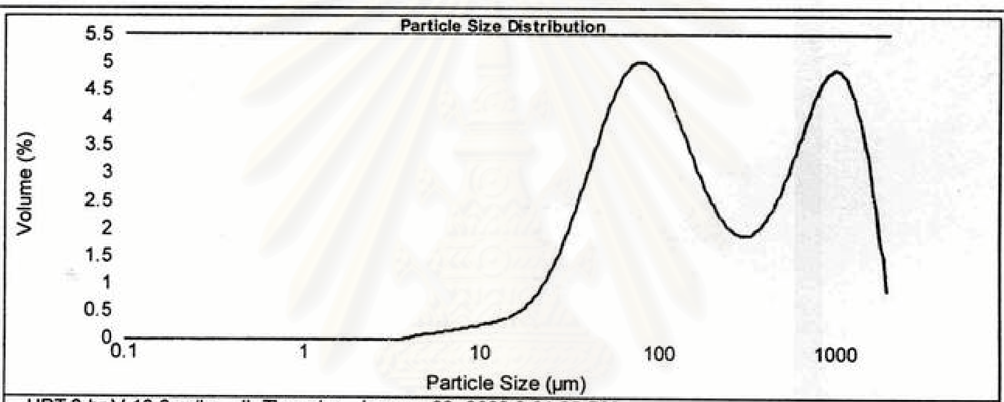
Uniformity:
2.16

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
429.342 um

Result units:
Volume

d(0.1): 39.256 um **d(0.5):** 163.992 um **d(0.9):** 1196.352 um

---



Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.6°2	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.04
4.477	0.06
5.024	0.07
5.637	0.09
6.325	0.11
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.14
7.962	0.16
8.934	0.18
10.024	0.20
11.247	0.23
12.619	0.27
14.159	0.31
15.887	0.38
17.825	0.49
20.000	0.63
22.440	0.81
25.179	1.05
28.251	1.34
31.698	1.68
35.566	2.05
39.905	2.44
44.774	2.81
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	3.16
56.368	3.45
63.246	3.65
70.963	3.76
79.621	3.77
89.337	3.68
100.237	3.50
112.468	3.24
126.191	2.94
141.589	2.62
158.866	2.31
178.250	2.02
200.000	1.78
224.404	1.60
251.785	1.48
282.508	1.42
316.979	1.43
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	1.52
399.052	1.68
447.744	1.91
502.377	2.20
563.677	2.53
632.456	2.89
709.627	3.22
796.214	3.49
893.367	3.65
1002.374	3.65
1124.683	3.46
1261.915	3.08
1415.892	2.55
1588.656	1.76
1782.502	1.05
2000.000	

Malvern Instruments Ltd.:es:
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-89227'

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 60
23 Jan 2003 03:09:36 PM

รูปที่ ข-7 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. ช่วงที่ 2

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name:
HRT 2 hr V 10.0 m/hr - III

Sample Source & type:
EGSB

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
tul

Measured by:
Defult

Result Source:
Measurement

Measured:
Tuesday, February 11, 2003 3:28:02 PM

Analysed:
Tuesday, February 11, 2003 3:28:03 PM

Particle Name:
Default

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.952 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
13.69 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.3201 %Vol

Specific Surface Area:
0.0384 m²/g

Span :
2.116

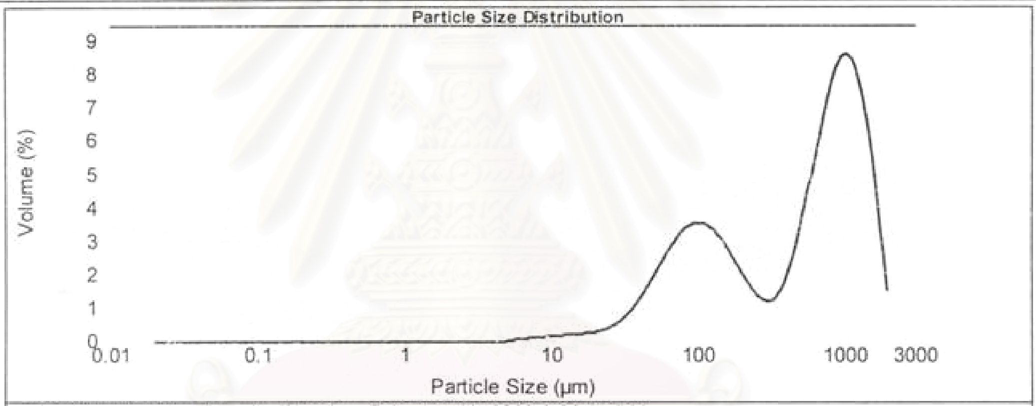
Surface Weighted Mean D[3,2]:
156.072 um

Uniformity:
0.712

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
653.716 um

Result units:
Volume

d(0.1): 63.354 um　　d(0.5): 628.883 um　　d(0.9): 1394.046 um



— HRT 2 hr V 10.0 m/hr - III, Tuesday, February 11, 2003 3:28:02 PM

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.06	50.238	1.60	355.656	1.18
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.09	56.368	1.89	399.052	1.57
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.11	63.246	2.16	447.744	2.15
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.12	70.963	2.39	502.377	2.88
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.14	79.621	2.56	563.677	3.72
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.15	89.337	2.65	632.456	4.59
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.16	100.237	2.66	709.627	5.41
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.18	112.468	2.58	796.214	6.05
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.20	126.191	2.43	893.367	6.42
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.23	141.589	2.22	1002.374	6.46
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.28	158.866	1.96	1124.683	6.12
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.00	25.179	0.36	178.250	1.68	1261.915	5.42
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.00	28.251	0.47	200.000	1.41	1415.892	4.45
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.00	31.698	0.62	224.404	1.17	1588.656	3.06
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.01	35.566	0.81	251.785	0.99	1782.502	1.81
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.05	39.905	1.05	282.508	0.91	2000.000	
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.06	44.774	1.31	316.979	0.97		
0.142		1.002		7.096		50.238		355.656			

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 65
11 Feb 2003 03:41:05 PM

รูปที่ ข-8 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 10.0 ม./ชม. ช่วงที่ 3

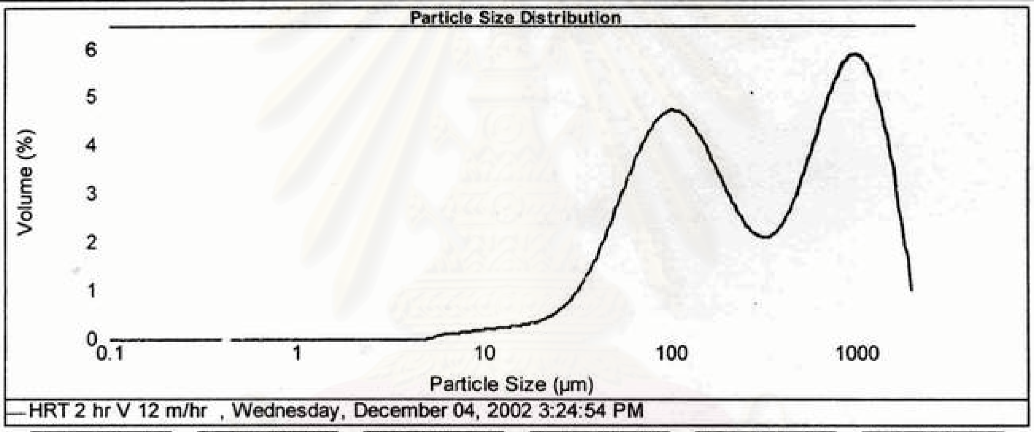
Result Pellet Analysis Report

Sample Name: HRT 2 hr V 12 m/hr	**SOP Name:** tul	**Measured:** Wednesday, December 04, 2002 3:24:54 PM
Sample Source & type: EGSB sludge	**Measured by:** Tulachai Jaemsai	**Analysed:** Wednesday, December 04, 2002 3:24:55 PM
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Measurement	

Particle Name: pellet	**Accessory Name:**	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Enhanced
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 11.45 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 0.661 %	**Result Emulation:** Off

Concentration: 0.2061 %Vol	**Span :** 4.482	**Uniformity:** 1.46	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 0.0493 m^2/g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 121.699 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 499.361 um	

d(0.1): 54.111 um **d(0.5):** 267.443 um **d(0.9):** 1252.739 um



Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.00
4.477	0.00
5.024	0.01
5.637	0.07
6.325	0.08
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.10
7.962	0.12
8.934	0.14
10.024	0.15
11.247	0.17
12.619	0.19
14.159	0.21
15.887	0.23
17.825	0.26
20.000	0.31
22.440	0.38
25.179	0.49
28.251	0.65
31.698	0.85
35.566	1.10
39.905	1.41
44.774	1.78
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	2.13
56.368	2.50
63.246	2.86
70.963	3.16
79.621	3.39
89.337	3.52
100.237	3.56
112.468	3.48
126.191	3.32
141.589	3.08
158.866	2.80
178.250	2.49
200.000	2.19
224.404	1.93
251.785	1.72
282.508	1.61
316.979	1.59
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	1.69
399.052	1.91
447.744	2.23
502.377	2.63
563.677	3.09
632.456	3.55
709.627	3.97
796.214	4.28
893.357	4.42
1002.374	4.37
1124.683	4.09
1261.915	3.60
1415.892	2.95
1588.656	2.02
1782.502	1.19
2000.000	

Malvern Instruments Ltd :es:
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892781

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 47
08 Jan 2003 03:38:32 PM

รูปที่ ข-9 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. ช่วงที่1

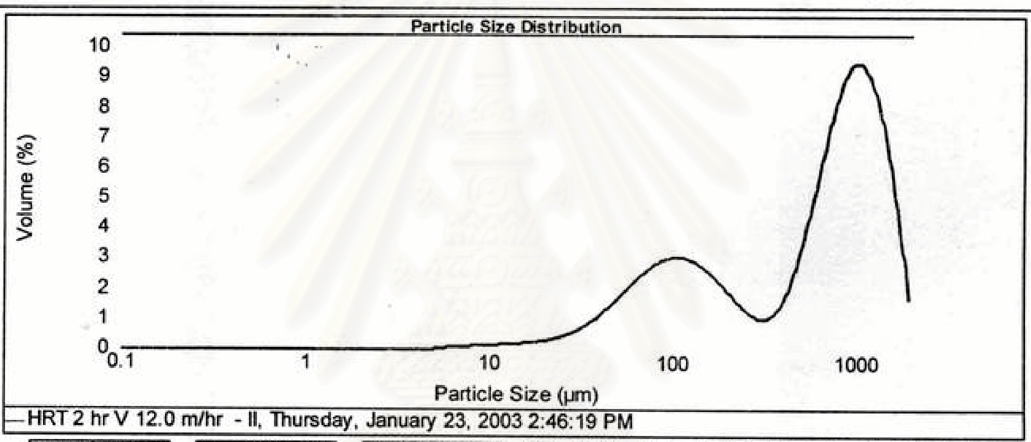
Result Pellet Analysis Report

Sample Name: HRT 2 hr V 12.0 m/hr - II	**SOP Name:** tul	**Measured:** Thursday, January 23, 2003 2:46:19 PM
Sample Source & type: EGSB sludge	**Measured by:** Tulachai Jaemsai	**Analysed:** Thursday, January 23, 2003 2:46:20 PM
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Measurement	

Particle Name: pellet	**Accessory Name:**	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Enhanced
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 26.21 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 1.014 %	**Result Emulation:** Off

Concentration: 0.7134 %Vol	**Span :** 1.930	**Uniformity:** 0.634	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 0.0356 m²/g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 168.533 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 701.037 um	

d(0.1): 66.670 um **d(0.5):** 704.389 um **d(0.9):** 1426.070 um



Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.00
4.477	0.00
5.024	0.01
5.637	0.05
6.325	0.06
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.07
7.962	0.09
8.934	0.10
10.024	0.11
11.247	0.13
12.619	0.14
14.159	0.16
15.887	0.18
17.825	0.20
20.000	0.24
22.440	0.30
25.179	0.37
28.251	0.47
31.698	0.60
35.566	0.77
39.905	0.96
44.774	1.17
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	1.40
56.368	1.62
63.246	1.84
70.963	2.02
79.621	2.17
89.337	2.26
100.237	2.30
112.468	2.26
126.191	2.17
141.589	2.01
158.866	1.81
178.250	1.57
200.000	1.32
224.404	1.08
251.785	0.88
282.508	0.77
316.979	0.79
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	0.99
399.052	1.40
447.744	2.02
502.377	2.84
563.677	3.82
632.456	4.83
709.627	5.80
796.214	6.57
893.367	7.04
1002.374	7.12
1124.683	6.77
1261.915	6.00
1415.892	4.94
1588.656	3.39
1782.502	2.01
2000.000	

Malvern Instruments Ltd.:
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-89278

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

File name: Tul2
Record Number: 59
23 Jan 2003 03:08:26 PM

รูปที่ ข-10 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. ช่วงที่ 2

MASTERSIZER 2000

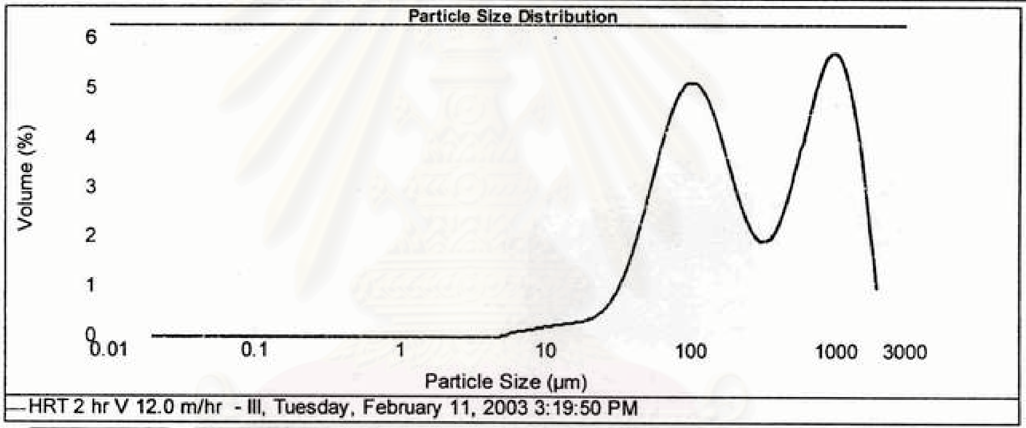
Result Analysis Report

Sample Name:	SOP Name:	Measured:
HRT 2 hr V 12.0 m/hr - III	tul	Tuesday, February 11, 2003 3:19:50 PM
Sample Source & type:	**Measured by:**	**Analysed:**
EGSB	Defult	Tuesday, February 11, 2003 3:19:51 PM
Sample bulk lot ref:	**Result Source:**	
	Measurement	

Particle Name:	Accessory Name:	Analysis model:	Sensitivity:
Default		General purpose	Enhanced
Particle RI:	**Absorption:**	**Size range:**	**Obscuration:**
1.520	0.1	0.020 to 2000.000 um	12.41 %
Dispersant Name:	**Dispersant RI:**	**Weighted Residual:**	**Result Emulation:**
Water	1.330	0.445 %	Off

Concentration:	Span :	Uniformity:	Result units:
0.2222 %Vol	5.089	1.65	Volume
Specific Surface Area:	**Surface Weighted Mean D[3,2]:**	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:**	
0.0498 m²/g	120.368 um	485.686 um	

d(0.1): 54.701 um **d(0.5):** 233.015 um **d(0.9):** 1240.559 um



Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (μm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (μm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.00
1.589	0.00
1.783	0.00
2.000	0.00
2.244	0.00
2.518	0.00
2.825	0.00
3.170	0.00
3.557	0.00
3.991	0.00
4.477	0.00
5.024	0.01
5.637	0.06
6.325	0.08
7.096	

Size (μm)	Volume In %
7.096	0.09
7.962	0.11
8.934	0.14
10.024	0.16
11.247	0.17
12.619	0.19
14.159	0.20
15.887	0.22
17.825	0.24
20.000	0.28
22.440	0.34
25.179	0.44
28.251	0.60
31.698	0.80
35.566	1.08
39.905	1.41
44.774	1.79
50.238	

Size (μm)	Volume In %
50.238	2.22
56.368	2.64
63.246	3.05
70.963	3.40
79.621	3.67
89.337	3.82
100.237	3.86
112.468	3.77
126.191	3.57
141.589	3.28
158.866	2.93
178.250	2.56
200.000	2.20
224.404	1.86
251.785	1.63
282.508	1.48
316.979	1.45
355.656	

Size (μm)	Volume In %
355.656	1.53
399.052	1.75
447.744	2.07
502.377	2.49
563.677	2.96
632.456	3.43
709.627	3.85
796.214	4.16
893.367	4.30
1002.374	4.25
1124.683	3.97
1261.915	3.48
1415.892	2.85
1588.656	1.95
1782.502	1.15
2000.000	

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

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00
Serial Number : 34403-94

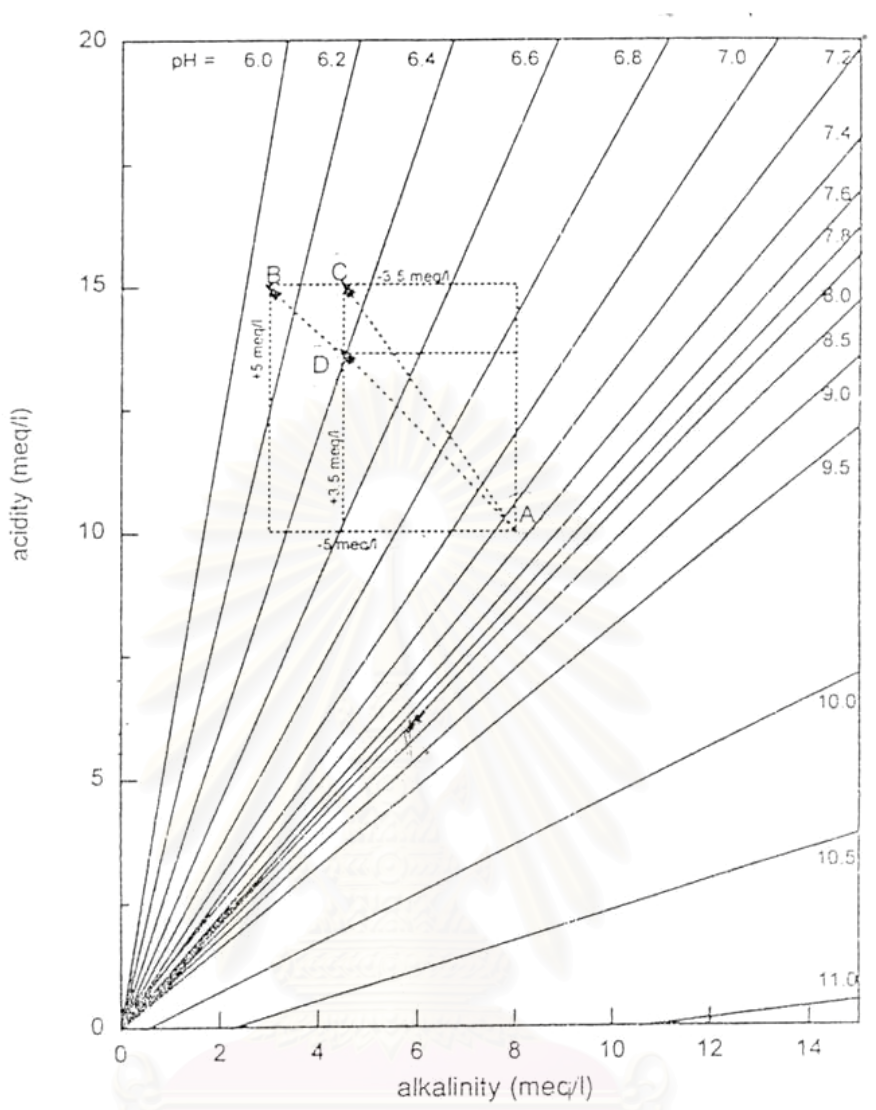
File name: Tul2
Record Number: 63
11 Feb 2003 03:39:34 PM

รูปที่ ข-11 การกระจายขนาดของสลัดจ์จากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
เวลากัก 2 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 12.0 ม./ชม. ช่วงที่ 3

ภาคผนวก ค

กราฟของDeffeyes

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-1 กราฟของ Deffeyes ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด่างกับสภาพกรด ที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ (Van Haandel และ Lettinga, 1994)

รูปที่ ค-1 ใช้ในการหาค่าสภาพกรด (acidity) ในน้ำเมื่อกำหนดค่าสภาพด่างทั้งหมด (alkalinity) ในน้ำเสีย และค่าพีเอช ดังนั้นจากกราฟจะสามารถหาค่าสภาพกรดซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำเสียได้ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.7

ภาคผนวก ง
รายละเอียดการคำนวณสภาพด่าง
และพีเอชในน้ำออกจากระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพด่างทั้งหมดและพีเอชโดยใช้ข้อมูลจากชุดการทดลองที่เวลากัก 2 ชม ความเร็วไหลขึ้น 0.5 ม./ชม. ข้อมูลจากการทดลองดังนี้

<u>น้ำเข้า</u> สภาพด่างทั้งหมด (Alk_i) = 341 มก./ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต

= 6.80 มก.สมมูล/ลิตร

พีเอช = 8.15

กรดไขมันระเหยง่าย (VFA_i) = 50 มก./ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต

= 1.00 มก.สมมูล/ลิตร

แอมโมเนียไนโตรเจน ($NH_4^+{}_i$) = 49 มก. ไนโตรเจน/ลิตร

ซีโอดี (COD_i) = 139 มก./ลิตร

<u>น้ำออก</u> กรดไขมันระเหยง่าย (VFA_e) = 40 มก./ลลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต

= 0.80 มก.สมมูล/ลิตร

แอมโมเนียไนโตรเจน ($NH_4^+{}_e$) = 49 มก. ไนโตรเจน/ลิตร

ซีโอดี (COD_e) = 45 มก./ลิตร

<u>สมมติ</u> ปริมาณมีเทนที่ละลายน้ำ = 0.001 โมล/ลิตร (64 มก./ลิตร)

1) จาก Alk_i = 6.80 มก.สมมูล/ลิตร และ พีเอช = 7.83

จาก กราฟของDeffeyes (ภาคผนวก ค.) จะได้

สภาพกรดน้ำเข้า (Acd_i) = 5.80 มก.สมมูล/ลิตร

ความเข้มข้นคาร์บอเนตน้ำเข้า (C_{ti}) = $(Alk_i + Acd_i) / 2$

= (6.80+ 5.80) / 2

= 6.30 มก.สมมูล/ลิตร

= 0.0063 สมมูล/ลิตร

2) จาก $Alk_e = Alk_i + VFA_i - VFA_e + (NH_4^+{}_e - NH_4^+{}_i)\ 0.0071$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$= 0.0068 + 0.0010 - 0.0008 + (58 - 58)0.071$

$= 0.0070$ สมมูล/ลิตร

3) ความเข้มข้นของมีเทนที่เกิด(C_{md}) = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิด(C_{td})

= ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด / 64

$= (139 - 45) / (64 \times 1{,}000)$

$= 0.0015$ โมล/ลิตร

4) ความเข้มข้นของมีเทนที่ละลายน้ำ (C_{me}) = 0.001 โมล/ลิตร

5) $pK_1 = 17.052T + 215.21 \log T - 0.12675T - 545.56$

$T = 26.4 + 273 = 299.4$ เคลวิน

$pK_1 = 6.36$

$pK_H = 1.50$ (26.4 องศาเซลเซียส)

6) จากสมการ $f_e = 0.5 * [b - (b^2 - 4c)^{0.5}]$

$b = (K_H + C_{ti} + C_{td} + C_{md} - C_{me} - Alk_e) / Alk_e$

$= (0.033 + 0.0063+ 0.0015 + 0.0015 - 0.0010 - 0.0070) / 0.0070$

$= 4.88$

$c = K_H(C_{ti} + C_{td} - Alk_e) / Alk_e^2$

$= 0.033 (0.0063 + 0.0015 - 0.0070) / 0.0070^2$

$= 0.51$

ดังนั้น $f_e = 0.5 * [5.58 - (5.58^2 - 4\times1.38)^{0.5}]$

$= 0.11$

7) พีเอชน้ำออกจากระบบ $= pK_1 - \log fe$

$= 6.36 - \log 0.11$

$= 7.33$

ภาคผนวก จ

เปรียบเทียบราคาของระบบอีจีเอสบีกับแอคติเวตเต็ดสลัดจ์ และระบบอีจีเอสบีร่วมกับซีโอไลต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดอัตราการไหลของน้ำเสียของอาคาร = 100 ลบ.ม./วัน

	EGSB	Extended aeration AS	EGSB + Zeolite
เวลากัก (ชม.)	3	20	3 + 8 = 11
ขนาดถังเติมอากาศ (ม3)	13	83	46
ขนาดถังตกตะกอน (ม3)	-	20	-
ปริมาณซีโอไลต์ (ม3)	-	-	33
ปริมาณซีโอไลต์ (กก.) bulk density = 770 กก./ลบ.ม.	-	-	25,410
NaCl ที่ใช้ในการ regen. (กก./ปี)	-	-	7,548

1.ค่าลงทุน

1.1 ก่อสร้างถัง	50,000	412,000	184,000
1.2 เครื่องสูบน้ำ			
- สูบน้ำเสีย (0.1 kw) -สำรอง 1 เครื่อง	16,000	16,000	16,000
- เติมอากาศ (2.7 kw)	-	100,000	-
- เวียนตะกอน (0.1 kw)	-	8,000	-
1.3 อื่นๆ เช่นระบบท่อ ระบบไฟฟ้า (20 % ของค่าลงทุนทั้งหมด	16,500	134,000	113,500
1.4 ซีโอไลต์	-	-	254,100
รวม	**82,500**	**670,000**	**567,600**

2. **ค่าดำเนินการ (บาท/ปี)**

2.1 ค่าไฟฟ้า	1,800	51,000	1,800
2.2 ค่าซ่อมบำรุง (5 % ของราคาเครื่องจักร)	800	6,200	800
2.3 Nacl ใช้ในการ regen. + การจัดการอื่น ๆที่เกี่ยวกับการ regen. (20 % ของราคาสารเคมี)	-	-	45,300
รวม	**2,600**	**57,200**	**47,900**

กำหนดอายุการใช้งานของระบบ 20 ปี

ต้นทุนการผลิตรวมค่าลงทุน (บาท/ลบ.ม.)	2.33	19.92	16.86
ต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าลงทุน (บาท/ลบ.ม.)	0.07	1.57	1.31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายตุลชัย แจ่มใส เกิดเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมปลายจากโรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย